

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

И.А. Каледа, Н.А. Денисова, Л.В. Круглов

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора Ю.П. Скачкова

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 08.03.01 – Строительство

Пенза 2014

УДК 627.824.001.63(075.8)

ББК 38.772-022я73

К17

*Учебное пособие подготовлено в рамках проекта
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –
«Кадры для регионов»)*

Рецензенты: кафедра строительных конструкций
Пензенского государственного университета архитектуры и строительства
(зав. кафедрой доктор технических наук,
профессор Н.Н. Ласьков);
главный инженер ФГБУ «Сурский гидро-
узел» А.А. Варламов

Каледа И.А.

К17 Гидрология и гидротехнические сооружения: учеб. пособие /
И.А. Каледа, Н.А. Денисова, Л.В.Круглов; под общ. ред. д-ра техн.
наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 140 с.

Изложены основы проведения гидрологических исследований на реках и водохранилищах, способы выполнения гидрологических и водохозяйственных расчётов, принципы конструирования и расчета гидротехнических сооружений для целей водоснабжения и водоотведения. Описаны приборы для измерения давлений, уровня жидкости, скоростей и расходов потоков, а также принцип их действия и область применения. Приведены конструкции и методы расчета гидротехнических сооружений водохранилищных гидроузлов.

Пособие направлено на овладение методами проведения инженерных изысканий, технологией проектирования деталей и конструкций в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных прикладных расчетных и графических программных пакетов, а также на формирование других профессиональных компетенций.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и базовой кафедре ПГУАС при МУП «Пензгорстройзаказчик» и предназначено для самостоятельной работы студентов направления 08.03.01 – Строительство по курсу «Гидрология и гидротехнические сооружения».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2014

© Каледа И.А., Денисова Н.А.,
Круглов Л.В., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сформированные в ПГУАС в рамках третьего Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования учебные планы по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» насыщены разноплановыми профессиональными дисциплинами. По профилю «Водоснабжение и водоотведение» предусмотрена дисциплина профессионального цикла «Гидрология и гидротехнические сооружения». Для эффективного освоения этой дисциплины при небольшом количестве аудиторных часов особое значение приобретает самостоятельная работа студентов, которая требует чёткой организации и обеспеченности литературой. Настоящее учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов профиля «Водоснабжение и водоотведение» по дисциплине «Гидрология и гидротехнические сооружения».

Учебное пособие из общего многообразия задач гидрологии и проектирования гидротехнических сооружений выделяет задачи, наиболее актуальные для специалистов в области водоснабжения и водоотведения, рационального использования водных ресурсов. Пособие предназначено для восполнения имеющихся в научно-технической литературе пробелов в вопросах освещения гидрологических расчётов и основных положений проектирования гидротехнических сооружений в свете требований современной нормативно-технической литературы.

Учебное пособие включает:

- теорию и вопросы практического применения гидрологических исследований и расчётов, проектирования гидротехнических сооружений для целей водоснабжения;
- схемы, чертежи, графики и другие иллюстрации;
- вопросы для самопроверки по главам пособия;
- приложения со справочными таблицами и методиками расчётов;
- библиографический список и список рекомендуемой литературы.

Авторы пособия выражают благодарность рецензентам за высказанные замечания и предложения, повлиявшие на качество оформления пособия и его содержание.

Читателям приносим извинения за допущенные ошибки и погрешности в оформлении текста и иллюстраций, не выявленные нами в процессе подготовки рукописи. Просим отзывы и пожелания направлять авторам на кафедру «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» ПГУАС.

ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы определяют устойчивое развитие любого государства. От них зависит уровень жизни и развития населения, поэтому получение достаточного количества воды, пригодной для питья, удовлетворения культурно-бытовых и производственных потребностей населения, волнует человечество на всём протяжении его существования.

Вода на Земле присутствует во всех трех агрегатных состояниях (жидком, твердом и газообразном), однако наибольший объем ее приходится на жидкую фазу, которая весьма значима для формирования других особенностей планеты. Гидросфера – водная оболочка Земли, включающая океаны, моря, реки, озера, подземные воды и ледники, снеговой покров, а также водяные пары в атмосфере.

Гидросфера Земли на 94 % представлена солеными водами океанов и морей, более 75 % всей пресной воды законсервировано в полярных шапках Арктики и Антарктиды (таблица).

Распределение водных масс в гидросфере Земли

Часть гидросферы	Объем воды, тыс. км ³	Доля в общем объеме вод, %
Мировой океан	1 370 000	94,1
Подземные воды	60 000	4,1
Ледники	24 000	1,7
Озера	280	0,02
Вода в почве	80	0,01
Пары атмосферы	14	0,001
Реки	1,2	0,0001

Поверхность Мирового океана, занимающая около 71 % земной поверхности, расположена между атмосферой и литосферой. Поперечник Земли, т.е. ее экваториальный диаметр, составляет 12760 км, а средняя глубина океана в его современном ложе – 3,7 км. Следовательно, толщина слоя воды в жидком состоянии в среднем составляет лишь 0,03 % земного диаметра. В сущности, это тончайшая водяная пленка на поверхности Земли, но, как озоновый защитный слой, играющая исключительно важную роль в биосферной системе.

Без воды не могло бы быть человека, животного и растительного мира, так как большинство растений и животных состоит в основном из воды. Для многих живых существ вода служит средой обитания. Таким образом, главной особенностью гидросферы является изобилие жизни в ней.

Велика роль гидросферы в поддержании относительно неизменного климата на планете, поскольку она, с одной стороны, выступает как аккумуля-

лятор тепла, обеспечивая постоянство средней планетарной температуры атмосферы, а с другой – за счет фитопланктона продуцирует почти половину всего кислорода атмосферы.

Водная среда используется для лова рыбы и морепродуктов, сбора растений, добычи подводных залежей руды (марганца, никеля, кобальта) и нефти, перевозки грузов и пассажиров. В производственной и хозяйственной деятельности человек применяет воду для очистки, мытья, охлаждения оборудования и материалов, полива растений, обеспечения специфических процессов, например выработки электроэнергии и т.п.

Водные ресурсы Российской Федерации слагаются из запасов поверхностных (речной сток, озёра, болота, ледники) и подземных вод. Объём речного стока, формирующегося на территории России, составляет 4043 км³/год, что соответствует 236 тыс. м³/год на 1 км² территории и 27,8 тыс. м³/год на одного жителя [13]. Дополнительный сток, поступающий из сопредельных государств, составляет 227 км³/год. В России насчитывается более 2,3 млн озёр, запасы воды в которых составляют 26068 км³. В болотах, которые расположены на северо-западе и севере европейской части страны и в северных районах Западной Сибири, сосредоточено около 3 тыс. км³ воды. Источником чистой пресной воды являются ледники, расположенные на арктических островах и в горных районах – 39890 км³.

Объём естественных запасов подземных вод в России оценивается как 28 тыс. км³. На территории страны разведано более 3370 месторождений подземных вод, из которых используется лишь 48 %. Эксплуатационные запасы разведанных месторождений составляют 28,5 км³/год. Степень их использования не превышает 33 %.

В России, как и в других странах, наблюдается большая неравномерность распределения водных ресурсов по территории страны. Внутригодовая и многолетняя изменчивость речного стока затрудняет обеспечение экономики государства необходимым количеством воды. Эта проблема решается за счет регулирования речного стока путём создания водохранилищ, суммарный объём которых составляет 793 км³ при суммарной площади зеркала 65 тыс. км².

Основными источниками воды для нужд промышленного и коммунального водоснабжения служат реки, водохранилища и озера. Для оценки водности этих источников, их пригодности для надёжного водоснабжения различных объектов необходимы знание процессов, протекающих в водных объектах; зависимостей характеристик водных объектов от физико-географических факторов; повторяемости процессов во времени. В связи с большой неравномерностью распределения водных ресурсов на Земле в регионах нашей страны возникает необходимость проводить перераспределение речного стока во времени, а порой и в пространстве. Изучением вопросов формирования речного стока, измерениями показателей стока,

использованием стока естественных или зарегулированных рек занимается гидрология.

Для целей перераспределения речного стока во времени возводят гидроузлы, в состав которых входят водоподпорные (плотины) и водопропускные (водосбросы и водоспуски) сооружения. Проектированием гидротехнических сооружений занимается гидротехника.

На водных источниках в естественном и зарегулированном состоянии строят водовыпуски очищенных сточных вод и водозаборные сооружения, конструирование которых производится в соответствии с режимом стока водного объекта.

Всё вышесказанное говорит о том, что изучение гидрологии и речной гидротехники является важной составной частью подготовки бакалавров направления «Строительство» по профилю «Водоснабжение и водоотведение».

1. ГИДРОЛОГИЯ

1.1. Предмет изучения, составные части гидрологии

Гидрология – это наука, изучающая гидросферу, ее свойства и протекающие в ней процессы и явления во взаимосвязи с атмосферой, литосферой и биосферой. Гидросфера – водная оболочка Земли, включающая океаны, моря, реки, озера, подземные воды и ледники, снеговой покров, а также водяные пары в атмосфере.

К задачам гидрологии относится изучение свойств воды, процессов, протекающих в водных объектах, зависимости характеристик водных объектов от физико-географических факторов.

Гидрология подразделяется на два больших раздела: гидрология суши, предметом изучения которой являются все водные объекты, расположенные в пределах суши, и гидрология моря (океанология). Важной частью гидрологии является гидрометрия – наука о средствах и методах изучения величин, характеризующих движение воды и режим водных объектов. Предметом нашего изучения являются гидрология и гидрометрия вод суши.

Водные объекты суши – скопления природных вод на земной поверхности и в верхних слоях земной коры, обладающих определённым гидрологическим режимом. Выделяют три группы водных объектов – водотоки, водоёмы и особые водные объекты (ВО).

К **водотокам** относятся водные объекты на земной поверхности с движением воды в руслах в направлении уклона (естественные: реки, ручьи; искусственные: каналы). **Водоёмы** – это водные объекты, сосредоточенные в понижениях земной поверхности, с замедленным движением воды (естественные: океаны, моря, озёра, болота; искусственные: водохранилища, пруды). Группу водных объектов, не укладывающихся в понятия «водоёмы» и «водотоки», составляют **особые водные объекты** – ледники, подземные водоносные горизонты.

Водоток, в русле которого движение воды происходит в течение всего года или большей его части, называется **постоянным водотоком**. Считается, что небольшие периоды пересыхания русла не оказывают большого влияния на водность, и русло сохраняет, в общем, свое положение. Водотоки, в руслах которых движение воды происходит меньшую часть года, называют **временными водотоками**. В руслах таких водотоков могут появиться устойчивый травяной покров и даже мелкие кустарники, увеличивающие шероховатость таких русел. Русла временных водотоков не всегда отчетливо выражены.

Реки в зависимости от их протяженности принято разделять на малые (протяжённостью 10...100 км), средние (протяжённостью 100...500 км) и

крупные (протяжённостью более 500 км). Водотоки протяженностью до 10 км, имеющие неустойчивый режим, принято называть ручьями.

Водные объекты обладают **водосбором** (водосборным бассейном), под которым понимается часть земной поверхности, толщи почв и горных пород, откуда вода поступает к данному водному объекту. Водосборы имеются у всех океанов, морей, озёр, рек, ручьёв. Граница между смежными водосборами называется **водоразделом**. Различают поверхностный и подземный водоразделы.

1.2. Общие сведения о реках

1.2.1. Река, её притоки. Речная система

Вода, стекая по склонам, первоначально образует мелкие эрозионные борозды, которые, постепенно увеличиваясь и объединяясь под воздействием движущейся жидкости, образуют русла. **Руслом** называется выработанное водотоком ложе, по которому постоянно или периодически происходит движение воды.

*Совокупность русел всех водотоков (постоянных и временных) в пределах какой-либо территории называется **русловой сетью**. Часть русловой сети, состоящая из отчетливо выраженных русел постоянных водотоков, называется **речной сетью** или **речной системой**.*

Речная система состоит из **главной реки и притоков**, которые, в свою очередь, также имеют притоки. Реки, впадающие в главную реку, называются *притоками первого порядка*. Притоки притоков соответственно называются притоками второго, третьего и так далее порядков. Наивысший порядок имеют самые малые реки, представляющие собой неразветвлённые водотоки. Возможна и обратная классификация притоков. Самые малые водотоки можно относить к первому классу. Тогда самый высокий класс будет иметь главная река. Следовательно, класс (порядок) реки может рассматриваться как количественная характеристика степени разветвленности речной системы.

К количественной характеристике речной сети относится ее густота K_r . **Густотой речной сети** K_r называется длина речной сети, приходящаяся на единицу площади какой-либо территории. Можно подсчитать густоту речной сети в пределах бассейна реки.

Начало реки, соответствующее месту, с которого появляется постоянное течение воды в русле, называется **истоком реки**. Истоком реки часто служат родник, озеро, болото, ледник. Место впадения реки в другую реку, озеро, море или океан называется **устьем**.

В морфологии устьев рек, впадающих в реки, и устьев рек, впадающих в моря, существует большое различие, так как в первом случае происходит

слияние двух водотоков, во втором – впадение водотока практически в неограниченное водное пространство, для которого характерны береговые течения, волнение, переформирование берегов и другие процессы.

Различают две основные **формы сопряжения речных потоков с морем**: дельты и эстуарии. Река, транспортирующая большое количество наносов, отлагает их при впадении в море. Накопление наносов способствует разветвлению русла, уменьшению его пропускной способности. *Многорукавное русло, формирующееся в собственных отложениях при впадении в море, называется дельтой.* Наносы рек образуют за пределами устьев мелководные взморья, а часто и русловые формы в виде небольших островов, называемых *баррами*. При малом содержании в реке наносов и приливных явлениях условия для образования дельты отсутствуют. *Река впадает в море одним расширенным, размытым руслом, называемым эстуарием.*

Длина реки обычно отсчитывается от истока вниз по течению по линии наибольших глубин. Положение этой линии определяет **фарватер реки**, т.е. ту часть реки, по которой осуществляется судоходство (при ограниченных глубинах). При анализе формирования русел кроме линии наибольших глубин используется понятие «**динамическая ось потока**» – линия на плане реки, в каждой точке которой скорость течения воды имеет наибольшее значение в живых сечениях. Линия, соединяющая точки с наибольшей поверхностной скоростью течения в живых сечениях потока, называется **стрежнем потока**. Если наибольшие скорости наблюдаются на поверхности воды, то динамическая ось потока и стрежень совпадают.

1.2.2. Речной бассейн

Бассейном реки называется часть земной территории, с которой вода по поверхности и подземным путём стекает в отдельную реку. Речной бассейн состоит из поверхностного и подземного водосборов, границы которых не совпадают. Из-за сложности определения подземного водораздела за размер речного бассейна принимают площадь поверхностного водосбора. Различают также физико-географические и морфометрические характеристики бассейнов. *К физико-географическим характеристикам бассейнов относятся:*

- географическое положение (географические координаты, близость к морям, пустыням, горным хребтам);
- климатические условия (атмосферные осадки, температура, дефицит влажности воздуха);
- геологическое строение и почвенный покров (трещиноватость горных пород, карстовые явления, механический состав грунтов, водопроницаемость почвы и др.);

- рельеф водосбора (уклоны поверхности земли, влияющие на скорость стекания воды);
- растительный покров (виды растительности, степень залесенности, выражаемая коэффициентом залесенности – отношением площади лесов к площади бассейна);
- озёрность бассейна, выражаемая коэффициентом озёрности.

К *морфометрическим характеристикам бассейнов* относятся:

- площадь, длина, средняя ширина бассейна;
- средняя высота бассейна;
- параметры формы речного водосбора;
- круговой график бассейна;
- график нарастания площади водосбора;
- средний уклон поверхности бассейна и др.

Длиной бассейна называют расстояние по прямой от замыкающего створа или устья главной реки до самой удалённой точки бассейна. При изогнутой форме бассейна прямая заменяется ломаной линией, каждый отрезок которой повторяет главные изгибы русла. Средняя ширина бассейна равна площади бассейна, делённой на его длину. Средний уклон бассейна определяют по уклонам между горизонталями – по отношению разности отметок горизонталей к среднему горизонтальному проложению между ними.

Бассейны рек имеют, как правило, вытянутую грушевидную форму – им присуще расширение примерно в средней части. Это объясняется особенностями строения речной системы.

1.2.3. Речная долина и русло

Вытянутые и извилистые углубления земной коры, выработанные под влиянием продолжительного эрозионного воздействия водного потока, представляют собой **долины**. Основными элементами поперечного профиля и зрелой речной долины являются русло, правобережная и левобережная поймы, склоны долины, террасы.

В зависимости от происхождения долин их подразделяют на тектонические, вулканические, ледниковые и эрозионные. По форме поперечного профиля различают долины: каньоны, ущелья, трапецевидные, корытообразные.

Русло формируется на дне долины, сложенной речными наносами. Часть дна речной долины, сложенная наносами и периодически затапливаемая в половодье и паводки, называется **поймой**.

Основное различие между руслом реки и поймой в том, что границы русла реки четко определяются берегами и бровками русла. Пойма не имеет таких четких границ на склонах долины, так как высота паводков и

половодий постоянно меняется. Дно русла реки по грунтовому составу более однородное и плавное, чем пойма. Рельеф поймы имеет более резкие очертания. Кроме того, для поймы характерны травяной покров, кустарники, а часто и лес. Поэтому пойменное русло оказывает существенно большее сопротивление движению воды, чем русло реки. Русловый и пойменный потоки находятся в сложном взаимодействии.

Отношение ширины поймы к ширине русла реки убывает с ростом размеров реки, а следовательно, и её водности.

В долинах с широким дном могут образоваться **речные террасы**: аккумулятивные в результате врезания реки в собственные отложения и эрозионные в результате воздействия потока на коренные породы.

Размеры долины и русла реки находятся в прямой связи с величиной её стока и гидрологическим режимом.

Размеры и очертание эрозионных долин обусловлены различной сопротивляемостью размыву пород различного состава. Возникающие при этом изгибы речного потока называются **меандрами** (по названию очень извилистой реки в Древней Греции). М.В. Великанов выделяет несколько стадий развития меандров:

1. Осевая линия потока близка к синусоиде.
2. Осевая линия постепенно переходит в ряд сопряженных между собой дуг окружности (если русло сложено легко размываемыми грунтами).
3. При последующем размыве вогнутого берега русло принимает вид петли.
4. Образование прорыва при сближении смежных петель (во время паводка); в результате уменьшается длина русла и изменяются параметры движения.
5. Образование староречий (стариц).

Старица – водоем в пойме реки, удлиненный в плане, постепенно заиливающийся. Она возникает в результате отчленения участка речного русла при прорыве петли или разработки спрямляющей протоки.

Пространственное распределение глубин в русле лучше всего характеризуют **изобаты** – линии равных глубин.

Существует классическая форма распределения глубин в меандрирующих руслах. Она характеризуется закономерным чередованием мелких и глубоких участков потока (рис. 1.1) по длине, называемых перекатами и плесами. Характерная для равнинных рек форма донного рельефа, сложенная наносами и обычно в виде широкой гряды пересекающая русло под углом к общему направлению течения, вызывающая отклонение его от одного берега к другому, называется **перекатом**. *Глубоководный участок реки, находящийся между перекатами, называется плесом*. На рис. 1.1

схематически показан перекат 5 с гребнем, расположенный между плесами 1 и 2. Кривая, соединяющая нижнюю часть верхней плесовой ложбины 1 с верхней частью нижней плесовой ложбины 2, обозначает в плане положение фарватера 6. Плесы расположены у вогнутых берегов. У противоположных выпуклых берегов с некоторым смещением вниз расположены отмели 3 и 4, называемые **побочнями**. Обсыхающее в межень скопление донных наносов на выпуклом берегу речной излучины называется речным пляжем.

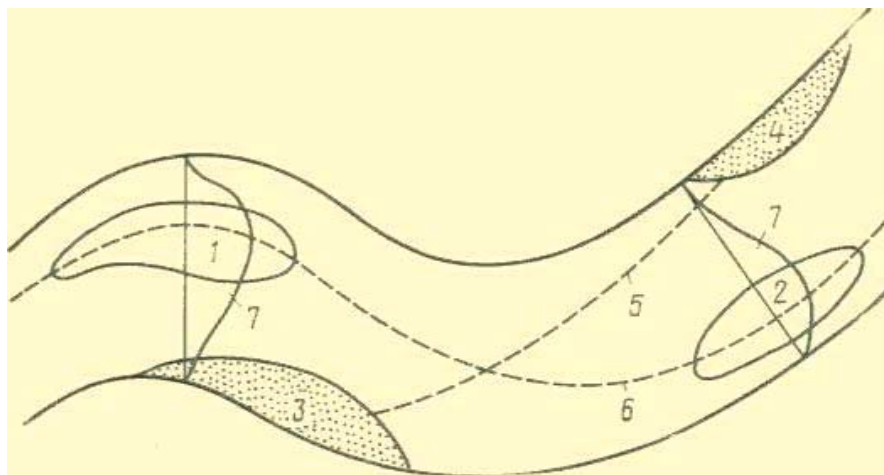


Рис. 1.1. Схема расположения руслового комплекса плес – перекат – плес:
 1 – верхний плес; 2 – нижний плес; 3 – верхний побочень;
 4 – нижний побочень; 5 – гребень переката; 6 – фарватер;
 7 – поперечные профили реки

Извилистость рек и образование плесов и перекатов тесно связаны с поперечной циркуляцией в потоке, в результате которой размывается вогнутый берег, а продукты размыва (наносы) откладываются на выпуклом берегу. Участок извилистого речного русла между двумя смежными точками перегиба его осевой линии называется **излучиной реки**. Форма и положение в плане излучин изменяются во времени под влиянием взаимодействия потока и русла, сопровождающегося изменением поля скоростей, размывами, транспортом наносов и их отложением.

1.2.4. Поперечный и продольный профили реки

Поперечным профилем реки называют вертикальный разрез речного русла в створе – в поперечном сечении реки – плоскостью, перпендикулярной направлению течения. Форма поперечных профилей рек отличается большим разнообразием. Так, на плесовых участках профиль дна реки асимметричный. Вертикаль с наибольшей глубиной смещена ближе к во-

гнутому берегу (см. рис. 1.1). Это объясняется возникновением поперечной циркуляции под действием центробежной силы, под влиянием которой образуется поперечный уклон поверхности воды, который может быть соизмерим с продольным уклоном.

Поперечный уклон поверхности воды возникает и под влиянием отклоняющей силы вращения Земли. Движущаяся в реках вода отклоняется в северном полушарии вправо, а в южном – влево. Следовательно, линия поверхности воды в поперечном сечении реки имеет наклон, кроме очень редких случаев, когда на криволинейных участках реки центробежная сила и отклоняющая сила вращения Земли при алгебраическом сложении дают нуль. С течением времени такой процесс приводит к созданию несимметричных форм русла с подмытым и крутым правым берегом, отмелью и пологим левым.

Продольным профилем реки принято называть вертикальный разрез речного русла вдоль фарватера. На нём показываються совмещённые кривые отметок дна и уровней воды, измеренных одновременно в нескольких сечениях (створах) реки в абсолютных отметках. Продольный профиль обычно изображают в различных горизонтальном и вертикальном масштабах, которые могут отличаться в тысячи раз.

Продольный профиль характеризуется изменением глубины по длине реки. Кроме того, на продольном профиле видны изменения характерных уровней воды, например, летнего и весеннего. При построении продольного профиля поверхности воды за основу принимаются меженные (нижние) уровни.

На основании обобщения топографических и гидрометрических данных по многим рекам установлены главные **типы продольных профилей** дна рек:

1. **Вогнутый** – с уменьшением уклона дна от истока к устью реки. Этот профиль встречается чаще всего и носит название профиля равновесия реки. Он образуется в результате наступления равновесия между эрозией, транспортом и аккумуляцией наносов при стабильном базисе эрозии. Фактически полного равновесия между указанными процессами не наблюдается, поэтому само понятие «профиль равновесия» до некоторой степени условно. Профиль равновесия можно рассматривать как предельную форму продольного профиля дна, к которому стремится река.

2. **Прямолинейный** – наблюдающийся чаще всего у малых рек.

3. **Выпуклый** – при увеличении уклона дна от истока к устью реки. Этот профиль встречается сравнительно редко.

1.2.5. Питание рек

Речной сток формируется за счёт поступления в реки вод атмосферного происхождения, однако пути поступления вод в реки могут быть различными. Выделяют следующие **виды питания рек**: дождевое, снеговое, ледниковое и подземное.

Дождевое питание имеет преобладающее значение в тропических областях земного шара и в других районах с мягким тёплым климатом. Сток крупнейших рек мира (Амазонка, Ганг, Меконг) формируется в основном за счёт дождевых вод. Этот вид питания в глобальном масштабе является главнейшим. Вторым по важности является **снеговое питание**. Его роль велика в питании рек в условиях умеренного климата, когда зимой накапливаются значительные запасы снега. Третье место по объёму поступающих в реки вод занимает **подземное питание**. Именно подземные воды обуславливают постоянство или большую продолжительность стока реки в течение года. Около 1 % рек мира имеют **ледниковое питание**. Это, как правило, реки, берущие начало в горных районах.

У каждой реки доля отдельных видов питания различна. Определение этой доли – задача исключительно сложная. Наиболее точно её можно решить при использовании меченых атомов, т.е. путём радиоактивной маркировки вод различного происхождения.

Известный русский климатолог А.И. Воейков был первым, предложившим классификацию рек земного шара по видам питания. Им же было предложено районирование земного шара по характеру питания рек – были выделены области, где реки получают питание преимущественно от таяния снегов или выпадения дождей; области, где постоянных водотоков нет.

В настоящее время более распространена классификация рек по источникам питания М.И. Львовича. Для определения степени преобладания того или иного вида питания приняты три градации:

1. Если один из видов питания даёт более 80 % годового стока реки, то говорят об *исключительном* значении этого вида питания. Для ледникового питания – 50 %. Другие виды питания не учитывают.

2. Если на долю данного вида питания приходится 50...80 % стока, то вид питания называют *преимущественным* (для ледникового питания – 25...50 %). Другие виды питания учитывают, если на их долю приходится более 10 % стока.

3. Если же не один вид питания не даёт более 50 % стока, то этот вид питания считают *смешанным*.

Большая часть рек территории бывшего СССР имеет преобладающее снеговое питание. Почти исключительно снеговое питание имеют реки Северного Кавказа и Заволжья. Реки дождевого питания характерны для южной части территории к востоку от Байкала; для Черноморского по-

бережья Кавказа и Крыма; для бассейнов Яны и Индигирки. Ледниковое питание имеют реки на Кавказе и в Средней Азии.

1.2.6. Уровненный режим

Непрерывное изменение притока воды в реку приводит к колебанию расходов воды в реке и соответствующих им уровней воды. В общем случае увеличению расхода воды соответствует повышение уровня. Меняет при этом своё положение и линия пересечения поверхности воды в русле с берегом (*урез воды*).

Взаимосвязь расходов и уровней, изображённая графически в прямоугольных координатах, называется **кривой расходов**. Если по всей амплитуде колебаний расходов каждому его значению соответствует единственное значение уровня, то связь между расходами и уровнями является однозначной. Однозначная связь между расходами и уровнями соответствует равномерному установившемуся движению воды в недеформируемом русле, чего в естественных реках не бывает. В естественных руслах строят кривую расхода с паводочной петлёй, которая показывает, что при одном и том же уровне в период подъёма уровня наблюдается больший расход, чем на спаде.

1.2.7. Гидрологический режим рек

В понятие «*гидрологический режим*» входят:

- водный режим;
- термический и ледовый режимы;
- русловой режим.

Водным режимом называется изменение во времени уровней, расходов и объёмов воды в водных объектах. Изучение для различных рек хронологических графиков изменения расходов и уровней воды в данном сечении за многие годы позволяет выделить характерные периоды повышенных и пониженных расходов воды и установить последовательность их чередования. Объём годового стока реки может изменяться от года к году, но характерные периоды (фазы) режима в основном сохраняются. Под **фазами водного режима рек** понимают характерные состояния водного режима реки, повторяющиеся в определённые гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания. Основными фазами водного режима реки являются половодье, паводок и межень.

Половодьем называют фазу водного режима реки, ежегодно повторяющуюся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующуюся наибольшей водностью, высоким и длительным подъёмом уровня воды и вызываемую снеготаянием или совместным таянием снега и ледников. Для внутриконтинентальных территорий половодье свя-

зывают со снеготаянием, но правильнее было бы его связывать с главным источником питания. Например, в муссонных и тропических зонах половодье обусловлено летними дождями.

Паводок – фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным, кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей.

Меженью называют фазу водного режима реки, ежегодно повторяющуюся в одни и те же сезоны, характеризующуюся малой водностью, длительным стоянием низкого уровня и возникающую вследствие уменьшения питания реки. Различают летнюю и зимнюю межень.

Термический режим рек (временные изменения температуры воды в реке) обусловлен метеорологическими факторами: изменением радиационного баланса, температуры воздуха.

В условиях умеренного климата наиболее типичны сезонные изменения температуры в реках. Зимой под ледяным покровом вода имеет температуру около 0 °С. Весной в период повышения температуры воздуха и осенью в период её понижения изменения температуры воды следует с некоторым отставанием за изменением температуры воздуха. Максимальная температура воды не достигает максимальной температуры воздуха. Например, на реках Подмосковья максимальные температуры составляют 22–24 °С при температуре воздуха 28–30 °С. Среднегодовая температура воды заметно выше среднегодовой температуры воздуха, ведь температура воды не может, как правило, приобретать отрицательные значения.

Суточные изменения температуры воды также отстают от изменений температуры воздуха. Минимальная температура воды наблюдается обычно в утренние часы, а максимальная – в 15–17 часов (максимальная температура воздуха обычно бывает на 1–2 часа раньше).

Температура речной воды имеет и пространственные изменения. Вдоль рек, текущих в меридиональном направлении, наибольшее различие температуры вдоль реки отмечается в период нагревания. Часто температура воды в реках изменяется ниже впадения крупных притоков. В летнее время существенно уменьшается температура воды в реках ниже водохранилищ, что связано с поступлением воды в реки с нижних слоёв водохранилища, имеющих пониженную температуру. По ширине и глубине реки температура воды изменяется мало из-за турбулентного перемешивания. Однако летом у дна температура воды ниже, чем на поверхности, а у берегов выше, чем в середине. Осенью у берегов температура воды оказывается немного ниже, чем в остальной части поверхностного сечения потока.

Зимний режим рек и условия его протекания зависят от географического положения и климата бассейна реки. Реки юга страны не замерзают совсем или замерзают на короткий срок. Реки средней полосы России

замерзают на несколько месяцев. Наиболее долго скованы льдом реки бассейна Северного Ледовитого океана – до 8 месяцев.

С точки зрения изучения **ледовых явлений** наиболее интересны замерзающие реки. На таких реках выделяют три характерных периода: замерзания (осенние ледовые явления), ледостава и вскрытия (весенние ледовые явления).

Начальная фаза осенних ледовых явлений – образование **сала** (плавающих кусков ледяной плёнки, состоящих из кристалликов льда в виде игл). В средней полосе России сало обычно плывёт по реке 3–8 дней. Почти одновременно у берегов, где скорости течения меньше, образуются **забереги** – узкие полоски неподвижного льда. По мере охлаждения всей массы воды в ней начинает образовываться **внутриводный лёд (шуга)**. Непременное условие образования шуги – переохлаждение воды на поверхности или у дна и наличие в воде ядер кристаллизации.

Ледяной покров на реках и водоёмах вначале возникает на мелководье: у берегов, в заливах, а затем по мере охлаждения воды начинается образование льда на водной поверхности вдали от берегов. В процессе образования льдин участвуют скопления сала, шуги и снежуры (скопления только что выпавшего на воду снега). Далее начинается *осенний ледоход*, который на больших реках продолжается 10–12 дней, на малых – до 7 дней.

По мере увеличения числа плавающих льдин и их размера скорость движения ледяных полей уменьшается. В местах сужения русла, у островов, в мелких рукавах ледяные поля останавливаются и смерзаются. Этому могут способствовать *заторы* – закупорки русла плавающими льдами. Образуется сплошной ледяной покров – *ледостав*. Для малых рек характерно наступление ледостава без осеннего ледохода путём расширения и смерзания заберегов. Некоторые участки реки под воздействием динамических или термических факторов могут не замерзать продолжительное время или совсем: на порогах или быстринах, в нижних бьефах гидроузлов, в местах выходов в реку относительно тёплых подземных вод, в местах выпуска тёплых условно чистых и сточных вод.

Толщина ледяного покрова на реках в течение зимы постепенно увеличивается. Интенсивность нарастания льда падает с появлением на нём снежного покрова. За период ледостава прослеживается закономерность: чем толще снежный покров, тем тоньше лёд. Оценку нарастания льда на реках можно осуществлять с учётом эмпирической связи толщины льда с суммой отрицательных температур воздуха, например, по формуле Ф.И. Быдина:

$$h_{\text{л}} = 2\sqrt{\sum|-T|}, \quad (1.1)$$

где $\sum|-T|$ – сумма среднесуточных температур воздуха за период ледостава.

Толщина льда на реках юга европейской части России не превышает 20–40 см, на севере – 1,0 м. На реках Сибири толщина льда достигает 1,5–2,0 м. Малые реки этого региона нередко промерзают до дна. Иногда перемерзают и крупные реки – Яна, Индигирка.

С наступлением весны ледяной покров начинает разрушаться. На этот процесс влияют солнечная радиация, поступление теплоты из воздуха и с тёплыми водами, механическое воздействие текущей талой воды.

Сначала начинает таять снег на льду и у берегов. У берегов под воздействием нагревания грунта, стекания со склонов талых вод и повышения уровня воды в реке образуются полосы чистой воды – **закраины**. Продолжительный подъём воды приводит лёд в движение: возникают подвижки льда, смещения ледяных полей, а затем начинается весенний ледоход.

Вскрытие рек начинается с низовьев и распространяется вверх по течению. На текущих с севера на юг больших реках вскрытие происходит в основном под влиянием термических факторов, несколько опережает волну весеннего половодья и происходит относительно спокойно (Дон, Днепр, Волга). На реках, текущих с юга на север, вскрытие рек протекает более бурно (Енисей, Лена). Здесь главным фактором становится динамический – воздействие текущих талых вод. Ледоход по времени совпадает с половодьем, идёт очень бурно, часто сопровождается заторами, чему способствует более позднее вскрытие рек в низовьях. Заторы приводят к значительному повышению уровня рек и даже к наводнениям.

На малых реках ледяной покров часто тает на месте и весеннего ледохода не наблюдается.

1.3. Речной сток

1.3.1. Факторы стока

Поступление воды в реки в течение года крайне неравномерное и зависит от климатических условий. По определению А.И. Воейкова, «река есть продукт климата». Да и анализ кругооборота воды в природе позволяет считать основными факторами, влияющими на речной сток, **климатические факторы**: *осадки; температура воздуха, почвы и воды; скорость и направление ветра; влажность воздуха; испарение.*

С инженерной точки зрения при изучении осадков представляют интерес количество осадков x и продолжительность их выпадения t_x . Среднее количество атмосферных осадков, мм, выпадающее в 1 мин, за отдельный дождь (снегопад) на водонепроницаемую горизонтальную поверхность называют **интенсивностью i_x выпадения осадков**. По характеру выпадения осадков различают ливневые, обложные и морозящие дожди.

Ливневые осадки выпадают в виде дождя, снега, града, крупы и мокрого снега. Они образуются при быстром подъёме воздушных масс с водяными парами вверх и отличаются большой интенсивностью ($i_x > 0,3$ мм/мин), сравнительно коротким сроком выпадения и небольшой площадью распространения.

Ливневые осадки, обуславливающие дождевые паводки на реках, играют важную роль в процессе формирования стока рек. Максимальные расходы дождевых паводков достигают больших значений, а на малых реках могут превысить максимальные расходы от снеготаяния.

Обложные осадки, выпадающие в виде дождя и снега, образуются при медленном подъёме тёплых воздушных масс. Для них характерны невысокая интенсивность, длительный период выпадения и большие площади распространения. Обложные осадки дают большой сток, но максимальные расходы от них меньше, чем от ливней, что объясняется их растянутостью во времени.

Моросящие осадки, состоящие из мелких частичек воды или снега, характеризуются очень медленным выпадением на землю. Как правило, они весьма мало сказываются на стоке рек.

Средний слой осадков для Земного шара за год составляет 1130 мм. Разница в величине слоя осадков для различных районов Земного шара значительна: так, в некоторых районах Индии годовой слой осадков достигает 15 тыс. мм, тогда как в пустынных областях Африки он не превышает 10 мм.

Количественные характеристики осадков могут быть представлены в виде месячных, годовых и среднемноголетних значений. Их получают непосредственно на метеорологических станциях в виде таблиц, составленных по данным наблюдений.

Испарение с поверхности речного бассейна включает в себя испарение с поверхности водоемов, находящихся на его территории, и с поверхности снежного покрова и льда, и испарение с почвы, включая транспирацию растений. Наблюдения над испарением с водной поверхности проводятся с помощью специальных приборов (испарителей и испарительных бассейнов) на водоиспарительных станциях.

Помимо климата на речной сток влияют **географические факторы**: *величина и форма бассейна реки; его геология и рельеф; почвы; озёра; болота; ледники; направление течения реки; растительность.*

Рельеф речных бассейнов определяется совокупностью форм земной поверхности, высотным их расположением, степенью расчлененности и изрезанности, крутизной и экспозицией склонов, уклонами водных потоков. Влияние рельефа поверхности водосбора на сток проявляется различно. Наличие крупных форм рельефа способствует увеличению скорости стекания воды по поверхности водосбора, а при больших уклонах интенсифицирует сток.

фицируется развитие гидрографической сети. В то же время плоский, равнинный рельеф способствует увеличению водоудерживающей способности бассейна: при одинаковых прочих условиях фильтрация больше в равнинных бассейнах по сравнению с горными. В общем случае непосредственное влияние рельефа (уклонов и длины склонов) на речной сток ощутимо при малых площадях водосборов, нивелируясь при их увеличении.

Влияние **почвенного покрова** речного бассейна на сток зависит от водопропускных и водоудерживающих свойств почв, которые определяют процессы фильтрации и испарения воды, поступающей на водосбор в виде осадков. При изучении влияния почв прежде всего исследуют физико-механические и физико-химические характеристики почв, их структуру и характер сельскохозяйственной обработки.

Геологическое строение речного бассейна оказывает значительное влияние на величину поверхностного стока и грунтового питания реки, определяя условия накопления и расходования подземных вод. Наиболее важными факторами формирования стока являются литологический состав пород, характер их залегания и глубина водоупоров. Наличие мощных слоев хорошо водопроницаемых, рыхлых или трещиноватых пород, являющихся аккумуляторами влаги, обуславливает более равномерный сток и увеличение грунтового питания. В областях распространения закарстованных горных пород поверхностный сток обычно отсутствует. Атмосферные осадки, поглощенные карстовыми воронками и просочившиеся в трещины, существенно увеличивают запасы подземных вод, способствуя зарегулированности стока.

Непосредственное влияние **растительности** на сток сравнительно невелико. Растительный покров, увеличивая шероховатость земной поверхности, создает условия для лучшего просачивания воды в почву.

Важнейшая водоохранная **функция лесов** связана с их сглаживающим влиянием на внутригодовое распределение стока. Лес обеспечивает перевод части склонового стока в почвенный и грунтовый, что связано с очисткой воды от загрязняющих веществ в ходе фильтрации. Снежный покров на лесных территориях формируется со значительно большими запасами воды, чем на открытых пространствах, причем наиболее мощный – в лиственных лесах. Следует иметь в виду, что распространение лесов и сток в естественных условиях тесно связаны с климатом. Для малых водосборов при одинаковых размерах бассейнов, одинаковых климатических и геологических условиях с увеличением лесистости происходит уменьшение стока. Это связано с тем, что в лесных бассейнах влага попадает в речную сеть почти исключительно подземным путем. Малые реки, имеющие незначительную глубину вреза русла, обычно не получают подземного питания. По мере увеличения глубины эрозионного вреза на больших

водосборах большая часть просачивающихся вод попадает в речную сеть бассейна в связи с усилением дренирующей роли реки. Поэтому различия в стоке с увеличением площади водосборов безлесных и лесистых районов постепенно сглаживаются.

Влияние болот на сток, согласно многочисленным исследованиям, может быть как положительным, так и отрицательным. С одной стороны, благодаря большой влагоемкости болото способно аккумулировать значительный объем воды. Но вследствие малой водоотдачи торфа, а также низкого расположения болот накопленная вода тратится на испарение, особенно в теплое время года. Осушение болот способствует некоторому увеличению поверхностного стока и понижению уровня грунтовых вод.

Озера являются мощными регуляторами стока, способствуя растягиванию половодья и уменьшению максимальных расходов воды в период половодья и повышению стока в маловодные сезоны года. Регулирующая способность озер зависит от места их нахождения, оказывая больший регулирующей эффект при расположении в нижнем течении водотоков.

В последнее время всё более усиливается влияние **антропологических факторов**: *регулирование речного стока; снегозадержание; посадка лесополос; осушение болот; вырубка лесов и др.*

Естественные леса и искусственные лесонасаждения способствуют снегозадержанию, переводу поверхностного стока в подземный, а снегозадержание, строительство прудов, глубокая распашка почвы несколько уменьшают размеры годового стока.

1.3.2. Характеристики стока

Для характеристики речного стока в гидрологии применяются следующие понятия:

Расход воды Q – количество воды, проходящее через поперечное сечение реки (речной створ) в единицу времени, м³/с.

Объём стока W – количество воды, проходящее через речной створ за определённый промежуток времени, например, за год, месяц и т.д., млн м³/год, км³/год.

Слой стока y – количество воды, проходящее через речной створ за определённый промежуток времени, отнесённое к единице площади водосбора, мм.

Модуль стока M – количество воды, проходящее через речной створ за одну секунду, отнесённое к площади водосбора, л/(с·км²)

Коэффициент стока η – отношение высоты слоя стока к высоте выпавших за тот же период осадков:

$$\eta = \frac{y}{x}. \quad (1.2)$$

Средние значения годового стока за многолетний период, включающий несколько полных (не менее двух) циклов колебаний водности реки при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки, называют нормой стока. *Норма стока* – среднемноголетнее значение какой-либо характеристики стока, для её обозначения применяют индекс «0», например:

$$Q_0 = \frac{\sum Q_i}{n}, W_0 = \frac{\sum W_i}{n}. \quad (1.3)$$

Практически за норму гидрологических характеристик принимается среднее значение, определённое по ряду длительностью 40...60 лет. Норма стока является основной гидрологической характеристикой, которую используют при определении других характеристик стока, например годовых величин разной обеспеченности, сезонных и месячных величин стока и т.д. Норма стока имеет важное значение при проектировании гидротехнических сооружений, водохранилищ, систем водоснабжения и других видов водохозяйственной строительства.

Принято считать, что норма стока является устойчивой величиной, будучи обусловленной устойчивостью среднемноголетних осадков и испарения, т.е. средняя арифметическая величина стока, вычисленная за достаточно длительный период наблюдений, остаётся постоянной независимо от прибавления к многолетнему ряду новых членов.

Модульный коэффициент k – отношение характеристики стока к норме этой величины:

$$k = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{W_i}{W_0} = \frac{M_i}{M_0} = \frac{y_i}{y_0}. \quad (1.4)$$

Между характеристиками стока существуют следующие соотношения:
Годовой слой стока, мм:

$$y_{\text{год}} = 31,5 M_{\text{ср.год}} = \frac{31500 Q_{\text{ср.год}}}{F}, \quad (1.5)$$

где F – площадь водосбора, км.

Среднегодовой модуль стока, л/(скм²):

$$M_{\text{ср.год}} = 0,032 y_{\text{год}} = \frac{10^3 Q_{\text{ср.год}}}{F}. \quad (1.6)$$

Максимальным стоком (высоким стоком) называют объём или слой стока за время прохождения основной волны половодья или за период наибольшего дождевого паводка.

Минимальным стоком (низким стоком) называют наименьший сток рек, наблюдающийся в межень (летнюю или зимнюю).

1.3.3. Методы исследований и расчётов стока

Гидрологические расчеты являются одним из основных разделов инженерной гидрологии. Этот раздел как бы объединяет многие теоретические и экспериментальные исследования в области гидрологии с широкой инженерно-строительной и водохозяйственной практикой.

В **задачи гидрологических расчетов** как научной дисциплины входит разработка методов, позволяющих рассчитать величины различных характеристик гидрологического режима водотоков. При этом основную группу задач составляют расчеты стока воды: нормы годового стока, внутригодового распределения стока, максимальных расходов половодий и паводков, гидрографов половодий и паводков, минимальных расходов воды. При изучении гидрологического режима водотоков и определении расчетных характеристик стока используют **методы** гидрометрический, научных гидрологических обобщений, лабораторного и математического моделирования.

Гидрометрический метод определения гидрологических характеристик основан на статистической обработке рядов длительных гидрометрических наблюдений, проводимых на сети гидрометеорологических станций и постов. Он широко используется во многих странах с малыми территориями, где возможно создание густой сети наблюдений, охватывающих большую часть водотоков.

В условиях громадной территории нашей страны большее распространение при изучении режима и определении расчетных гидрологических характеристик стока получил **метод научных гидрологических обобщений**, при котором используют материалы наблюдений опорной сети гидрометеорологических станций и экспериментальных исследований региональных водно-балансовых (стоковых) станций. Основу метода составляют глубокий **генетический анализ среды**, в которой формируется сток, и анализ отдельных процессов и факторов, определяющих его качественные и количественные характеристики. В современных условиях генетический метод исследования гидрологических явлений тесно сочетается со **статистическим**, включающим в себя комплекс исследований, осуществляемых для выяснения вероятностных закономерностей, проявляющихся в гидрологических процессах. Совместное использование генетического и статистического методов в научных гидрологических обобщениях является принципиально наиболее перспективным путем решения задач гидрологических расчетов.

Решение многих задач статистической гидрологии было бы невозможно без использования электронно-вычислительных машин. Внедрение в практику гидрологических расчетов ЭВМ привело к широкому распространению метода *математического* (кроме лабораторного) *моделирова-*

ния гидрологических процессов, естественный ход которых заменяется разработанной теоретической моделью.

Таким образом, сочетание сетевых, полевых экспериментальных исследований, лабораторного и математического моделирования и экспедиционных обследований при широком применении методов математической статистики в научных гидрологических обобщениях позволяет глубже раскрывать сущность сложных процессов формирования речного стока и совершенствовать методы определения характеристик стока.

Методы теории вероятности и математической статистики широко применяют при исследовании гидрологических явлений и в особенности при расчетах характеристик речного стока.

Проектирование инженерных мероприятий, связанных с использованием водных ресурсов, требует количественной оценки параметров речного стока, изменяющихся во времени и в пространстве. Принимаемые для проектных разработок величины должны характеризовать сток используемого водного объекта в будущем периоде эксплуатации водохозяйственного предприятия, исчисляемом десятками и сотнями лет. Данные о возможных значениях в будущем расчетных параметров гидрологического режима можно получить путем экстраполяции зависимости стока от стокообразующих факторов, полученной по материалам непосредственных измерений стока за длительный период, опираясь на статистические закономерности, проявляющиеся в рядах гидрологических величин.

Применение статистических методов вытекает из физической сущности гидрологических явлений и процессов, представляющих собой результат действия большого числа факторов. При этом учесть в полной мере степень участия каждого фактора в формировании рассматриваемого явления не представляется возможным. Например, годовой сток формируется в зависимости от годового количества осадков и осадков предыдущих лет, температуры воздуха, запасов влаги в бассейне и др. Каждый из перечисленных факторов, в свою очередь, обусловлен общими процессами циркуляции атмосферы, радиационным балансом, температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра и т. д.

Математическое описание совокупности явлений, сформированных вследствие многофакторных связей, может быть выполнено лишь статистическими методами.

Возможность использования статистических закономерностей при расчетах характеристик гидрологического режима (максимальных, средних годовых и минимальных расходов воды, распределения стока внутри года, величины стока наносов, осадков и др.) опирается на положение о случайном характере формирования гидрологических рядов. Случайными считают какие-либо значения одной и той же величины, последовательность появления которых не связана с появлением предыдущих значений этой

величины. Принятие гипотезы о подчинении колебаний гидрологических величин закономерностям колебаний, свойственным случайным величинам, означает случайность появления данного явления только во времени, но не в его размерах. Величина конкретной гидрологической характеристики, сформировавшаяся на конкретном бассейне, обусловлена сочетаниями ряда факторов, действовавших в промежутке времени ее формирования.

1.3.4. Обеспеченность гидрологических характеристик

Колебания стоковых характеристик не являются функцией времени и не имеют определенных закономерностей, поэтому по имеющимся данным наблюдений за элементами гидрологического режима невозможно установить хронологический ход стока на будущий период. На современном этапе знаний предстоящий сток приходится описывать в виде вероятностно-количественной оценки, отвечающей той или иной *повторяемости* или *обеспеченности* исследуемой характеристики X_i .

Календарный ряд наблюдений за n лет располагают не в календарной последовательности, а в порядке убывания. Разность между наибольшим X_{\max} и наименьшим X_{\min} значениями в ряду убывания – **амплитуда** или варьирование величин в ряду. Обычно амплитуду колебаний делят на отдельные **интервалы** или градации, число которых обычно назначают в зависимости от объема рассматриваемого материала так, чтобы отразить типичные черты рассматриваемого ряда наблюдений. Для приближенной оценки **числа интервалов** используют эмпирические формулы, например $n_x \leq 5 \lg n$, где n_x – число интервалов, n – общее число наблюдений.

После назначения интервалов подсчитывается число попаданий случайной величины в каждый интервал, при этом сумма случаев по всем градациям равна общему числу лет наблюдений n .

Число величин в каждом интервале называют **абсолютной частотой**.

Выражая абсолютные частоты в процентах от общего числа случаев, получают **относительные частоты**. Сумма относительных частот равна 100 %.

Абсолютные и относительные частоты представляют собой **повторяемость** величин, попадающих в данный интервал.

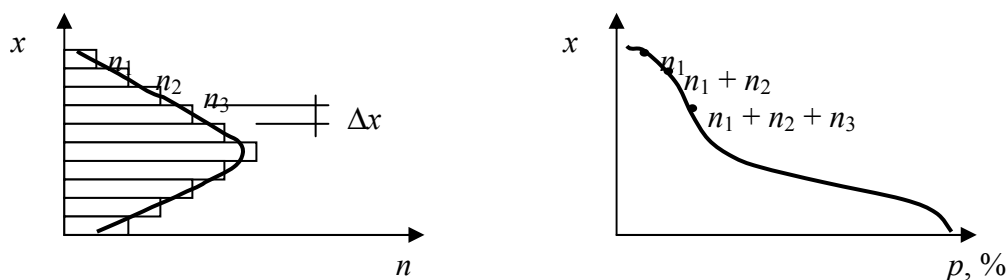


Рис. 1.2. Статистические кривые

Ступенчатый график – гистограмма распределения. При $\Delta x \rightarrow 0$, т.е. с увеличением интервалов, ступенчатая гистограмма превращается в плавную *кривую распределения вероятностей*, которую называют **кривой повторяемости**.

Последовательным суммированием относительных частот в пределах от наибольшего значения получают *суммарную (интегральную) кривую распределения вероятностей*, которую называют **кривой обеспеченности**.

Кривая обеспеченности – интегральная кривая, показывающая обеспеченность или вероятность превышения (в % или долях единицы) данной величины среди общей совокупности ряда:

$$P_{\%} = \frac{m}{n+1} 100, \quad (1.7)$$

где n – общее число лет наблюдений (количество членов ряда);

m – место гидрологической характеристики в вариационном ряду наблюдений.

1.3.5. Теоретические кривые распределения

Эмпирические (опытные) кривые распределения вероятностей, построенные по фактическим наблюдениям ограниченного числа лет, не дают возможности решать задачу за пределами этих наблюдений. Особенно слабо освещаются данными наблюдений верхний и нижний участки кривой, представляющие собой наибольшие и наименьшие значения гидрологической характеристики. Однако именно эти участки являются наиболее важными в расчётах характеристик стока, поэтому в гидрологических расчётах при решении практических задач в целях продления и сглаживания эмпирических кривых распределения применяют типовые математические кривые, наиболее полно отражающие характер изменчивости гидрологических характеристик.

Для аналитического описания кривой распределения гидрологических характеристик используют законы распределения случайных величин.

Для аналитического описания кривой распределения (повторяемости) гидрологических характеристик используют законы распределения случайных величин – симметричные и несимметричные кривые нормального распределения.

Формы кривой повторяемости в зависимости от особенностей формирования статистических совокупностей могут быть симметричными и асимметричными.

Параметрами симметричной кривой повторяемости являются среднее арифметическое значение переменной и среднее квадратичное отклонение (или коэффициент вариации). Среднее арифметическое переменной

величины представляет собой аналог понятия «норма стока», значение которой

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{i=n} (x_i / n), \quad (1.8)$$

где x_i – значения рассматриваемой величины ($I = 1, \dots, n$);
 n – число членов ряда.

Если члены ряда представлены в безразмерном виде, т.е. в модульных коэффициентах, то среднее арифметическое значение этого ряда равно единице.

Среднее квадратическое отклонение, или стандарт, при $n > 30$ рассчитывается по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (1.9)$$

а при $n < 30$ по формуле

$$\sigma_g = \sigma \sqrt{n / (n - 1)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (1.10)$$

Для сравнения степени изменчивости отдельных статистических рядов, например годовых стоков разных рек, удобно выразить среднее квадратическое отклонение в долях от среднего арифметического значения. Это отношение получило название *коэффициента вариации (изменчивости)*: $C_v = \sigma_x / \bar{x}$.

В гидрологических расчетах коэффициент вариации наиболее часто (при $n < 30$) вычисляют по формуле

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \bar{x}^2}. \quad (1.11)$$

Заменяя x_i / \bar{x} на модульный коэффициент K_i , получают значение коэффициента вариации в безразмерном виде:

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (K_i - 1)^2 / (n - 1)}. \quad (1.12)$$

Несимметричные кривые распределения ряда, свойственные рядам гидрологических характеристик, характеризуются тремя параметрами: средним арифметическим ряда, коэффициентом вариации и средним зна-

чением отклонений членов ряда от его среднего арифметического значения в кубе.

$$M_3 = \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^3 / (n-1). \quad (1.13)$$

В симметричных рядах разные по величине положительные и отрицательные отклонения повторяются одинаково часто. Третьи степени этих отклонений получаются с разными знаками и, взаимно уравновешиваясь, дают в сумме ноль.

Когда положительные отклонения (многоводные годы) повторяются реже, чем отрицательные (маловодные годы), а наиболее часто встречающееся значение переменной величины меньше среднего арифметического значения, говорят о положительной асимметрии. При обратном соотношении наблюдается отрицательная асимметрия. При положительной асимметрии положительные отклонения немногочисленны, но больше по величине в сравнении с более многочисленными, но менее значительными по величине отрицательными отклонениями, поэтому сумма кубов отклонений будет положительной. Для получения безразмерного выражения характеристики изменчивости ряда среднее значение кубов отклонений делят на куб среднего квадратического отклонения и получают **коэффициент асимметрии**

$$C_s = n \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^3 / [\sigma^3(n-1)(n-2)]. \quad (1.14)$$

Для безразмерного ряда получим

$$C_s = n \sum_{i=1}^{i=n} (K_i - 1)^3 / [C_v^3(n-1)(n-2)]. \quad (1.15)$$

*Характеризующие кривую распределения вероятности выражения для среднего арифметического значения, среднего квадратического отклонения и куба его среднего отклонения называют **моментами**.*

Моментами отдельных ординат кривой распределения называют произведения этих ординат на расстояние до той ординаты, относительно которой ведется исчисление. Моменты, определяемые относительно начала кривой распределения, называют начальными или нулевыми:

$$M_{01} = y_i x_i. \quad (1.16)$$

Моменты, определяемые относительно точки, соответствующей среднему арифметическому значению ряда или центра распределения, называют центральными:

$$M_{c1} = y_i (x_i - \bar{x}). \quad (1.17)$$

Принимая площадь кривой распределения или $\sum y_i$ за единицу, моменты случайной величины x_i можно записать в общем виде:

– начальный момент k -й степени или k -го порядка

$$M_{0k} = \sum x_i^k / n, \quad (1.18)$$

что представляет собой среднее значение x в k -й степени;

– центральный момент k -го порядка

$$M_{c,k} = 1/n \sum (x_i - \bar{x})^k, \quad (1.19)$$

что представляет собой среднее значение отклонений отдельных x_i от их средней величины \bar{x} в степени k .

Основные параметры кривой распределения вероятностей (\bar{x} , C_v и C_s) связаны с начальным моментом M_0 и центральным моментом M_c следующими равенствами:

1. Среднее арифметическое значение равно первому начальному моменту:

$$\bar{x} = M_{01}. \quad (1.20)$$

2. Среднее квадратическое отклонение равно квадратному корню из второго центрального момента:

$$\sigma = \sqrt{M_{c2}}. \quad (1.21)$$

3. Коэффициент вариации равен квадратному корню из второго центрального момента, деленному на значение первого начального момента:

$$C_v = \sigma / \bar{x} = \sqrt{M_{c2} / M_{01}}.$$

4. Коэффициент асимметрии равен третьему центральному моменту, деленному на второй центральный момент в степени 3/2:

$$C_s = M_{01} / \sigma^3 = M_{c3} / M_{c2}^{3/2} = M_{c3} / C_v^3. \quad (1.22)$$

Таким образом, $M_{01} = \bar{x}$ характеризует среднюю величину; $M_{c2} = \sigma^2$ – среднее квадратическое отклонение; $M_{c3} = C_s C_v^3$ – степень асимметричности.

Метод моментов лежит в основе выравнивания эмпирических кривых распределения, которое заключается в том, что эмпирическая кривая за-

меняется такой теоретической кривой, моменты площади которой равны моментам площади эмпирической кривой.

В практике гидрологических расчетов из множества математических кривых распределения наибольшее распространение получили *биномиальная кривая распределения* (кривая Пирсона III типа) и *кривые трехпараметрического гамма-распределения*, разработанные С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем.

Биномиальную кривую распределения и ее интегральное выражение с приемлемой практической точностью определяют тремя параметрами: \bar{x} , C_v и C_s . Их значения вычисляют непосредственно по материалам наблюдений, чаще всего методом моментов.

С целью практического применения кривой Пирсона III типа Фостер произвел приближенное интегрирование уравнения биномиальной кривой распределения для различных значений коэффициента асимметрии и представил результаты в виде таблицы. В 1938 г. таблица Фостера была уточнена С.И. Рыбкиным, затем расширена до более высоких значений коэффициентов асимметрии (до $C_s = 5,2$) сотрудниками ГГИ. В справочной литературе приводят отклонения $\Phi(c_s, P_{\%})$ от среднего значения ординат кривой обеспеченности $K_{p\%}$, выраженные в долях коэффициента C_v , т.е.

$$\Phi(c_s, P_{\%}) = \frac{K_{p\%} - 1}{c_v}. \quad (1.23)$$

Отсюда ордината кривой обеспеченности равна

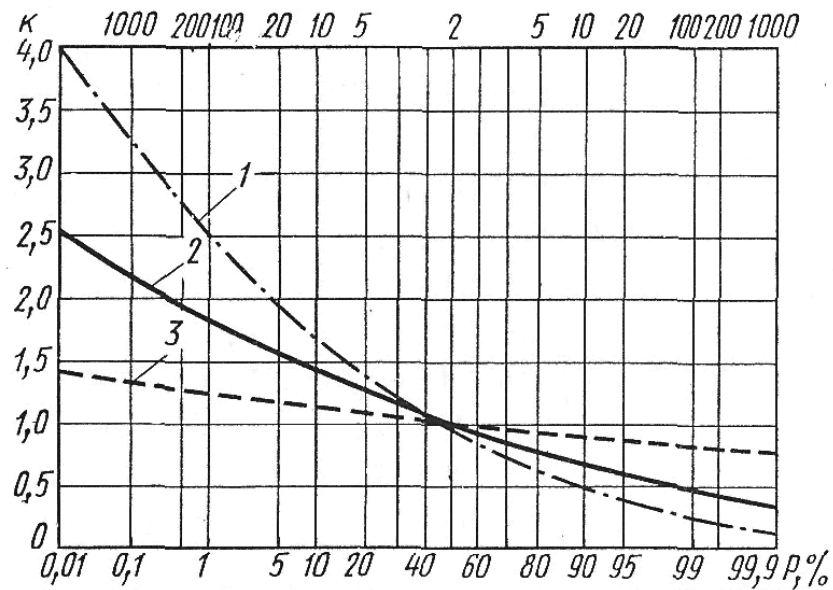
$$K_{p\%} = 1 + c_v \cdot \Phi(P_{\%}, c_s). \quad (1.24)$$

По выражению (1.24) находят ординаты $K_{p\%}$ для различных обеспеченностей $P_{\%}$, по которым можно построить теоретическую кривую обеспеченности.

Таким образом, найденные по материалам наблюдений коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s позволяют получить сглаженную кривую и экстраполировать данные наблюдений до заданных значений обеспеченностей.

Очертания теоретических биномиальных кривых распределения в интегральной форме (кривых обеспеченности) обусловлены параметрами C_v и C_s . На рис. 1.3,а приведены биномиальные кривые обеспеченности при одном и том же значении параметра коэффициента асимметрии $C_s = 2C_v$, но при различных значениях коэффициента вариации; на рис. 1.3,б приведены биномиальные кривые обеспеченности при одном и том же коэффициенте вариации $C_v = 0,5$, но при различных значениях коэффициента асимметрии.

а



б

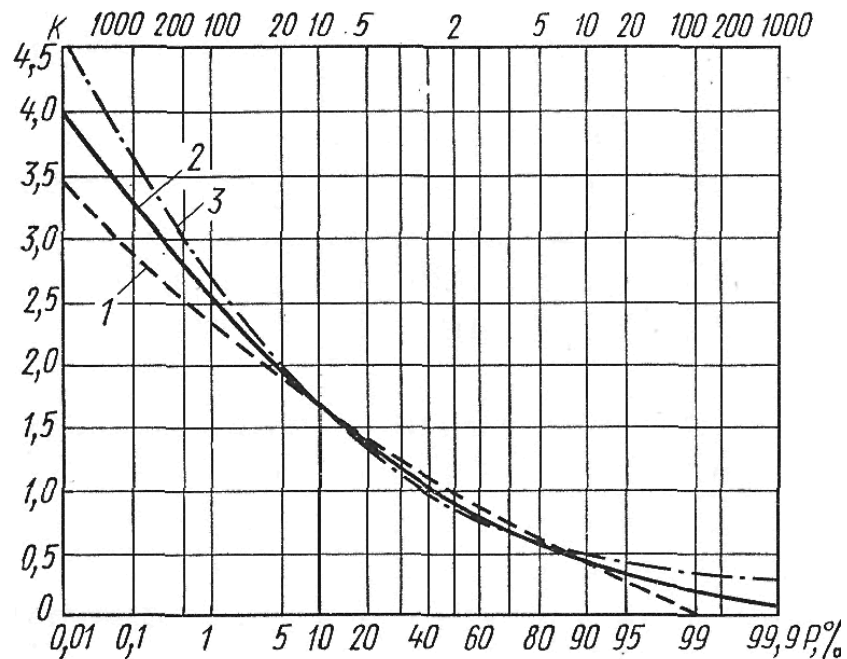


Рис. 1.3. Влияние параметров C_v , C_s на форму биномиальной кривой распределения:
 а) $C_s = 2C_v$: 1 - $C_v = 0,5$, 2 - $C_v = 0,3$, 3 - $C_v = 0,1$;
 б) $C_v = 0,5$: 1 - $C_s = 0,5$, 2 - $C_s = 1,0$, 3 - $C_s = 1,5$

Использование биномиальной кривой распределения Пирсона III типа, широко применявшейся в практике гидрологических расчетов, долгое время являлось почти единственным достаточно простым расчетным способом определения колебаний гидрологических характеристик. В то же время эта кривая имеет существенные недостатки: отсутствие верхнего предела и наличие ограниченного нижнего предела C_v . Если первый недостаток можно отнести к формальным, то второй недостаток является су-

ществленным. Биномиальная кривая распределения Пирсона III типа неприменима к расчету стока в случае $C_s < 2 C_v$.

Путем трансформации исходного уравнения биномиальной кривой Пирсона III типа С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем при $C_s = 2 C_v$ и $\bar{x} = 1$ было получено семейство кривых распределения при допущении, что некоторая функция x^b исследуемой величины подчиняется закону гамма-распределения. Уравнение этих кривых имеет вид

$$y = \left(\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\gamma/b} \frac{1}{\bar{x} |b| \Gamma(\gamma)} \left(\frac{x}{\bar{x}} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left\{ - \left[\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \cdot \frac{x}{\bar{x}} \right]^{1/6} \right\}, \quad (1.25)$$

где γ и b – параметры, связанные трансцендентными уравнениями с параметрами C_v и C_s ;

$\Gamma(\gamma)$ – гамма-функция;

x – исследуемая случайная величина;

\bar{x} – среднее значение x .

Кривые распределения, выраженные этими уравнениями, также могут быть определены тремя параметрами: x , C_v и C_s . Соответствующее им распределение носит название трехпараметрического гамма-распределения. Кривые трехпараметрического гамма-распределения могут быть применены при любом соотношении C_s и C_v . В случае $C_s = 2 C_v$ они совпадают с биномиальной кривой распределения. Все кривые трехпараметрического гамма-распределения выходят из начала координат. Параметры кривых обеспеченности С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля определяются теми же методами, что и параметры биномиальной кривой распределения.

Результаты интегрирования кривых трехпараметрического гамма-распределения, представленные в табличной форме, позволяют определить ординаты теоретической кривой обеспеченности $K_p \%$ в зависимости от C_v и соотношения C_v/C_s . Трехпараметрическое гамма-распределение отличается значительной гибкостью, имеет более широкий диапазон применения при расчетах стока, чем биномиальная асимметричная кривая распределения.

Для определения параметров теоретических кривых распределения (обеспеченности) гидрологических характеристик кроме метода моментов применяют *метод наибольшего правдоподобия и графоаналитический метод*.

Английский математик Фишер показал, что наилучшая точность оценки выборочных параметров при заданных эмпирических наблюдениях достигается методом наибольшего правдоподобия. Сущность метода заключается в том, что в качестве оценки искомого параметра применяется такое его значение, при котором произведение вероятностей наблюдаемых величин (так называемая функция правдоподобия) имеет наибольшее значение.

С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель, применив метод наибольшего правдоподобия к уравнению биномиальной кривой распределения, установили, что наилучшими оценками являются среднее арифметическое значение ряда \bar{x} и среднее значение логарифмов переменной величины x_i , выраженное в долях от \bar{x} .

При практическом использовании метода наибольшего правдоподобия среднее арифметическое значение переменной определяется по формуле (1.7), коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s находят по номограммам как функции статистик λ_2 и λ_3 , которые рассчитывают по выражениям

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^{i=n} \lg K_i / (n-1); \lambda_3 = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \lg K_i / (n-1). \quad (1.26)$$

Несомненным достоинством метода наибольшего правдоподобия является удобство при выполнении практических расчетов. Следует помнить, что метод наибольшего правдоподобия применяют только для трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Использование других типов распределения, например биномиальной кривой Пирсона III типа, при этом методе неправомерно.

Графоаналитический метод определения параметров кривой обеспеченности был разработан Г.А. Алексеевым в 1960 г. применительно к биномиальному закону распределения или биномиальным кривым обеспеченности при любом значении C_v . Метод заключается в определении параметров кривых распределения непосредственно по эмпирической кривой обеспеченности. При этом для решения задачи достаточно иметь совпадение теоретической и эмпирической кривых обеспеченности в трех точках. По ординатам эмпирической кривой обеспеченности в точках $x_{50\%}$ и равноудаленных от нее точках $x_{5\%}$ и $x_{95\%}$ рассчитывают *коэффициент скошенности* кривой S . Затем по таблице, составленной Г.А. Алексеевым, определяют значение коэффициента асимметрии C_s , после чего по таблице ординат биномиальной асимметричной кривой Фостера – Рыбкина находят относительные, или нормированные, отклонения ординат биномиальной кривой обеспеченности $\Phi_{5\%}$, $\Phi_{50\%}$ и $\Phi_{95\%}$.

Ординаты теоретической биномиальной кривой обеспеченности определяют по выражению (1.24). Заменяя

$$K_{p\%} = x_{p\%} / \bar{x} \text{ и } C_v = \sigma_x / \bar{x},$$

выражение (1.24) можно записать в виде

$$x_{p\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{\%}, C_s). \quad (1.27)$$

Исходя из условия совпадения теоретической кривой, выраженной уравнением (1.24), и эмпирической кривой в трех точках $x_{5\%}$, $x_{50\%}$ и $x_{95\%}$ можно записать три уравнения:

$$x_{5\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{5\%}, C_s); \quad (1.28)$$

$$x_{50\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{50\%}, C_s); \quad (1.29)$$

$$x_{95\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{95\%}, C_s), \quad (1.30)$$

где известны $x_{5\%}$, $x_{50\%}$ и $x_{95\%}$ и соответственно $\Phi_{5\%}$, $\Phi_{50\%}$ и $\Phi_{95\%}$.

Для определения σ_x вычитают из уравнения (1.28) уравнение (1.30):

$$\bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{5\%}, C_s) - \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{95\%}, C_s) = x_{5\%} - x_{95\%}$$

или

$$\sigma_x [\Phi(P_{5\%}, C_s) - \Phi(P_{95\%}, C_s)] = x_{5\%} - x_{95\%},$$

откуда

$$\sigma_x = (x_{5\%} - x_{95\%}) / (\Phi_{5\%} - \Phi_{95\%}). \quad (1.31)$$

Среднее арифметическое значение находят из уравнения (1.29):

$$\bar{x} = x_{50\%} - \sigma_x \Phi(P_{50\%}, C_s)$$

или

$$\bar{x} = x - \sigma_x \Phi_{50\%}. \quad (1.32)$$

На основании полученных значений σ_x и \bar{x} вычисляют коэффициент вариации $C_v = \sigma_x / \bar{x}$.

Графоаналитический метод определения параметров теоретической кривой обеспеченности менее трудоемкий, чем метод моментов и метод наибольшего правдоподобия. Преимуществом его является также отсутствие необходимости подбора такого неустойчивого параметра, как коэффициент асимметрии C_s . Однако точность параметров, установленных этим методом, зависит от обоснованности проведения сглаженной эмпирической кривой обеспеченности, с которой снимаются значения в трех опорных точках, что не лишено элемента субъективизма.

Кроме рассмотренных кривых распределения, широко применяющихся при расчетах гидрологических характеристик, в отечественной и зарубежной практике используют и другие кривые распределения (В.Д. Гудрича, Гумбеля, Г.Н. Бровковича и т.д.).

1.4. Гидрологические расчёты

1.4.1. Общие рекомендации

Расчетные гидрологические характеристики при проектировании гидротехнических сооружений, сооружений мелиоративных систем, систем водоснабжения, при планировке и застройке населенных пунктов, разработке генеральных планов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, мероприятий по борьбе с наводнениями и т. д. определяются в соответствии со специальным нормативным документом [29].

К расчетным гидрологическим характеристикам относятся характеристики годового стока (и его внутригодовое распределение), максимального снегового и дождевого стока, минимальных расходов воды и отметок уровней воды рек и озер. Эти характеристики устанавливаются непосредственно по опубликованным материалам гидрометрических наблюдений. При этом в качестве критерия при определении значения расчетной гидрологической характеристики принимается *ежегодная обеспеченность* этой величины, устанавливаемая нормативными документами.

Для непосредственных расчетов или общей оценки гидрологических характеристик исключительно большое значение имеет продолжительность гидрометрических наблюдений за режимом рек. Результаты этих наблюдений являются основой для определения будущего режима рек после постройки водохранилищ, плотин, мостов и других сооружений. Сначала характеристики стока определяются для естественного состояния рек, затем в них вносятся поправки, учитывающие изменения стока под влиянием того или иного вида хозяйственной деятельности в речном бассейне.

В зависимости от полноты информации о режиме рек встречаются три случая:

- наличие наблюдений за стоком за достаточно продолжительный период;
- недостаточность гидрометрических данных при коротком периоде наблюдений;
- полное отсутствие данных гидрометрических наблюдений.

При наличии данных гидрометрических наблюдений основой для расчета гидрологических характеристик являются теоретические кривые распределения ежегодных вероятностей превышения (обеспеченности). Согласно нормам [27], продолжительность ряда наблюдений считается достаточной для установления расчетных значений гидрологических характеристик заданных обеспеченностей, если рассматриваемый период является *репрезентативным* (представительным) и величина относительной

средней квадратической ошибки расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10 %.

Оценку репрезентативности ряда гидрометрических наблюдений за гидрологической характеристикой производят, если продолжительность наблюдений не превышает 50...60 лет. Это можно выполнить по разностным интегральным кривым гидрологической характеристики или сопоставлением кривых распределения той же характеристики по реке-аналогу с не менее чем 50-летним периодом наблюдений.

Оценка репрезентативности короткого ряда наблюдений исследуемой реки может быть также произведена путем приведения наблюдений этого ряда к более длительному периоду по наблюдениям на реках-аналогах. При этом используют данные многолетних наблюдений за стоком в разных пунктах рассматриваемого района и в качестве опорных принимают пункты с наиболее длительными, по возможности непрерывными и надежными наблюдениями, расположенные на реках, являющихся типичными для данного района по характеру колебаний стока. Данные по опорным пунктам с длительными рядами наблюдений приведены в материалах Водного кадастра (III серия «Водные ресурсы») и могут быть использованы для выбора расчетного репрезентативного периода наблюдений за стоком на изучаемой реке.

После установления расчетного периода и оценки его репрезентативности производят статистическую обработку ряда данных наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой.

Эмпирическую обеспеченность $P\%$ гидрологических характеристик определяют по формуле (1.7). Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности, как правило, применяют трехпараметрическое гамма-распределение при любом соотношении коэффициентов вариации C_v и асимметрии C_s или биномиальную кривую распределения при $C_s \geq 2C_v$.

Параметры теоретических кривых распределения – среднее многолетнее значение характеристики, коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s – устанавливаются по ряду гидрометрических наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методом моментов соответственно по формулам (1.8), (1.12) и (1.15).

При значениях коэффициента вариации $C_v > 0,5$ для трехпараметрического гамма-распределения используют метод наибольшего правдоподобия, определяя расчетные значения коэффициентов вариации и асимметрии по номограммам как функции статистик, рассчитанных по формуле (1.26). Для биномиального распределения при $C_v > 0,5$ возможно использование графоаналитического метода.

Ординаты теоретической кривой обеспеченности при использовании биномиальной кривой распределения находят по выражению (1.29).

При определении расчетных гидрологических характеристик, кроме материалов систематических гидрометрических наблюдений должны использоваться обоснованные данные о выдающихся значениях гидрологических характеристик, например максимальных расходах исследуемой реки. Сведения о них могут быть получены путем изучения меток высоких вод, опроса населения или из архивных источников.

При недостаточности гидрометрических данных в практике расчетов гидрологических характеристик различного обеспеченности приходится иметь дело с короткими рядами наблюдений, продолжительность которых не обеспечивает получения результата с требуемой точностью (ошибка 10 %). В этом случае производят приведение параметров кривых обеспеченности гидрологических характеристик (Q , H , K) к расчетному многолетнему периоду по **рекам-аналогам**, которые имеют длинный ряд наблюдений, обеспечивающий необходимую точность, и колебания расчетных характеристик, соответствующие колебаниям их в расчетном створе изучаемой реки.

При выборе рек-аналогов необходимо выполнение следующих условий:

- наибольшая географическая близость расположения водосборов;
- площади водосборов не должны различаться более чем в 10 раз, а их средние высотные положения (для горных рек) – более чем на 300 м;
- сходство климатических условий;
- однородность условий формирования стока;
- однородность почв (грунтов) и гидрогеологических условий;
- по возможности близкие степени озерности, залесенности, заболоченности и распаханности;
- отсутствие факторов, существенно изменяющих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы, изъятия на орошение, водоснабжение и другие нужды).

Приведение параметров кривых обеспеченности рассматриваемой гидрологической характеристики стока к многолетнему периоду осуществляется аналитическим, графическим и графоаналитическим способами.

Аналитический способ приведения гидрологических характеристик, например среднего годового стока, к многолетнему периоду наблюдений заключается в установлении корреляционной связи между средним годовым стоком в неизученном бассейне и изученном бассейне-аналоге.

Среднее многолетнее значение \bar{Q} определяют по выражению

$$\bar{Q} = \bar{Q}_n + R(\sigma_n / \sigma_{n,a})(\bar{Q}_a - \bar{Q}_{n,a}), \quad (1.33)$$

где \bar{Q}, \bar{Q}_a – средние многолетние величины годового стока за N' лет наблюдений, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

$\bar{Q}_n, \bar{Q}_{n,a}$ – средние арифметические величины стока за период совместных наблюдений за n лет, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

$\sigma_n, \sigma_{n'a}$ – средние квадратические отклонения годового стока за совместный период n' лет, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

R – коэффициент корреляции между величинами среднего годового стока исследуемой реки и реки-аналога.

Коэффициент вариации при $R \geq 0,8$

$$C_{vN'} = (\sigma_{N'} / \bar{Q}) \sqrt{1 - R^2(1 - \sigma_{n'a}^2 / \sigma_{N'a}^2)}, \quad (1.34)$$

где $\sigma_{N'a}$ – среднее квадратическое отклонение годового стока за N' -летний период для реки-аналога.

Аналогичные формулы используют и для определения других гидрологических характеристик.

Графический способ приведения короткого ряда к многолетнему периоду наблюдений применяют при наличии прямолинейной зависимости $\bar{Q} = k_a \bar{Q}_a$. Коэффициент вариации для исследуемой реки при этом находят по формуле

$$C_v = k_a Q_a C_{v,a} / \bar{Q}, \quad (1.35)$$

где k_a – угловой коэффициент прямой связи;

$\bar{Q}_a, C_{v,a}$ – норма стока и коэффициент вариации для реки-аналога, определяемые по многолетнему ряду наблюдений;

\bar{Q} – норма стока в неизученном бассейне, определяемая по графику связи.

Изложенные способы приведения параметров кривых распределения к многолетнему периоду применимы в обработке данных исследуемой реки и реки-аналога при наличии короткого периода совместных наблюдений.

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений характеристики стока определяют по картам изолиний рассматриваемой характеристики, если таковые имеются, или по эмпирическим формулам, которые в явной или неявной форме учитывают зависимость искомых характеристик от основных физико-географических факторов стока.

1.4.2. Особенности расчёта годового стока и его внутригодового распределения

Основой для определения расчетных значений годового стока воды являются среднегодовые расходы воды в исследуемом створе. При отсутствии данных наблюдений норму стока определяют по картам изолиний среднего многолетнего годового стока рек $[(\text{л/с}) \text{ км}^2]$ или прямолинейной интерполяцией нормы стока между опорными пунктами с известными значениями среднего многолетнего стока. Определение нормы стока по карте изолиний основано на допущении плавного изменения среднемноголетнего стока по территории в зависимости от зонального изменения физико-географических факторов стока. Карты изолиний нормы стока составлены для рек с площадями водосборов до 50 тыс. км^2 , но при отсутствии резких изменений в рельефе и климатических условиях их можно использовать и для рек с большими площадями водосборов.

Коэффициент вариации C_v определяют по карте изолиний так же, как по карте нормы стока. Карта коэффициентов вариации C_v рекомендована для равнинных рек с площадью водосбора от 1000 до 50000 км^2 при отсутствии озер или при озерности, не превышающей 3 % от площади водосбора.

При коротких рядах наблюдений или при полном их отсутствии коэффициент асимметрии C_s находят по отношению этого параметра к коэффициенту вариации C_v по реке-аналогу.

При отсутствии надежных аналогов расчетное значение отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v определяют по [11].

В практике гидрологических расчетов очень часто возникает необходимость определения не только годового стока, но и распределения последнего внутригодового интервала времени.

Внутригодовое распределение стока в зависимости от задач водохозяйственного проектирования может быть представлено в виде хронологического изменения расходов по месяцам или сезонам или в порядке убывания расходов воды. В первом случае внутригодовое распределение стока воды при наличии данных гидрометрических наблюдений за период не менее 15... 20 лет проводится или методом компоновки сезонов, или методом характерного реального года.

Метод компоновки сезонов – основной способ расчета календарного внутригодового распределения стока. По методу компоновки рассматриваются межсезонное и внутрисезонное распределения стока.

Для исследований и расчета межсезонного распределения стока каждый год делится на два основных периода: паводочный (многоводный) и меженный (маловодный). Для практических задач проектирования маловодный период в свою очередь делится на два сезона. Всего в году должно

быть не более трех сезонов. Период года и сезон, когда естественный сток может ограничивать потребление, принимают за лимитирующие, так как в этот период года и сезон создаются неблагоприятные условия работы водохозяйственных предприятий. Так, для рек с весенним половодьем за лимитирующий период принимаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний. При преобладающем водопотреблении на сельскохозяйственные нужды (орошение, обводнение) за лимитирующий сезон принимается летне-осенний, для энергетики и водоснабжения – зимний.

Расчеты внутригодового распределения стока при выделении сезонов ведут обычно не по календарным годам, а по водохозяйственным, принимая за начало водохозяйственного года многоводный период (для Среднего Поволжья – март). Границы сезонов назначаются одинаковыми для всех лет с округлением их до целого месяца. Длительность многоводного периода устанавливается так, чтобы в его границы помещались половодья всех лет, как с наиболее ранним сроком его наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания.

Назначив границы периодов и сезонов, определяют сток за отдельные периоды и сезоны каждого года путем суммирования средних месячных расходов.

По значениям годового стока и стока за отдельные периоды и сезоны каждого года наблюдений строят эмпирические кривые обеспеченности. Статистические параметры \bar{x} и C_v вычисляют непосредственно по полученным рядам. Третий параметр теоретической кривой обеспеченности – коэффициент асимметрии C_s – лучше подбирать по данным рек-аналогов, расположенных в гидрологически однородном районе.

Далее при установленных параметрах теоретической кривой обеспеченности вычисляют значения стока одной и той же заданной обеспеченности за год, лимитирующий период и (внутри него) лимитирующий сезон. Сток нелимитирующего периода определяют по разности между стоком за год и лимитирующий период, а сток за нелимитирующий сезон, входящий и лимитирующий период, вычисляют по разности между стоком этого периода и лимитирующего сезона.

Внутрисезонное распределение стока зависит от водности сезона. Распределение стока по месяцам устанавливают приближенно. Принимают три градации водности рассматриваемого сезона: многоводную, включающую годы с обеспеченностью стока за сезон менее 33 %, среднюю по водности с обеспеченностью от 33 до 66 % и маловодную с обеспеченностью более 66 %.

Для межсезонных периодов распределение стока внутри сезонов рассчитывают по месячным интервалам времени; в период половодья интервалы времени уменьшают до декады ввиду значительной внутримесячной неравномерности стока.

Изложенный метод В.Г. Андреенова применяют при наличии данных наблюдений не менее чем за 10 лет при условии включения в него мало-водных, многоводных и средних по водности лет.

Более простым методом расчета внутригодового распределения стока рек, представленного по годам в календарной последовательности, является метод характерного реального года. За расчетную модель принимают фактический гидрограф, у которого обеспеченность годового стока, лимитирующего периода и сезона близка к заданной обеспеченности. Реальный гидрограф, соответствующий поставленному условию, выбирают путем анализа эмпирических кривых обеспеченности значений годового стока и стока лимитирующего периода. Для этого гидрографа определяется процентное помесечное распределение стока. В соответствии с процентным распределением стока в реальном году распределяется по месяцам расчетный годовой сток, найденный по кривой обеспеченности. Полученное таким образом реальное распределение стока служит расчетной моделью.

При отсутствии или недостаточности данных наблюдений расчет внутригодового распределения стока ведут по методу гидрологической аналогии.

1.4.3. Особенности расчёта максимального стока

Максимальным стоком называют сток весенних половодий или дождевых паводков. В гидрологической практике это понятие отождествляют с объемом или слоем стока за основную волну половодья или за наибольший дождевой паводок. Максимальным расчетным расходом называют расход, на пропуск которого рассчитывают водопропускные и водосбросные отверстия гидротехнических сооружений, мостовые отверстия и т.д. Занижение максимального расчетного расхода приводит к переполнению водохранилищ и разрушению сооружений, что влечет за собой значительный материальный ущерб. В случае заселенности местности, расположенной ниже сооружения, выбор максимального расчетного расхода выходит за пределы экономических соображений и перерастает в социальную проблему, связанную с безопасностью людей. Завышение расчетного максимального расхода удорожает стоимость сооружения, что снижает его экономическую эффективность.

Расчетная ежегодная вероятность превышения (обеспеченность) максимальных расчетных расходов устанавливается нормативными документами [27], которые определяют ее в зависимости от рода сооружения, их класса и условий эксплуатации: постоянные сооружения делятся на четыре класса; I, II, III и IV; для них принимаются соответственно обеспеченности 0,01, 0,1, 0,5 и 1,0 %.

Максимальные расходы разделяют по их происхождению на *максимумы, формирующиеся от снеготаяния* (с учетом возможной составляющей от дождя), *максимумы, формирующиеся от дождей* (с учетом возможной составляющей от снеготаяния), *максимумы смешанные*, которые рассчитывают раздельно.

При наличии данных гидрометрических наблюдений по максимальному стоку за достаточно длительный период наблюдений расчетные максимальные расходы талых и дождевых вод определяют по теоретической кривой обеспеченности. Оценка продолжительности имеющегося ряда наблюдений, достаточного для проведения расчетов, может быть произведена по приближенной зависимости

$$N_{\min} \approx 1/(P_{\%} K_{C_v}), \quad (1.36)$$

где N_{\min} – минимальная длина ряда, годы;

$P_{\%}$ – вероятность превышения (в долях единицы) вычисляемого расхода воды;

$K_{C_v} = 2...3$ в зависимости от коэффициента вариации ($K_{C_v} = 2$ для малых коэффициентов вариации $C_v < 0,5$ и $K_{C_v} = 3$ для больших коэффициентов вариации $C_v > 0,5$).

Если продолжительность наблюдений за максимальными расходами меньше рассчитанной по формуле (1.36), то следует осуществлять приведение параметров распределения к многолетнему периоду.

При недостаточности исходного ряда производят приведение к многолетнему периоду наблюдений с использованием при определении средне-многолетнего максимального расхода и коэффициента вариации метода корреляции. Коэффициент асимметрии C_s устанавливают по данным рек-аналогов. При отсутствии надежных аналогов соотношение коэффициентов асимметрии C_s и вариации C_v и зависимости от происхождения максимальных расходов принимают:

- для расходов талых вод равнинных рек $C_s = (2...2,5)C_v$;
- для дождевых расходов равнинных рек и горных рек с муссонным климатом $C_s = (3...4)C_v$;
- для расходов воды горных рек $C_s = 4C_v$.

При проектировании сооружений первого класса, разрушение которых угрожает катастрофическими наводнениями, водопропускные отверстия рассчитывают на пропуск расхода Q'_p %, полученного прибавлением к максимальному расчетному расходу обеспеченностью $P_{\%} = 0,01$ %, определенному по кривой обеспеченности гарантийной поправки:

$$Q'_p \% = Q_p \% + \Delta Q_p \%. \quad (1.37)$$

Гарантийную поправку назначают для учета возможности совпадения периода наблюдений за максимальным стоком реки с относительно низки-

ми половодьями и паводками. Ее значение пропорционально средней квадратической ошибке вычисленного максимального расхода воды:

$$\Delta Q_{P\%} = \frac{a E_{P\%}}{\sqrt{n_b}} Q_{P\%}, \quad (1.38)$$

где a – коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность реки ($a = 1,0$ для изученных рек, $a = 1,5$ для слабоизученных);

$E_{P\%}$ – случайная средняя квадратическая ошибка расчетного расхода воды $P\% = 0,01\%$ [11];

n_b – число лет наблюдений с учетом приведения к многолетнему периоду.

Гарантийная поправка не должна превышать 20 % от расчетного максимального расхода $Q_{P\%}$.

При отсутствии гидрометрических данных максимальные расходы весеннего половодья на реках с площадью водосбора до 20000 км² в европейской части и площадями водосбора до 50000 км² в азиатской части РФ определяют по эмпирическим формулам.

Расчетный максимальный расход воды талых вод на равнинных и горных реках определяют по следующей формуле [29]

$$Q_{P\%} = [K_0 h_{P\%} \mu' \delta \delta_1 \delta_2 / (A + A_1)^{n_1}] A, \quad (1.39)$$

где K_0 – параметр дружности половодья, определяемый по данным рек-аналогов обратным путем по формуле (1.39);

$h_{P\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока (с учетом грунтового питания), мм, обеспеченностью $P\%$, определяемый в зависимости от коэффициента вариации C_v и отношения C_s/C_v для этой величины, а также среднемноголетнего слоя стока h , устанавливаемого по рекам-аналогам или интерполяцией по карте среднемноголетнего стока половодья;

μ' – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов (значения коэффициента μ' приведены в табл. 1.1);

δ – коэффициент, учитывающий регулирующее влияние водохранилищ, прудов и проточных озер;

δ_1 – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных бассейнах;

δ_2 – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в заболоченных бассейнах;

A_1 – дополнительная площадь водосбора, учитывающая снижение редукации (уменьшения), км²;

n_1 – показатель степени редукации;

A – площадь водосбора до замыкающего створа, км².

Значения A_1 и n_1 приведены в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1 . 1

Значение коэффициента μ'

Природная зона	Значение μ' при обеспеченности расхода								
	0,1	1	3	5	10	25	50	75	95
Тундра и лесная зона	1,02	1,0	0,97	0,96	0,93	0,90	0,86	0,82	0,82
Лесостепная	1,04	1,0	0,96	0,93	0,89	0,80	0,72	0,64	0,58
Степная	1,04	1,0	0,97	0,96	0,93	0,88	0,79	0,64	0,42
Зона степей и полупустынь	1,02	1,0	0,98	0,97	0,96	0,92	0,80	0,70	0,50

Т а б л и ц а 1 . 2

Значение показателя степени редукции n_1 и дополнительной площади водосбора, учитывающей снижение редукции

Природная зона	Для равнинных рек	
	n_1	A_1
Зона тундры и лесная зона (европейская территория РФ, Западная и Восточная Сибирь)	0,17	1
Лесостепная зона (европейская территория РФ и Западная Сибирь)	0,25	2
Степная зона, зона засушливых степей и полупустынь (европейская территория РФ и Западная Сибирь)	0,35	10

Регулирующее влияние проточных озер учитывается коэффициентом

$$\delta = (1 + c_l A_l)^{-1}, \quad (1.40)$$

где c_l – коэффициент, изменяющийся от 0,2 при $h \geq 100$ мм до $c_l = 0,4$ при $h \leq 20$ мм;

A_l – средневзвешенная озерность, %, определяемая по формуле

$$A_l = \sum_{i=1}^{i=n} (100 S_l A_{i,l} / A); \quad (1.41)$$

здесь S_l – площадь зеркала озера, км²;

$A_{i,l}$ – площадь водосбора озера, км².

При наличии в бассейне озер, расположенных вне главного русла и основных притоков, коэффициент δ следует принимать $\delta = 1$ при $A_l < 2$ %, $\delta = 0,8$ при $A_l > 2$ %. Коэффициент δ , учитывающий снижение максимального расхода воды рек, зарегулированных водохранилищами, находят с учетом проектных материалов, освещающих режим пропуска воды верхними водохранилищами.

Коэффициент δ_1 определяют по формуле

$$\delta_1 = \alpha_1 / (A_v + 1)^{n_2}, \quad (1.42)$$

где $\alpha_1 = 0,7 \dots 1,4$ – коэффициент, зависящий от природной зоны и расположения леса на водосборе (равномерного в верхней или нижней части водосбора);

$n_2 = 0,1 \dots 0,22$ – коэффициент, зависящий от почвогрунтов под лесом;
 A_v – залесенность водосбора, %.

Коэффициент δ_2 находят по выражению

$$\delta_2 = 1 - \beta \lg(0,1A_s + 1), \quad (1.43)$$

где β – коэффициент, зависящий от типа болот ($\beta = 0,8$ для низинных болот, $\beta = 0,3$ – для верховых);

A_s – относительная площадь болот и заболоченных лесов и лугов в бассейне, %.

При заболоченности менее 3 % или при проточной относительной озерности более 20 % $\delta_2 = 1$. Для горных рек коэффициенты $\delta_1 = \delta_2 = 1$.

При определении максимальных расходов воды Q_p % ($\text{м}^3/\text{с}$) от дождевых паводков для больших и средних рек рекомендуется использовать эмпирическую формулу, учитывающую лишь главные факторы формирования максимального стока и выведенную в результате статистической обработки данных по дождевому стоку изученных рек:

$$Q_p \% = q_{200} (200/A)^{N_3} \delta_1 \delta_2 \delta_3 \lambda_p \% A, \quad (1.44)$$

где q_{200} – модуль максимального мгновенного расхода воды обеспеченностью $P = 1$ % при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$, приведенный к площади водосбора, равной 200 км^2 ;

λ_p % – переходный коэффициент от обеспеченности $P = 1$ % к другой обеспеченности;

δ_3 – коэффициент, учитывающий зависимость параметра q_{200} от средней высоты водосбора в горных районах, определяемый по данным гидрологически изученных рек.

Для малых рек, слабо изученных в гидрологическом отношении, целесообразнее использовать формулы, отражающие определенные теоретические представления о процессах формирования стока на склонах водосборов и в руслах рек.

1.4.4. Особенности расчёта минимального стока

Минимальный сток формируется в межень, когда вследствие полного или частичного прекращения поверхностного стока река переходит на грунтовое питание. Различают следующие характеристики минимальных

расходов воды: суточные и среднемесячные, определяемые отдельно для зимнего и летне-осеннего периодов.

Определение минимальных расходов воды связано с необходимостью обеспечения бесперебойного водоснабжения, орошения, обводнения и т. д. Все виды водохозяйственной деятельности прежде всего сказываются на величине минимального стока. Сведения о минимальных расходах необходимы как при оценке естественного стока рек, так и при определении степени хозяйственного воздействия на речной сток (например, при сбросах очищенных сточных вод в водные объекты).

При проектировании водохозяйственных сооружений минимальный расчетный расход определяют в зависимости от принадлежности объекта к той или иной отрасли народного хозяйства главным образом в диапазоне обеспеченностей 75...97 %.

Для определения минимального расчетного расхода используют данные наблюдений за стоком в зимний и летне-осенний периоды. Основными расчетными характеристиками минимального стока являются *минимальный среднесуточный расход*, *минимальный средний месячный расход* за календарный месяц или за 30 суток с наименьшими расходами воды. Минимальный средний месячный расход используют в случае продолжительной и устойчивой межени (не менее 2 месяцев) при условии отсутствия в течение этого времени паводков. Если меженный период короткий или прерывистый (состоит из нескольких периодов, разделенных паводками), то вместо среднего месячного расхода воды используют средний расход за 30 суток (не календарный месяц) с наименьшим стоком в данном сезоне.

При наличии данных гидрометрических наблюдений минимальный расчетный расход определяют по теоретической кривой обеспеченности, рассчитанной по данным наблюдений. При недостаточной длине ряда наблюдений производят его удлинение методом аналогии.

Расчет минимальных расходов воды для неизученных рек производят на основе обобщенных зависимостей для нормы минимального стока и коэффициентов вариации и асимметрии, полученных по данным для изученных рек, или путем использования переходных коэффициентов от минимального стока определенной (фиксированной) обеспеченности к стоку искомой обеспеченности. За минимальный сток фиксированной обеспеченности принят [29] минимальный 30-суточный расход обеспеченностью $P = 80 \%$.

Для больших и средних рек минимальные 30-суточные расходы воды $Q_{80\%}$, м³/с, в зимний и летне-осенний периоды определяют для центра тяжести речного бассейна по картам изолиний.

Минимальные расходы расчетной обеспеченности (за 30 сут) определяют по формуле

$$Q_p \% = Q_{80 \%} \lambda_p \% \quad (1.45)$$

где $\lambda_p \%$ – переходный коэффициент от расхода фиксированной 80 %-й обеспеченности к расходу расчетной обеспеченности.

Вопросы для самопроверки

Речная система

1. Какие водные объекты суши вы знаете?
2. Из каких элементов состоит речная система?
3. Что такое исток и устье реки?
4. Какие вы знаете основные формы сопряжения речных потоков с морем?
5. Что собой представляет «динамическая ось потока»?
6. Как называется линия, соединяющая точки с наибольшей поверхностной скоростью течения в живых сечениях потока?

Общие сведения о реках

7. Какие характеристики бассейнов относятся к физико-географическим характеристикам?
8. Какие характеристики бассейнов относятся к морфометрическим характеристикам бассейнов?
9. Каким образом формируется речная долина?
10. Что такое русло реки? В чём его главное отличие от поймы?
11. Что представляют собой меандры?
12. Как называют линии равных глубин?
13. Как называется форма донного рельефа, сложенная наносами в виде широкой гряды, пересекающая русло под углом к общему направлению течения, вызывающая отклонение его от одного берега к другому?
14. Какие виды питания рек вы знаете? Что служит основанием причисления питания реки к определённому типу?
15. Как называются характерные состояния водного режима реки, повторяющиеся в определённые гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания ?
16. Что называют половодьем на реке? В чем его причины?
17. Как называется фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным, кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей?
18. Чем характеризуется такая фаза водного режима реки, как межень?
19. Перечислите ледовые явления, предшествующие периоду ледостава?

Речной сток

20. Какие группы основных факторов, влияющих на речной сток, вы знаете?

21. Какие факторы, влияющие на речной сток, относятся к климатическим?

22. Какие факторы, влияющие на речной сток, относятся к географическим?

23. Что обеспечивает перевод части склонового стока в почвенный и грунтовый?

24. К какой группе факторов относится регулирование речного стока; снегозадержание; посадка лесополос; осушение болот; вырубка лесов?

25. Какие понятия применяют для характеристики речного стока в гидрологии?

26. Как называют средние значения годового стока за многолетний период, включающий несколько полных (не менее двух) циклов колебаний водности реки при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки?

27. Что называют модулем стока?

28. Какие методы используют при изучении гидрологического режима водотоков и определении расчетных характеристик стока?

29. На чём основан метод научных гидрологических обобщений?

30. Как называется метод изучения гидрологического режима водотоков и определения расчетных характеристик стока, включающим в себя выяснение вероятностных закономерностей?

31. Какие показатели характеризуют кривую распределения вероятности?

32. Какие характеристики годового стока (и его внутригодового распределения) относятся расчетным гидрологическим характеристикам?

33. При каких условиях продолжительность ряда наблюдений считается достаточной для установления расчетных значений гидрологических характеристик заданных обеспеченностей?

34. Какой метод используют при недостаточности гидрометрических данных для приведения к расчетному многолетнему периоду параметров кривых обеспеченности гидрологических характеристик (Q , H , K)?

35. Какие условия следует соблюдать при выборе рек-аналогов?

36. Когда формируется максимальный сток? Чем он обусловлен?

37. При расчётах каких сооружений необходимы максимальные расходы?

38. Когда формируется минимальный сток?

39. Для решения каких задач водного хозяйства необходимы минимальные расходы водотоков?

40. Какие основные расчетные характеристики минимального стока вы знаете? За какой период они определяются?

2. ГИДРОМЕТРИЯ

2.1. Общие положения

Гидрометрия является разделом более общей науки – гидрологии, и в ее задачи входят разработка приборов и методов количественного определения различных характеристик и систематическое изучение гидрологического режима водных объектов. Гидрометрические измерения служат для получения многолетних рядов наблюдений за уровнями, скоростями течений, элементами волн, расходами и стоком воды и наносов, температурным режимом, распределением плотности, химическим составом воды, ледовыми явлениями и т.д.

Данные по гидрологическому режиму водных объектов необходимы для проектирования гидротехнических сооружений различного назначения (транспортных, энергетических, водозаборных и др.), планирования водопотребления, создания базы для научных обобщений. Получила развитие инженерная гидрометрия, в задачу которой входит организация наблюдений за режимом водных объектов при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, влияющих на естественный режим водоемов.

Гидрометрия подразделяется на гидрометрию атмосферных вод, гидрометрию океанов и морей, озер и водохранилищ, гидрометрию рек, подземных вод и т.д. Несмотря на определенную специфику, связанную с объектом изучения, в приемах и способах изучения характеристик рек и морей (водохранилищ и озер) есть достаточно много общего, поэтому в дальнейшем излагаются главным образом разделы речной гидрометрии.

Как правило, гидрометрические наблюдения, как на реках, так и на морях, совмещаются с метеорологическими наблюдениями.

Для изучения гидрометеорологических явлений создана постоянная и временная государственная сеть станций и постов, проводятся экспедиционные работы. Государственная гидрометеорологическая сеть состоит из основных (или опорных) и специальных станций и постов.

На основных станциях и постах ведутся постоянные наблюдения за гидрометеорологическими и атмосферными процессами в течение длительного времени, иногда бессрочно. Специальные станции и посты организуются на определенный период для изучения местных условий, например гидрометеорологического режима водохранилищ и озер, устьевых участков реки и прилегающего взморья и др.

Государственная гидрометеорологическая сеть станций и постов находится в ведении Государственного комитета по гидрометеорологии на су-

ше и на воде. Кроме государственной гидрометеорологической сети станций и постов, существуют станции и посты различных ведомств (Минречфлот, Минморфлот, Минсельхоз, Минводхоз и др.).

В состав основных гидрометеорологических работ на реках и водоемах входят:

- наблюдения за уровнем и его колебаниями;
- промерные работы для изучения глубин и рельефа дна водных объектов;
- наблюдения за уклонами водной поверхности (на реках);
- наблюдения за температурой воды, замерзанием и вскрытием водоемов, состоянием ледяного покрова;
- измерение скоростей и направлений течений;
- наблюдение за цветом, прозрачностью, плотностью и химическим составом воды;
- измерение параметров волнения;
- определение расхода и стока воды и наносов;
- определение механического и петрографического состава наносов и донных отложений.

Данные гидрометеорологических наблюдений со всех станций и постов сосредоточиваются в Гидрометцентре страны, обрабатываются, анализируются и служат для решения различных научно-теоретических и хозяйственных проблем.

2.2. Измерение уровней

Высотное положение поверхности воды в данной точке относительно условной горизонтальной неизменной по высоте плоскости отсчета называется **уровнем воды**. Наблюдения над уровнем обычно ведут длительное время, поэтому условную плоскость помещают на 0,5...1,0 м ниже наинизшего возможного положения уровня (в водохранилищах – с учетом сработки, в морях – с учетом приливно-отливных и сгонно-нагонных колебаний), с тем, чтобы отсчеты уровня были всегда положительными. Эта плоскость принимается за нуль отсчетов и называется **нулем графика водомерного поста**. Основные отсчеты положения уровня на реках в обычных условиях снимаются дважды в сутки – в 8 и 20 часов. В экстремальных условиях интервалы времени между сроками наблюдения сокращаются. Например, в период половодья и паводков на реках назначаются дополнительные сроки через 2, 4 и 6 часов. Данные, полученные в сроки наблюдений, называются срочными; срочный максимальный уро-

вень может отличаться от мгновенного максимального уровня, который может быть между сроками наблюдения.

Место, оборудованное для наблюдения за уровнем, называют **водомерным постом**. Водомерные посты в зависимости от срока их действия могут быть постоянными и временными. По своей конструкции водомерные посты могут быть простыми (речные, свайные и свайно-речные) и передаточными. Передаточные посты делятся на посты

- с неавтоматическими и автоматическими отметчиками уровня воды;
- с непрерывной регистрацией положения уровня, т.е. с использованием самописцев, получивших название лимниграфов и мареографов, соответственно при измерениях на реках и на морях;
- с дистанционными устройствами, что позволяет вести регистрацию уровня на значительном расстоянии от водного объекта и осуществлять работу водомерного поста в автоматическом режиме.

Высотное положение измерительных устройств водомерного поста требует систематического контроля, поэтому водомерный пост оборудуют основными и контрольными реперами. Реперы устанавливают в непосредственной близости от водомерного поста вне зоны затопления.

Речный пост представляет собой рейку, укрепленную на сооружениях (мостах, гидротехнических сооружениях и т.д.) в вертикальном положении, с ценой деления 2,0 см, что позволяет измерять уровень с точностью 1,0 см. Применяют рейки деревянные, металлические эмалированные и чугунные с эмалированными вкладышами делений шкалы. Последние два типа применяют для оборудования постоянных постов.

На пологих берегах и при отсутствии гидротехнических сооружений устраивают **свайные посты** в виде ряда свай, забитых в одном створе перпендикулярно течению реки или урезу воды в море (рис 2.1). Сваи могут быть деревянными, металлическими и железобетонными. В настоящее время посты оборудуют стандартными металлическими винтовыми сваями. Площадка самой верхней сваи должна быть на 0,25...0,5 м выше наивысшего исторического уровня, а площадка нижней сваи – на 0,5 м ниже наинизшего уровня.

Расстояние по вертикали между площадками смежных свай не должно быть более 0,8 м. Горизонтальные расстояния между сваями принимают, исходя из местных условий и удобства наблюдений, но не более 50 м. Сваи нумеруют сверху вниз.

Так как нуль рейки невозможно совместить с нулем поста, то после ее установки путем нивелирования определяют превышение нуля рейки над нулем графика поста, так называемую *приводку* (рис 2.1).

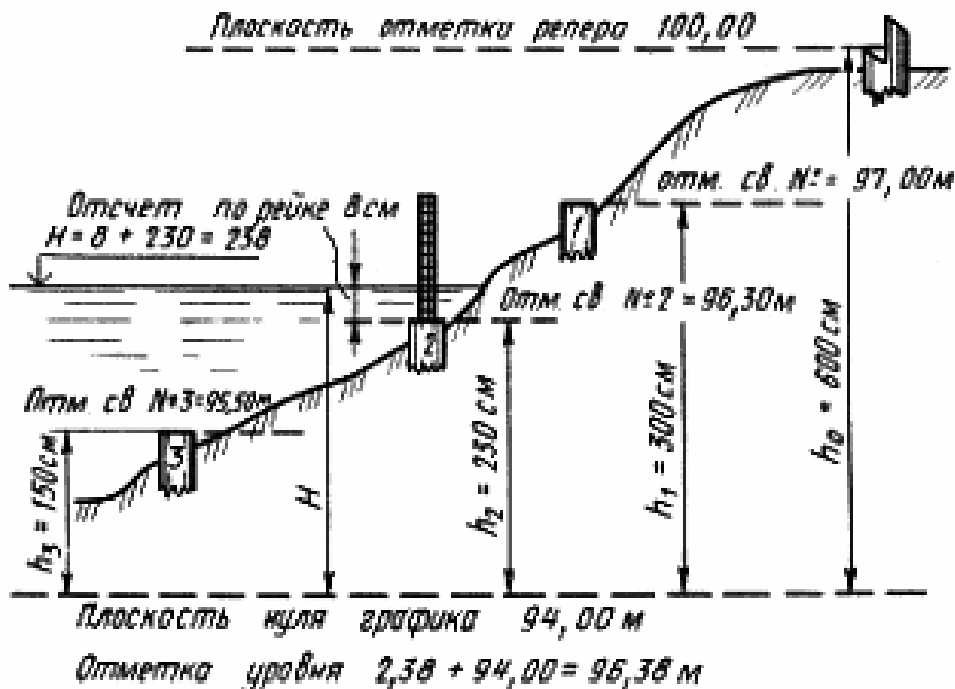


Рис. 2.1. Схема отметок и отчетов на свайном водомерном посту

Для повышения точности отсчета при малой амплитуде колебаний уровня в условиях горных рек, где набегание воды на рейку может исказить отсчеты по рейке, при наблюдениях на водохранилищах и морях для защиты от волнения рейку устанавливают на специальном открытом котловане, соединенном каналом с рекой или водоемом.

Для получения непрерывной информации об изменении уровня на реках и водоемах применяют самописцы уровня воды различной конструкции. Наибольшее распространение получили самописцы, в которых изменение уровня отслеживается с помощью поплавка, поднимающегося и опускающегося вместе с уровнем воды. Движение поплавка передается с помощью поплавкового колеса и шестерен барабану, который вращается на горизонтальной оси. На барабане закрепляется разграфленная бумага, на которой перо, перемещающееся вдоль образующей барабана с помощью часового механизма, вычерчивает ход уровня. Наибольшее распространение получил самописец «Валдай» (рис. 2.2).

Самописцы устанавливают в специальных помещениях на берегу, на гидротехнических сооружениях или на специальном основании, например свайном. Поплавок размещается в колодце, шахте или трубе, сообщающихся с морем посредством устройств (трубы, отверстия), исключающих воздействие на поплавок короткопериодных (волновых) колебаний уровня.

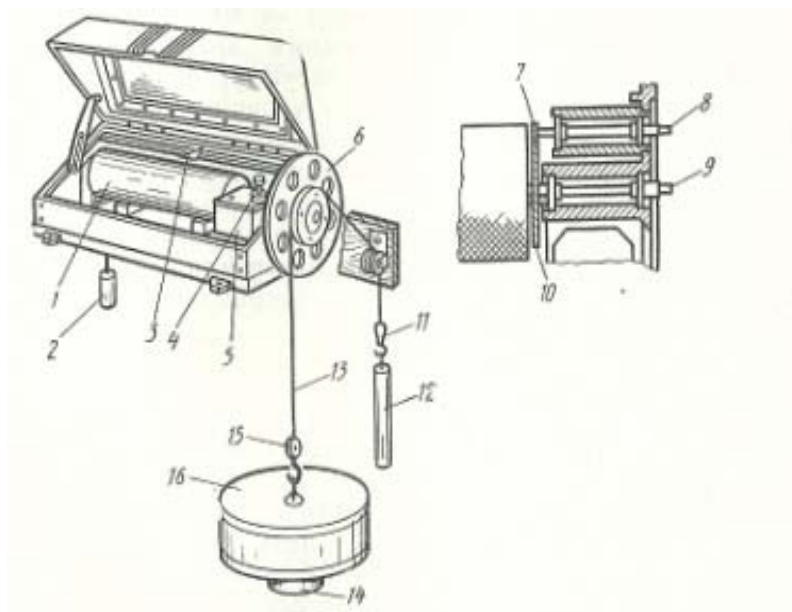


Рис. 2.2. Схема устройства самописца уровня «Валдай»:
 1 – барабан; 2 – гиря; 3 – каретка с паром; 4 – заводная головка;
 5 – часовой механизм; 6 – поплавковое колесо; 7 – трубка;
 8 – основная ось прибора; 9 – вспомогательная ось прибора;
 10 – шестерня; 11 – зажим; 12 – груз; 13 – трос; 14 – груз;
 15 – зажим; 16 – поплавок

Для определения уклона свободной поверхности воды в реке устраивают выше и ниже основного водомерного поста так называемые *уклонные посты*, расстояние между которыми L в зависимости от точности измерений меняется от 100 до 8000 м и отсчитывается по линии наибольших глубин. Уклон вычисляют из соотношения

$$I = (H_2 - H_1)/L, \quad (2.1)$$

где H_1 и H_2 – соответственно уровни в верхнем и нижнем створах.

При обработке данных наблюдений за ходом уровня на простых постах приводят измеренные уровни к нулю графика поста, вычисляют средние суточные значения уровней, составляют таблицы ежедневных уровней и строят графики изменения этих уровней во времени по годам.

Средние суточные уровни на простых постах определяют как средние арифметические из отсчетов уровня в 8 и 20 ч. При наличии дополнительных измерений средний суточный уровень находят как среднее арифметическое из всех отсчетов в течение суток.

2.3. Промерные работы

Задачей промерных работ является определение глубины и рельефа дна водных объектов.

Глубиной водного объекта называют расстояние по вертикали от поверхности воды до дна.

Промерные работы проводят с различными целями: при гидрографических исследованиях объектов, при гидрометрических работах, для нужд судоходства, при проектировании и эксплуатации различных гидротехнических сооружений, в связи с выправительными и берегозащитными работами на водных объектах.

Измерение глубин производят в отдельных точках или непрерывно по профилю дна. Их плановое расположение определяют привязкой к геодезической сети, которая создается при проведении промерных работ. Измерения глубин проводят на значительных по длине участках реки и больших площадях водоёмов, что определяет достаточно продолжительные сроки работ. За это время уровень водного объекта может измениться, и, чтобы связать между собой отдельные измерения глубин, они приводятся к единому уровню, так называемому условному (срезочному) уровню. За условный уровень принимают на реках наиболее низкий уровень, наблюдавшийся в период промерных работ.

Для получения поправки, или срезки ΔH , надо определить разность отметок рабочего уровня H и мгновенно условного уровня h , т.е.

$$\Delta H = H - h. \quad (2.2)$$

Тогда значение глубины от условного уровня будет равно

$$d = h \pm \Delta H. \quad (2.3)$$

При измерении глубин применяют механический и акустический способы.

При **механическом способе измерения глубин** используют наметку, лот ручной и механический. **Наметка** представляет собой деревянный шест длиной 6...7 м, диаметром 5...6 см, размеченный на дециметры белой и красной масляными красками. Нижний конец наметки заделывают в металлический башмак массой 0,5...1,0 кг. При илистых грунтах к нижнему торцу башмака приваривают поддон. Точность отсчетов глубин по наметке составляет 2...5 см, что зависит от грунтов дна, наличия волнения и скорости течения.

Лот ручной представляет собой металлический груз массой 2...5 кг с ушком в верхней части для крепления линя и углублением в дне для получения пробы грунта (с поверхности дна), для чего углубление смазывают мылом или солидолом. Лоты размечают марками на метры и дециметры. На реках лотом измеряют глубины до 25 м, в водоемах без течения – до 100 м. Точность отсчета глубин по лотлинию составляет 5...10 см.

Механический лот состоит из груза обтекаемой формы массой от 5 до 50 кг, стального троса диаметром 2,2...3,0 мм и ручной лебедки грузоподъемностью до 50 кг. Глубину механическим лотом измеряют со шлюпки или с катера при постановке на якорь или на ходу. В механических лотах отсчет глубины производят по счетчику, который фиксирует длину

вытравленного троса. Для получения истинного значения глубины вводят поправку (со знаком минус), которая зависит от длины вытравленного троса над поверхностью воды, измеряемого специальным прибором – угломером.

В последнее время для измерения глубин широко применяют **эхолоты**, действие которых основано на посылке ультразвуковых импульсов от вибратора-излучателя в воду и приема отраженного от дна сигнала (эха) вибратором-приемником. Время распространения импульса от излучателя до дна и обратно до приемника пропорционально глубине. При измерении больших глубин излучатель и приемник монтируют стационарно в днище судна, при работе на малых глубинах используют эхолоты с выносным (за борт) устройством для установки излучателя и приемника. Зная расстояние между ними $2b$ (рис 2.3) и глубину их погружения a под уровень воды, d , м, вычисляют по формуле

$$d = a + \sqrt{l^2 - b^2} . \quad (2.4)$$

Измерив время прохождения сигнала T , выражение (2.4) можно записать в виде

$$d = a + \sqrt{\frac{c^2 T^2}{4} - b^2} . \quad (2.5)$$

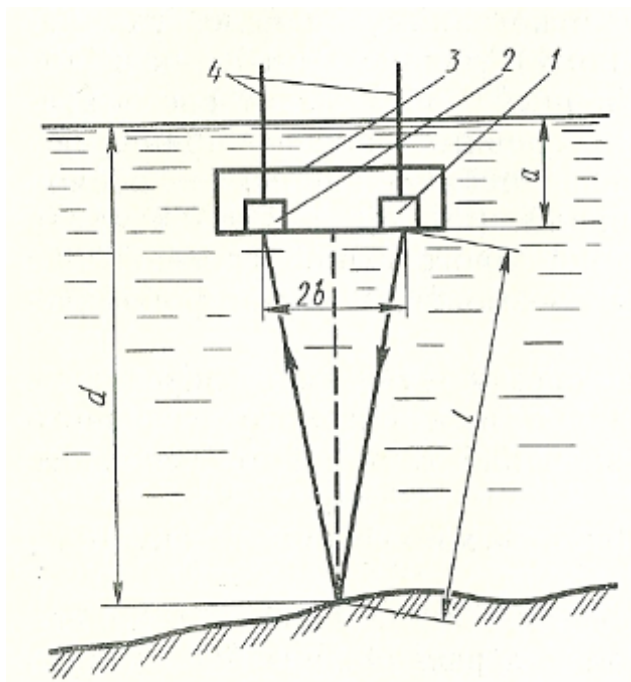


Рис. 2.3. Схема измерения глубины эхолотом:
 1 – вибратор-излучатель; 2 – вибратор-приемник;
 3 – забортное устройство; 4 – кабели

Скорость распространения звука в воде зависит от температуры и солености воды, поэтому перед началом работ проводят тарировку прибора, измеряя глубину механическим и акустическим способом, что позволяет вычислить поправку.

Измерения глубин ведут по поперечникам, продольникам и косым галсам на так называемых промерных вертикалях. Положение их в плане (координирование) выполняется: по натянутому вдоль створа тросу; засечками с берега угломерными геодезическими инструментами – теодолитами или кипрегелем на мензуге; засечка секстаном с судна на ориентиры на берегу.

Для промеров по поперечникам на берегу параллельно урезу воды разбивают магистраль и ее конечные пункты (реперы) привязывают к геодезической опорной сети. Поперечники разбивают перпендикулярно магистрали и закрепляют их положение на местности створными знаками. При ширине реки до 300 м и скорости течения не более 1,5 м/с промеры ведут по тросу, туго натянутому по створу и соответствующим образом размеченному для определения положения промерных вертикалей. Работы ведут со шлюпки, которая движется вдоль троса.

На реках шириной более 200 м, озерах, водохранилищах и в прибрежной зоне моря положение промерных точек засекают двумя угломерными инструментами (рис. 2.4). Засечками определяют обычно только каждую пятую точку, положение остальных определяют, разделив расстояние между зафиксированными точками на равные части.

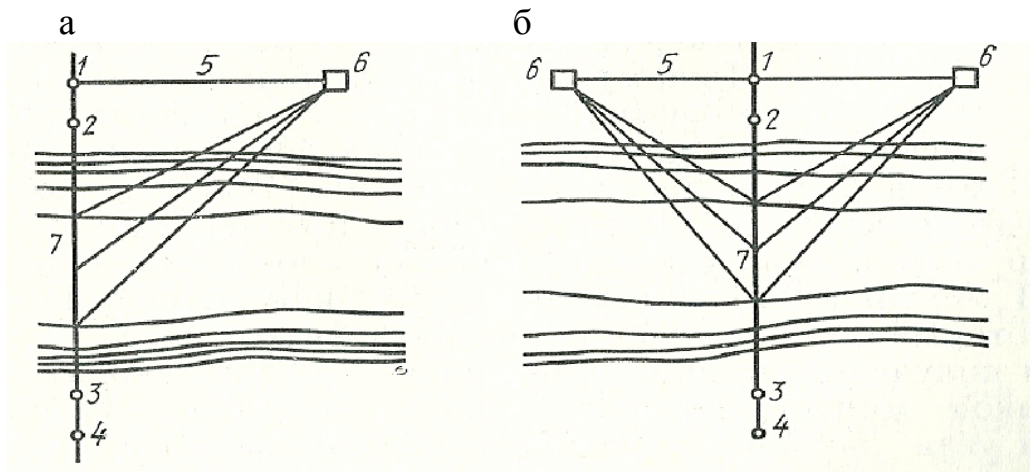


Рис. 2.4. Схема засечек промерных точек на створе одним (а) и двумя (б) инструментами:
 1...4 – створные знаки; 5 – базис;
 6 – измерительный инструмент; 7 – промерный створ

При большой длине поперечников применяют засечки с судна либо одного, либо двух ориентиров, двигаясь при этом по створу (рис 2.5), либо трех ориентиров, если створ не виден из-за большого расстояния. Зная величину углов α , β , легко определить положение промерной вертикали.

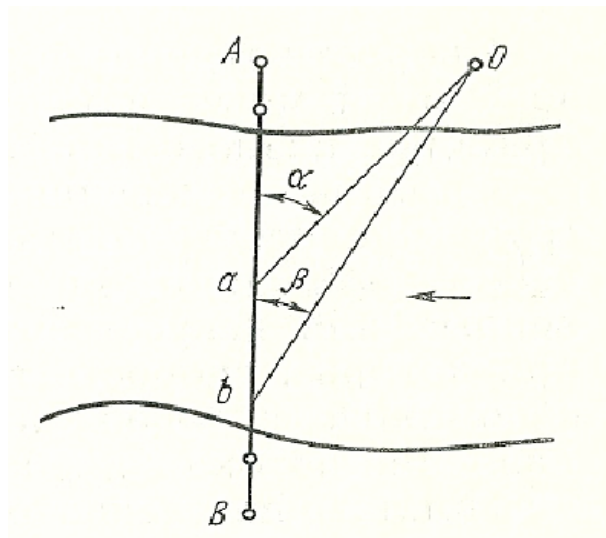


Рис. 2.5. Схема засечек точек секстаном:
 АВ – промерный створ; a, b – промерные точки;
 α, β – измеряемые углы

При производстве промерных работ на большом протяжении реки и значительной скорости течения применяют промер по косым галсам или продольникам (рис 2.6). При измерении глубины реки по продольникам шлюпка сплывает по течению, засечки промерных точек производят с базиса двумя угломерными инструментами.

При выполнении промерных работ эхолотами также разбивают магистральную линию и створы (поперечники, косые галсы или продольники). Положение катера на створе удобно определять по заранее установленным буям, проходя мимо которых, наблюдатель делает оперативную отметку на эхограмме.

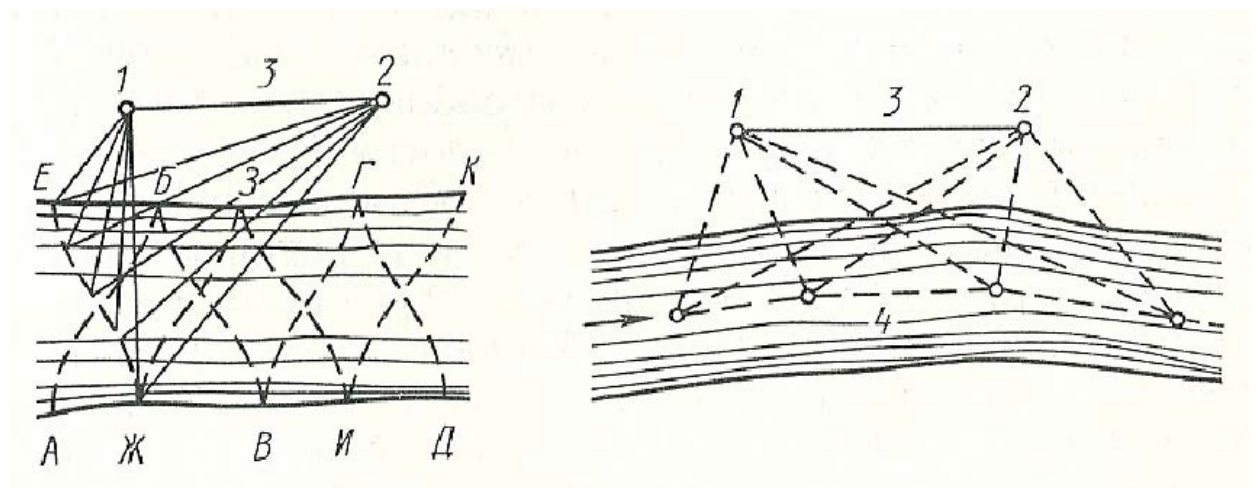


Рис 2.6. Схема промеров косыми галсами и продольниками:
 1 – 1-я мензула; 2 – 2-я мензула; 3 – базис; 4 – продольник;
 АБ...ЖЕ – косые галсы

Обработка результатов промеров заключается в:

- сличении и проверке записей в журнале;
- определении расстояния каждой точки от начала поперечника, если координирование производилось методом засечек, определении поправки на относ троса и вычислении истинной глубины;
- вычислении срезки и приведении глубин к условному уровню;
- вычислении отметок дна во всех промерных точках;
- определении характера и типа грунтов.

2.4. Измерение скорости течения воды

Скорости течения в реках, озерах, водохранилищах и береговой зоне моря могут измеряться различными способами с помощью приборов разного типа и конструкции.

Способы измерения скоростей течений могут быть разделены на две группы:

- способы поплавочные, при которых для определения течения наблюдают за движением плавающих предметов, естественных или искусственных (поплавков);
- способы вертушечные, при которых скорость течения определяют в фиксированной точке с помощью неподвижно установленных приборов по измерению давления потока воды на лопастные винты этих приборов.

Поплавочные способы позволяют получить пространственную картину течений в виде линий тока – траекторий движения поплавков. Вертушечный способ позволяет определить значение скорости течения в данной точке в условиях моря и направление вектора скорости.

В рассматриваемых условиях (реки и береговая зона моря) широкое распространение получили свободно плавающие поплавки. Эти поплавки подразделяют на поверхностные и глубинные. **Поверхностные поплавки** представляют собой простейшие приборы в виде отпиленных от бревна кружков высотой 5...7 см, крестовины из поставленных на ребро досок и т.п. Для лучшей видимости на поплавках закрепляют яркие флажки и для повышения устойчивости и снижения влияния ветра снизу крепят на трюсике (или шнуре) соответствующий груз. **Глубинные поплавки** применяют для измерения скорости и определения течения на заданной глубине. Глубинные поплавки состоят из двух поплавков, связанных между собой; из них верхний находится на поверхности воды, а нижний – на заданной глубине. Верхний поплавок должен иметь некоторую избыточную плавучесть, его делают обычно из пробки или пенопласта, чтобы поддержать в заданном положении нижний поплавок, который обладает небольшой отрицательной плавучестью.

Чтобы измерить поплавками скорость течения на реке, предварительно разбивают магистраль на берегу и четыре створа, расположенные по нормали к течению (рис. 2.7) и закрепленные створными знаками. Створы привязывают к магистрали и измеряют расстояние L между створами. Поплавки выпускают поочередно (15...20 шт.). При прохождении поплавок через створ определяют его расстояние от магистрали b методом засечек угломерными инструментами. Зная время прохождения T_i поплавок от створа 2 до створа 4, находят $v_{\max} = L/T$ и, зная b , строят эпюру поверхностной скорости по ширине реки. Прделав аналогичную операцию на других створах, можно построить траекторию движения поплавок.

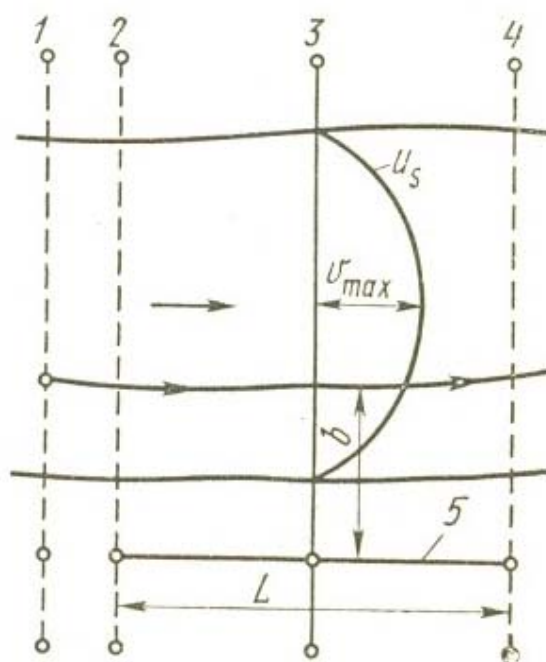


Рис. 2.7. Схема измерения скоростей течения воды поверхностными поплавками:
1 – пусковой створ; 2 – верхний створ; 3 – главный створ;
4 – нижний створ; 5 – магистраль

Скорость течений на поверхностных горизонтах определяют с помощью глубинных поплавок в том же порядке и теми же способами, что и при изучении поверхностных течений.

Среднюю скорость на вертикали u_v можно рассчитать с помощью поплавок-интегратора, имеющего плотность меньше плотности воды, что определяет скорость всплывания поплавок ω' (эту скорость находят испытанием поплавок в спокойной воде).

Так как

$$\omega' = h/t, \text{ то } u_v = l/t; \quad (2.6)$$

следовательно, чтобы вычислить u_v , надо измерить величину горизонтального сноса поплавок l и глубину потока h или время всплывания t .

Для измерения течений на реках и морях широко используют так называемые **гидрометрические вертушки (ГВ)**, которые конструктивно состоят из рабочего колеса с вертикальной или горизонтальной осью вращения, корпуса, счетно-контактного механизма, хвостового оперения и в морской вертушке – указателя направления течения. Датчиком скорости гидрометрической вертушки является рабочее колесо, частота вращения которого зависит от скорости течения $n = n(u)$ или $u = u(n)$. Зная число оборотов рабочего колеса N за T секунд, можно найти $n = N/T$ и по тарировочной кривой определить u .

Наибольшее распространение в практике измерения скоростей течения в реках получили вертушки Н.Е. Жестовского с горизонтальной осью вращения ГР-55 (рис. 2.8).

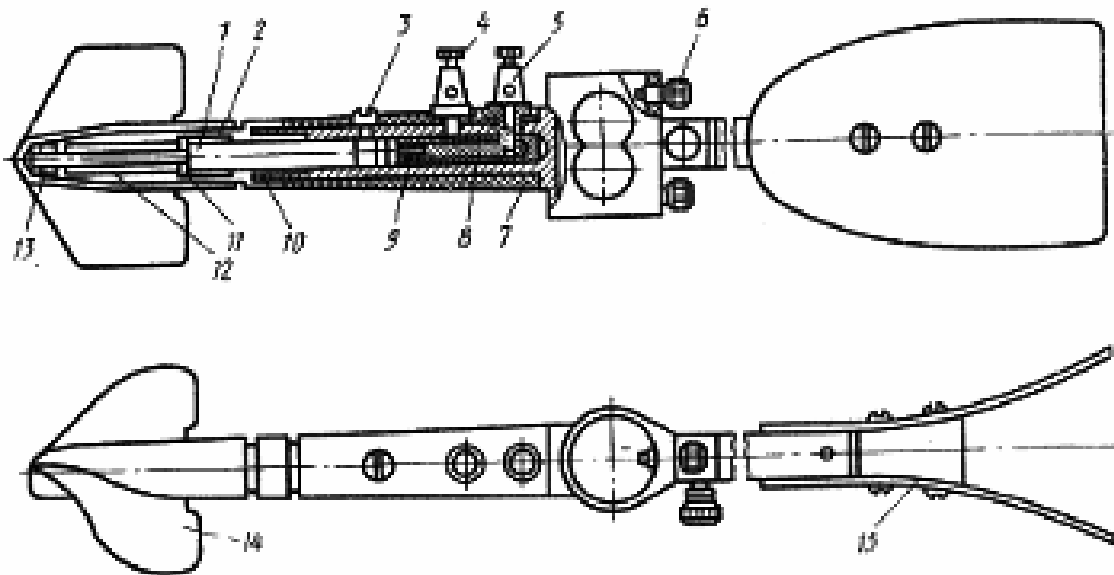


Рис. 2.8. Устройство гидрометрической вертушки ГР-55:
 1 – ось с контактным механизмом; 2 – червячная шестерня с двадцатью зубцами и штифтом; 3 – стопорный винт; 4 – вывод массы;
 5 – изолированный вывод; 6 – зажимные винты; 7 – корпус; 8 – штепсельное гнездо; 9 – токопроводящий стержень, изолированный от массы;
 10 – зажимная муфта; 11 – радиальные шарикоподшипники;
 12 – упорная втулка; 13 – осевая гайка; 14 – лопастной винт;
 15 – стабилизатор направления

Вертушки типа ГР закрепляют на штанге при глубине до 3 м или на тросе при большей глубине. В последнем случае к вертушке подвешивают груз, чтобы уменьшить снос вертушки течением.

Измерение скорости течения вертушками можно производить точечным или интеграционным способом. При очечном способе скорость измеряют в строго фиксированной точке потока. При интеграционном способе измеряют осредненную скорость по какому-либо направлению. Например, если гидрометрическую вертушку перемещать в потоке по вертикали, то

можно сразу определить среднюю скорость по вертикали. Более часто применяют точечный метод, который позволяет получить значения скорости потока в различных точках на вертикали и построить эпюру скоростей.

Наиболее часто измеряют скорость в пяти точках: у поверхности, на 0,2; 0,6; 0,8 глубины и у дна. При наличии ледяного покрова или растительности прибавляют шестую точку на глубине $0,4d$.

При измерении скорости в *пяти точках* на вертикали среднюю скорость вычисляют по формуле

$$\overline{U}_v = 0,1(u_s + 3u_{0,2} + 3u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_b), \quad (2.7)$$

где u_s , u_b – соответственно измеренные скорости у поверхности и дна.

При наличии ледяного покрова или развитой водной растительности в скобках добавляют член $2u_{0,4}$ и коэффициенты при u_s и u_b принимают равными 2.

Время измерения местных скоростей на вертикалях по стандарту принято не менее $T_0 = 100$ секунд при средних значениях величины турбулентной пульсации. На горных реках и у дна время измерения скоростей увеличивается и может достигать 10 мин.

Для измерения скорости течения реки с целью определения расхода выбирают гидрометрический створ-поперечник перпендикулярно среднему направлению течения реки в этом сечении.

В непосредственной близости от гидрометрического створа должны быть оборудованы водомерный пост и уклонные водомерные посты. Должны быть предусмотрены средства для проведения измерений на створе (гидрометрические мостики, лодки и т.п.). На гидрометрическом створе намечают положение скоростных вертикалей, расстояние между которыми зависит от ширины реки и профиля дна и составляет 2...10 м для реки шириной менее 200 м и 20...50 м при ширине реки более 200 м. Скоростные вертикали закрепляют на местности различными способами в зависимости от ширины реки. На скоростных вертикалях измеряют глубины, строят профиль дна реки и вычисляют площадь живого сечения реки. По измерениям на уклонных водомерных постах вычисляют уклон поверхности воды. Скорость измеряют обычно одной гидрометрической вертушкой, последовательно перемещаемой в различные точки вертикали. Предварительно на скоростной вертикали определяют уровни воды в начале и в конце работы на вертикали, глубины на вертикали (зимой – от нижней поверхности льда), далее вычисляют рабочую глубину и глубину погружения вертушки.

По данным измерений скоростей на каждой вертикали строят эпюру скоростей, для чего в точках измерения откладывают в определенном масштабе значение скорости и концы векторов соединяют плавной кривой (рис. 2.9, б).

Распределение скоростей по живому сечению наглядно представляется линиями равных скоростей – *изотохами*. Для их построения на вычерченном поперечном сечении реки наносят скоростные вертикали, в точках измерения скоростей выписывают их значения. Методом интерполяции проводят изотохи через равные значения скорости, которые принимают 0,05...0,5 м/с в зависимости от скорости течения (рис 2.9, а). Расстояния между изотохами уменьшаются от поверхности ко дну в связи с увеличением градиента скорости в этом направлении (рис 2.9, б).

Полученные гидрологические и гидравлические характеристики потока (реки) позволяют перейти к определению расхода.

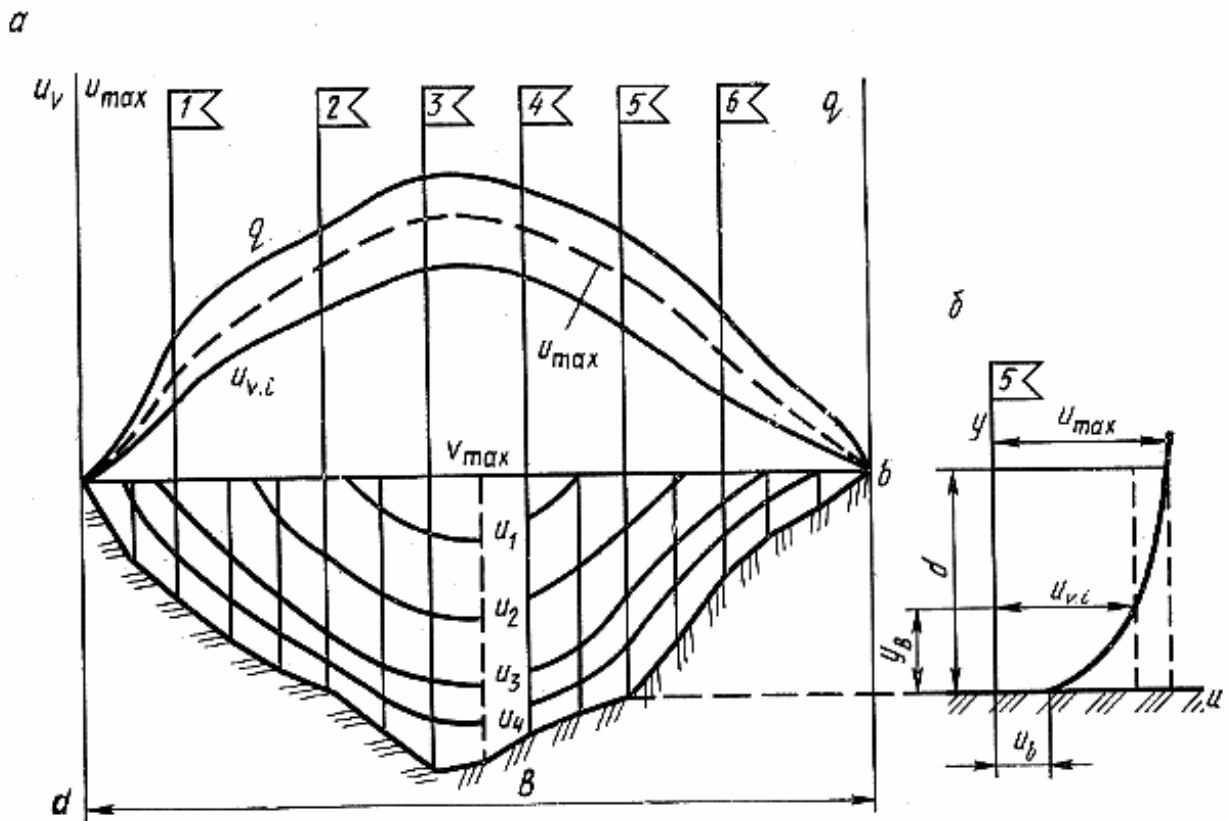


Рис. 2.9. Распределение скоростей и расходов в живом сечении безнапорного потока:
а – изотохи, распределение скоростей и расходов;
б – эпюра скоростей

В морских условиях скорости течений измеряют гидрометрическими вертушками и самописцами. Наибольшее распространение при работах в береговой зоне получила вертушка морская модернизированная (ВММ), которая является концевой вертушкой одноразового действия – после каждого измерения ее поднимают для снятия отсчетов и перезарядки. В отличие от ГР-55 вертушка ВММ, закрепленная всегда на тросе, свободно вращается на оси.

2.5. Определение расходов воды

Численно расход воды в реке равен произведению скорости на площадь. Поскольку скорости в реке меняются от точки к точке по площади живого сечения, следует записать расход через элементарную площадку

$$dQ = u dx dy, \quad (2.8)$$

если плоскость координат xoy совместить с плоскостью живого сечения реки, ось x совместить с поверхностью воды и ось y направить вертикально вниз. Тогда полный расход (m^3/c) будет равен

$$Q = \int_0^B \int_0^d u dx dy, \quad (2.9)$$

где B – ширина реки;
 d – глубина реки.

Численно расход воды в реке равен объему, ограниченному живым сечением, поверхностью воды и криволинейной поверхностью, касательной к концам векторов скоростей, проведенных нормалью к элементарным площадкам $dx dy$ (рис. 2.10). Этот объем называют моделью расхода потока жидкости.

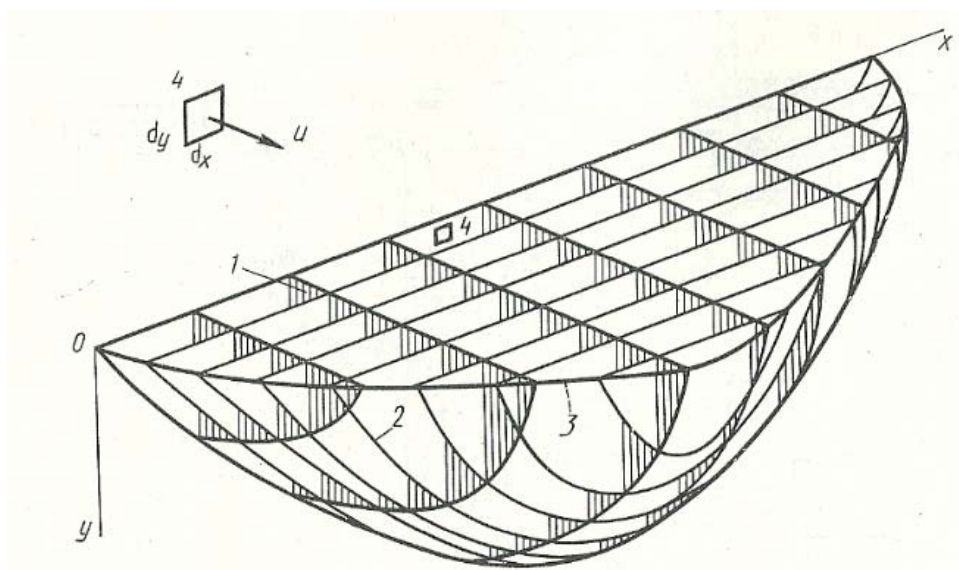


Рис. 2.10. Модель расхода жидкости:
 1 – вертикальный профиль скоростей; 2 – изотахи; 3 – эпюра распределения поверхностных скоростей; 4 – элементарная площадка

Выражение (2.9) можно записать в виде

$$Q = \int_0^B q dx, \quad (2.10)$$

где q – элементарный расход на скоростной вертикали.

Это выражение дает возможность вычислить расход реки, если известны элементарные расходы на вертикалях. Если поле скоростей представлено системой изотак, то расход вычисляется по формуле

$$Q = \int_0^{U_{\max}} \omega_i du, \quad (2.11)$$

где ω_i – площадь, ограниченная изотаксой со скоростью u_i ;
 u_{\max} – наибольшая скорость в потоке.

Существует большое количество способов определения расхода воды в потоке. Все они могут быть разделены на прямые, когда расход измеряется с помощью мерного сосуда, заполняемого за время T , и косвенные, когда измеряется не сам расход, а параметры, его определяющие.

Из указанных способов определения расхода наибольшее распространение получил гидрометрический метод. При этом расход может быть вычислен по измеренным глубинам и скоростям или по уклону и площади. Чаще применяют первый способ. В этом случае расход вычисляют по зависимостям (2.9)...(2.11). Поскольку при этом необходимо располагать данными измерений скорости и глубины в реке, этот метод получил название «скорость – площадь». На практике интегрирование заменяется суммированием, и расход вычисляется либо аналитическим, либо графическим способами.

При аналитическом способе интеграл (2.11) записывают в виде

$$Q = \int_0^{\omega} u d\omega \quad (2.12)$$

и представляют как сумму:

$$Q = k u_{v1} w_1 + 0,5 w_2 (u_{v1} + u_{v2}) + \dots + 0,5 (\bar{u}_{v(n-1)} + \bar{u}_{vn}) + k \bar{u}_{vn} w_{n+1}. \quad (2.13)$$

Число скоростных вертикалей принимается от 10 до 20.

Также в виде суммы может быть записано выражение (2.10):

$$Q = k q_1 b_1 + 0,5 b_2 (q_1 + q_2) + 0,5 b_n (q_{n-1} + q_n) + k q_n b_{n+1}, \quad (2.14)$$

где k – коэффициент для скоростей (или расходов) на прибрежных вертикалях, равный 0,7 при отлогих берегах и 0,8 при обрывистых берегах;

$u_{v,1}, u_{v,2}, \dots, u_{v,n}$ – средние скорости на вертикалях, вычисляемые по формуле (2.8);

q_1, q_2, \dots, q_n – расходы на вертикалях, вычисляемые по формуле

$$q_i = u_{vi} d_i.$$

При измерении расхода Q (скоростей течения) отмечается положение уровня воды, соответствующее этому расходу, так называемый расчетный уровень H_{cal} . Если уровень в реке за время производства измерений изменяется меньше чем на 5...10 % от преобладающей глубины на створе, то за H_{cal} принимают средний арифметический из измерений до начала и по окончании измерений. В противном случае H_{cal} рассчитывают по формулам:

- при равномерном распределении скоростных вертикалей по ширине реки:

$$H_{cal} = (q_1 H_1 + q_2 H_2 + \dots + q_n H_n) / \sum_1^{i=n} q_i; \quad (2.15)$$

- при расстояниях между вертикалями, различающихся более чем на 25 %:

$$H_{cal} = (q_1 b_1 H_1 + q_2 b_2 H_2 + \dots + q_n b_n H_n) / \sum_1^{i=n} q_i b_i, \quad (2.16)$$

где q_i и H_i – расходы и уровни на вертикалях;

b_i – расстояние между серединами интервалов между вертикалями.

При расчете расхода Q по изотаксам определяют площади между изотаксами и по их значениям строят так называемую тахиграфическую кривую $u = u(\omega_i)$, где ω_i – площадь, ограниченная поверхностью воды и определенной изотаксой (рис. 2.10, а). При скорости $u = u_{max}$ (на поверхности) площадь $\omega_i = 0$; при $u = u_b$ (у дна) площадь ω_i равна площади живого сечения реки ω . Площадь, ограниченная осями координат и тахиграфической кривой, численно равна расходу воды: $dQ = u d\omega$.

С изменением расхода реки меняется уровень воды, и может быть установлена функциональная связь уровня от расхода воды. Практически эту связь удобнее записывать в виде $Q = Q(H)$. Если шероховатость русла и уклон поверхности воды остаются постоянными, то согласно уравнениям равномерного движения зависимость уровня воды от расхода будет однозначной, т.е. каждому значению расхода соответствует одно значение уровня. Эта зависимость, выраженная графически, носит название **кривой расхода**, которая может быть построена по экспериментальным точкам (рис. 2.11). Аналогично кривой расходов могут быть построены **кривые площадей** (рис 2.12) живого сечения реки $\omega = \omega(H)$ и **кривые средних скоростей потока** $u_r = u(H)$, причем $100\Delta u_r / (2u_r) < 2...3 \%$ и $100\Delta\omega / (2\omega) < 2...3 \%$. Связь между этими кривыми определяется соотношением $Q = u_r \omega$ при любом уровне.

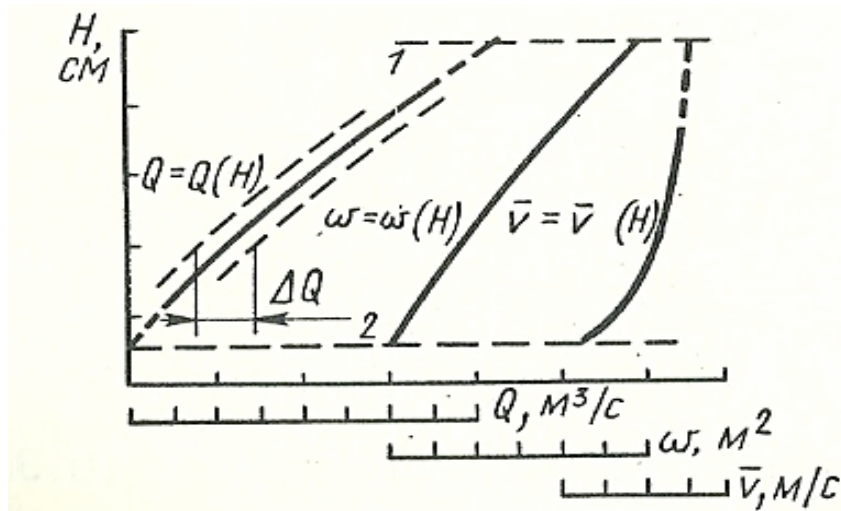


Рис. 2.11. Кривые расходов: $Q = Q(H)$, площадей $\omega = \omega(H)$ и скоростей $u = u(H)$:
1 – уровень высоких вод; 2 – уровень низких вод

Формула для определения расхода по известному уровню предлагается в виде

$$Q = a(H+H_0)^m, \quad (2.16)$$

где H_0 – уровень при нулевом расходе, вычисляемый аналитически:

$$H_0 = (H_2^2 - H_1 H_3) / (H_1 + H_2 + H_3)$$

где H_1, H_2, H_3 – уровни, соответствующие малым, средним и высоким расходам и снятые с кривой расходов.

Параметры a и m определяют в логарифмических координатах соответственно как отрезок на вертикальной оси $\lg a$ и тангенс угла наклона m .

Располагая надежной связью между расходами и уровнями, можно легко определять расходы, измеряя только уровни, что облегчает и ускоряет работы на створе.

Наблюдения на водомерных постах за уровнями ведутся ежедневно, а при значительных колебаниях уровня – несколько раз в сутки. Измерение же расходов воды трудоемко, поэтому его выполняют редко, через определенные интервалы колебаний (на подъеме и спаде) уровней. Расходы и уровни тесно связаны.

Для построения кривой расходов измеренные расходы воды и гидравлические элементы водотока (площади живых сечений, средние скорости, уклоны) заносят в ведомость. Перед тем как приступить к построению кривой расходов, необходимо проанализировать исходные материалы. Опорными являются расходы, измеренные вертушкой и пятиточечным способом. Менее достоверны расходы, измеренные сокращенным способом и поплавками. При анализе расходов необходимо установить, зарастает ли русло, каковы деформации в рабочем створе, какая была погода при измерении каждого расхода (сила ветра, его направление).

Построение кривой расходов в открытом незарастающем русле выполняют на стандартном листе миллиметровой бумаги, где по оси ординат откладывают вычисленные отметки рабочих уровней за время измерения каждого расхода. Уровни принимают в абсолютных отметках или над нулем графика. По оси абсцисс откладывают измеренные при соответствующих уровнях расходы воды. Масштабы уровней расходов выбирают так, чтобы угол наклона кривой к осям координат не был слишком острый (около $40-45^\circ$). В точке пересечения координат вычерчивают кружок, возле которого выписывается номер расхода. Обычно точки расходов образуют неширокую полосу. Ширина полосы определяет разброс точек из-за допущенных ошибок измерения (2–5 % величины расхода) или из-за колебания гидравлических элементов потока (уклонов, шероховатости русла и т.д.). Все нанесенные точки разбивают по отдельным интервалам на группы. В каждой группе точек по среднеарифметическому из уровней и расходов определяют центр тяжести. Центры тяжести всех групп соединяют плавной кривой.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы задачи гидрометрии?
2. Что входит в состав Государственной гидрометеорологической сети?
3. Какие наблюдения ведутся на основных станциях и постах в течение длительного времени, иногда бессрочно?
4. Как часто снимаются основные отсчеты положения уровня на реках в обычных и критических условиях?
5. Что представляет собой основное оборудование речного поста?
6. Какова задача проведения промерных работ?
7. Что представляют собой наметка, ручной и механический лоты, которые используются при механическом способе измерения глубин?
8. Какой способ измерения скоростей позволяет получить пространственную картину течений в виде линий тока?
9. Что собой представляют поверхностные поплавки?
10. Чем глубинные поплавки отличаются от поверхностных?
11. Что является датчиком скорости в гидрометрической вертушке?
12. На каких глубинах наиболее часто измеряют скорость в сечениях створа при вертушечном методе измерения скоростей?
13. Как называется линия равных скоростей в живом сечении речного потока?
14. Какие известны способы определения расхода?
15. На измерении каких величин основан гидрометрический метод определения расхода?

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

3.1. Задачи и виды регулирования стока

Регулированием речного стока называют искусственное перераспределение речного стока в пространстве или во времени в соответствии с требованиями водопотребителей или водопользователей. Перераспределение стока в пространстве связано с переброской стока водного объекта в другой, чаще смежный, бассейн. Перераспределение стока во времени выражается в увеличении или уменьшении стока в отдельные периоды времени по сравнению с естественным бытовым режимом.

Необходимость воздействия на естественный режим стока в целях более полного и рационального использования водных ресурсов вызвана неравномерным распределением водных ресурсов на территории страны, стока в пределах года и стока по годам (многоводные и маловодные годы). В интересах водоснабжения чаще осуществляют регулирование речного стока во времени, а регулирование речного стока в пространстве более характерно для интересов водного транспорта. Далее будем рассматривать только регулирование во времени.

Регулирование речного стока решает две основные задачи:

- повышение стока в многолетний период или трансформирование внутригодового стока для повышения надёжности водопотребления или водопользования;
- уменьшение максимальных расходов половодий и паводков для устранения наводнений и схода селевых потоков на участках реки, расположенных ниже гидроузла, и для сокращения размеров водосбросных сооружений.

Преобразование гидрологического режима водотоков осуществляется путём создания искусственных водоёмов – водохранилищ. При их проектировании необходимо научное и водохозяйственное обоснование гидротехнических мероприятий, которое проводится в рамках сравнительно новой научной дисциплины – теории регулирования и использования речного стока. Эта дисциплина фактически начала формироваться в XX веке. В её развитии значительную роль сыграли русские и советские учёные М.В. Потапов, С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, А.Д. Саваренский, В.А. Бахтиаров, Я.Ф. Плешков, Н.А. Картвелишвили, Г.Г. Сванидзе, Д.Я. Раткович и другие.

Основными разделами теории регулирования стока являются:

- гидрологические расчёты, выполняемые для определения гидрологических характеристик водного объекта в его естественном и зарегулированном состоянии;
- водохозяйственные расчёты по определению основных размеров водохранилища;

- использование водных ресурсов, т.е. разработка правил регулирования стока и эксплуатации водохранилища.

При проектировании и эксплуатации водохранилища большое внимание уделяется анализу явлений, вызываемых нарушением естественного режима реки при сооружении водохранилища:

- потери воды из водохранилища на фильтрацию и испарение [11, 14, 18];
- отложение наносов и заиление водохранилищ [11, 18];
- изменение уровня и ледового режимов [11];
- изменение качества воды [6, 21].

По степени регулирования стока различают водохранилища: суточного, недельного, годового (сезонного) и многолетнего регулирования.

Водохранилища суточного и недельного регулирования перераспределяют обычно равномерный приток в течение суток и недели в неравномерную отдачу воды из водохранилища за указанные промежутки времени.

Водохранилища годового (сезонного) регулирования перераспределяют сток в течение года, задерживая часть паводковых вод и повышая за счет накопления воды расходы водотока в маловодные сезоны или месяцы данного года.

Водохранилища многолетнего регулирования перераспределяют сток в течении периода, охватывающего несколько лет, задерживая часть стока многоводных лет и повышая за счет накопленного объема воды расходы водотока в маловодные годы.

Как правило, водохранилища многолетнего регулирования одновременно служат и для годового (сезонного), недельного и суточного регулирования, а водохранилища годового регулирования – для недельного и суточного.

Водохранилища суточного и недельного регулирования опорожняются и заполняются соответственно в течении суток, недели; водохранилища годового (сезонного) регулирования, как правило, ежегодно сбрасываются до определенной отметки, от которой в период паводка начинает заполняться водохранилище.

В водохранилищах многолетнего регулирования только часть полезной емкости ежегодно опорожняется и наполняется; полная сработка водохранилища многолетнего регулирования происходит к концу маловодного ряда лет.

Заключение о виде регулирования делают применительно к известному ходу стока в конкретный период. Критерием для определения вида регулирования служит соотношение между отдачей (водопотреблением из водохранилища) $U_P\%$ и годовым стоком $W_P\%$ расчётной обеспеченности: при $U_P\% \leq W_P\%$ принимают сезонное регулирование, при $U_P\% \geq W_P\%$ – многолетнее.

3.2. Характерные режимы, объёмы и уровни воды в водохранилище

При возведении в русле реки преграды перед ней начинает подниматься уровень воды до тех пор, пока расход русла не сравняется с расходом водопропускных отверстий преграды или с расходом, переливающимся через эту преграду. Таким образом создаётся водохранилище. **Водохранилище** представляет собой искусственный водоём, образованный в результате возведения в речном потоке преграды в виде плотины. При этом часть водного потока, расположенного по течению реки выше плотины, называют **верхним бьефом (ВБ)**, ниже плотины – **нижним бьефом (НБ)**.

Режим работы водохранилища определяется последовательным чередованием периодов его **наполнения** (возрастание объёма, уровня воды), **сработки** (снижение объёма, уровня воды) и **стояния уровня** (сохранение объёма, уровня воды). Продолжительность и очерёдность этих периодов обусловлены соотношением притока воды в водохранилище и потребления воды из него: превышение притока воды над водопотреблением за определённый период называют избытком воды; превышение водопотребления над притоком – недостатком. При наличии в течении гидрологического года одного периода избытков воды и одного – недостатков, а также при превышении суммарных избытков за рассмотренный период над суммарными недостатками, говорят о годовом регулировании стока и об **однотактной работе водохранилища**: наполнение – сработка – стояние уровней. В противном случае применяют многотактную работу водохранилища.

Объём водохранилища устанавливается в результате водохозяйственного расчёта. Полный объём водохранилища определяют с учётом потерь воды на испарение и фильтрацию:

$$W_{\text{полн}} = W_{\text{рег}} + W_{\text{мо}} + W_{\text{исп}} + W_{\text{фил}}, \quad (3.1)$$

где $W_{\text{рег}}$ – регулирующий объём воды в водохранилище (полезный), систематически используемый для перераспределения притока воды в водохранилище. При однотактной работе водохранилища регулирующий объём определяют суммой годовых недостатков воды;

$W_{\text{мо}}$ – мертвый объём водохранилища или объём мутных вод. Он не используется для регулирования стока и не срабатывается в нормальных условиях эксплуатации. Он определяется объёмом твёрдых наносов, которые осядут в водохранилище за расчётный период эксплуатации [9, 11]:

$$W_{\text{МО}} = \frac{W_0}{\gamma_{\text{н}}} (1 - \alpha) T, \quad (3.2)$$

где W_0 – вес взвешенных наносов, приходящих в расчётный створ за год;

$\gamma_{\text{н}}$ – объёмный вес взвешенных наносов, $\gamma_{\text{н}}=1,2\dots1,4$ т/м³;

T – расчётное время заиления, $T = 20$ лет;

α – коэффициент, учитывающий транзитный сброс взвешенных наносов $\alpha = 0,30$;

$W_{\text{исп}}$ – потери воды на испарение для года расчётной обеспеченности;

$W_{\text{фил}}$ – потери воды на фильтрацию.

Потери воды на испарение и фильтрацию определяются приближенно ежемесячно с учетом соответственно слоя испарения (по метеорологическим данным) и слоя фильтрации (по данным о грунтах ложа водохранилища), а также по данным о площади зеркала водохранилища при среднемесячных уровнях воды.

Характерные уровни воды в водохранилище определены с использованием кривых зависимости объёмов и площадей зеркала воды в водохранилище от отметок в створе плотины, которые называют топографическими характеристиками водохранилища и получают по результатам топографической съёмки на этапе изысканий.

Отметка **нормального подпорного уровня** воды в водохранилище (∇ НПУ) соответствует полному наполнению водохранилища при нормальных условиях эксплуатации.

Отметка **форсированного подпорного уровня** воды в водохранилище (∇ ФПУ) назначается с учетом кратковременного допустимого подъёма воды над НПУ при пропуске паводковых расходов (из условия работы водосбросного сооружения). В отдельных случаях при недостаточной изученности района строительства на небольших прудах допускается принимать слой форсировки равным 1,0 % от напора перед плотиной при стоянии НПУ.

Отметка **уровня мёртвого объёма** (∇ УМО) определяется при величине мёртвого объёма по топографическим характеристикам водохранилища. Это минимальная отметка сработки водохранилища при нормальных условиях эксплуатации водохранилища.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под регулированием речного стока?
2. Путём создания водохранилищ осуществляют перераспределение стока во времени или пространстве?

3. Какие нарушения естественного режима реки происходят при сооружении водохранилища?
4. Какие виды регулирования стока могут быть использованы при создании водохранилищ?
5. Если водохранилище перераспределяет сток в течении года, задерживая часть паводковых вод и повышая за счет накопления воды расходы водотока в маловодные сезоны или месяцы данного года, то какой вид регулирования использован для его создания?
6. Когда происходит полная сработка полезной ёмкости водохранилища многолетнего регулирования?
7. Где расположена часть водного потока, называемая верхним бьефом?
8. Назовите фазы режима работы водохранилища.
9. Из каких составных частей состоит полный объём водохранилища?
10. Какие виды потерь воды из водохранилища следует учитывать при определении его ёмкости?
11. Для каких целей предусматривают мертвый объём в водохранилищах?
12. Каким расчётом определяют величину регулирующей ёмкости водохранилища, созданного для целей водоснабжения? Чем обусловлена величина этой ёмкости?
13. Какие характерные уровни воды в водохранилище вы знаете?
14. Отметке какого уровня соответствует полное наполнение водохранилища при нормальных условиях эксплуатации?
15. Какова продолжительность затопления земель в верхнем бьефе, имеющих отметку, близкую к отметке форсированного подпорного уровня?

4. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

4.1. Классификация гидротехнических сооружений для водоснабжения и водоотведения

Инженерные сооружения, устройства и оборудование, с помощью которых осуществляются мероприятия по использованию водных ресурсов, а также по борьбе с вредным действием вод, называются гидротехническими.

Гидротехнические сооружения применяются в различных отраслях водного хозяйства и в зависимости от этого делятся на сооружения общего и специального назначения. Первые используются во всех или нескольких отраслях водного хозяйства; вторые – в одной какой-нибудь отрасли, для которой и являются специфическими.

К гидротехническим сооружениям общего назначения относятся:

- водоподпорные, создающие и поддерживающие напор (плотины и дамбы);

- водозаборные, обеспечивающие водой несколько отраслей народного хозяйства (орошение, обводнение, водоснабжение, энергетику и др.);

- водопроводящие, или водоводы, подводящие воду к месту ее потребления и отводящие ее из водоемов (каналы, трубопроводы, лотки, туннели, дюкеры);

- регуляционные, или выпрямительные, предназначенные для регулирования русел рек в целях создания благоприятных условий их протекания и предотвращения разрушающего действия на берега, защиты населенных пунктов и земляных угодий от затопления, а каналов водозаборных и других сооружений – от наносов льда, шуги и волн (направляющие и защитные дамбы, запруды, прокопы, шугосбросы и др.);

- сопрягающие, служащие для безопасного сопряжения потоков при наличии больших уклонов и напоров воды – быстротоки, перепады;

- водосбросные, с помощью которых вода отводится из верхнего бьефа в нижний или другие естественные или искусственные водоприемники. К ним относятся водосбросы и водоспуски.

Для использования водных ресурсов возводят специальные гидротехнические сооружения. К специальным сооружениям относятся:

- гидроэнергетические (для использования водной энергии);

- воднотранспортные, служащие для судоходства и сплава леса;

- водопроводные и канализационные, с помощью которых осуществляется водоснабжение городов и населенных пунктов, а также отвод и очистка сточных вод;

- гидромелиоративные, возводимые на оросительных, обводнительных и осушительных системах;

– рыбохозяйственные – рыбоходы, рыбоподъемные шлюзы, рыбоводные бассейны;

– сооружения шламохранилищ, служащие для транспортирования отходов горно-обогатительных фабрик, и разделения этих отходов на твердую и жидкую фракции.

В области водоснабжения и водоотведения основными вопросами, которые решают гидротехнические сооружения, являются оптимальное использование существующих источников водоснабжения, изменение при необходимости естественного водного режима водотоков, создание искусственных запасов воды, очистка стоков.

Группа гидротехнических сооружений, объединенных по расположению и условиям совместной работы, называются гидроузлом. Гидроузлы, как правило, являются комплексными, т.е. выполняют несколько функций. В их состав входят основные и второстепенные гидротехнические сооружения

К основным относят [27] гидротехнические сооружения, разрушение или повреждение которых приводит к нарушению нормальной работы электростанций, прекращению или уменьшению подачи воды для водоснабжения и орошения, подтоплению осушаемой и затоплению защищаемой территорий, прекращению или сокращению судоходства, деятельности речного и морского портов, судостроительного и судоремонтного предприятий, может привести к выбросу нефти и газа из морских скважин, хранилищ, трубопроводов, ущерб рыбным запасам.

К второстепенным относят гидротехнические сооружения, разрушение или повреждение которых не влечет за собой указанных последствий.

Гидротехнические сооружения в зависимости от возможных последствий их разрушения или нарушения эксплуатации подразделяются на классы. Назначать класс гидротехнического сооружения следует в соответствии с обязательным приложением 2 [27] (табл. 4.1 и 4.2).

Класс второстепенных гидротехнических сооружений принимают на единицу ниже класса основных сооружений данного гидроузла, но не выше III класса.

Временные сооружения, как правило, следует относить к IV классу. В случае, если разрушение этих сооружений может вызвать последствия катастрофического характера или значительную задержку возведения основных сооружений I и II классов, они могут быть отнесены при надлежащем обосновании к III классу.

Таблица 4.1

Класс основных постоянных гидротехнических сооружений
в зависимости от их высоты и типа грунтов основания

Сооружения	Тип грунтов основания	Высота сооружений, м, при их классе			
		I	II	III	IV
1. Плотины из грунтовых материалов	A	Более 100	От 70 до 100	От 25 до 70	Менее 25
	B	«75»	«35» 75	«15» 35	«15»
	B	«50»	«25» 50	«15» 25	«15»
2. Плотины бетонные и железобетонные; подводные конструкции зданий гидроэлектростанций; судоходные шлюзы; судоподъемники и другие сооружения	A	Более 100	От 60 до 100	От 25 до 60	Менее 75
	B	«50»	«25» 50	«10» 25	«10»
	B	«25»	«20» 25	«10» 20	«10»

Примечания: 1. Грунты: А – скальные; Б – песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии; В – глинистые, водонасыщенные в пластичном состоянии.

2. Высоту гидротехнического сооружения и оценку его основания следует определять в соответствии со СНиП по проектированию отдельных видов гидротехнических сооружений и оснований.

Таблица 4.2

Класс основных постоянных гидротехнических сооружений
в зависимости от последствий нарушения их эксплуатации
(социально-экономической ответственности)

Объекты гидротехнического строительства	Класс сооружений
1	2
1. Гидротехнические сооружения гидравлических, гидроаккумулирующих и тепловых электростанций мощностью, млн кВт: 1,5 и более менее 1,5	I II–IV
2. Гидротехнические сооружения атомных электростанций независимо от мощности	I
3. Гидротехнические сооружения и судоходные каналы на внутренних водных путях (кроме сооружений речных портов): сверхмагистральных магистральных и местного значения	II III

1	2
4. Гидротехнические сооружения мелиоративных систем при площади орошения и осушения, обслуживаемой сооружениями, тыс. га:	
св. 300	I
св. 100 до 300	II
св. 50 до 100	III
50 и менее	IV
5. Подпорные сооружения водохранилищ мелиоративного назначения при объеме, млн м ³ :	
св. 1000	I
св. 200 до 1000	II
св. 50 до 200	III
50 и менее	IV
6. Каналы комплексного водохозяйственного назначения и сооружения на них. Суммарная годовая стоимость валовой продукции водопотребителей:	
св. 1 млрд руб.	I
от 500 млн до 1 млрд руб.	II
от 100 млн до 500 млн руб.	III
менее 100 млн руб.	IV

4.2. Основные положения проектирования плотин из грунтовых материалов

4.2.1. Конструирование плотин

Плотина – гидротехническое сооружение, перегораживающее реку или водоём для подъёма уровня воды. Плотина служит для создания водохранилища и сосредоточения напора в месте расположения сооружения.

Плотина является сооружением, которое определяет состав всего комплекса сооружений. На её долю приходится основной объём работ, значительная доля стоимости от всего комплекса сооружений. В связи с этим целесообразно в качестве материалов для возведения плотин использовать местные грунтовые материалы. Кроме того, при возведении плотины из местных строительных материалов применяют почти полную механизацию труда, что способствует сокращению трудозатрат. Грунтовые (земляные) плотины просты по конструкции, строительство их возможно в очень широком диапазоне геологических условий. В связи с вышесказанным грунтовые плотины можно считать самым распространённым типом водоподпорного сооружения.

К достоинствам земляных плотин, таким образом, можно отнести:

– возможность возведения в любых географических районах, на почти любых основаниях;

- возможность использования для возведения земляных плотин практически любых грунтов;
- возможность широкой механизации строительных процессов по разработке, перемещению, укладке и уплотнению грунтов;
- высокая надёжность земляных плотин;
- отсутствие необходимости в затратах на ремонтные работы в процессе эксплуатации, за исключением ремонта покрытия верхового (напорного) откоса;
- относительная дешевизна.

Недостатки земляных плотин:

- невозможность сброса паводковых вод непосредственно через них (в последнее время предложены конструкции земляных плотин со сбросом воды через гребень);
- земляные плотины водопроницаемы, фильтрация через тело плотины создаёт условия для его деформации (особенно низового откоса) и обуславливает большие потери воды из верхнего бьефа.

Грунтовые (земляные) плотины были в числе самых первых плотин в истории человечества. С давних пор такие плотины строились и в России. Известна Змеиногорская плотина XVIII века, построенная выдающимся русским инженером Козьмой Фроловым. Современные грунтовые плотины достигают весьма больших размеров; к примеру, Нурекская плотина достигает высоты трёхсот метров, а плотина Тарбела имеет объём 130 миллионов кубических метров.

Плотины из грунтовых материалов в зависимости от материала их тел и противофильтрационных устройств, а также способов возведения, подразделяются в соответствии со СНиП [26] на следующие виды:

- 1) земляная насыпная;
- 2) земляная намывная;
- 3) каменно-земляная;
- 4) каменно-насыпная.

По высоте плотины, водоподпорные сооружения делятся на:

- 1) высокие – с максимальным напором более 50 м;
- 2) средней высоты – с напором 15–50 м;
- 3) низкие – с напором менее 15 м (напор – перепад уровней воды в верхнем и нижнем бьефах).

Плотина из грунтовых материалов (земляная плотина) представляет собой **грунтовую призму**, верхнее основание которой называют **гребнем плотины**, а нижнее – её **подошвой**. Откос плотины, обращённый в сторону верхнего бьефа, называют **верховым откосом**, в сторону нижнего бьефа – **низовым**. Крутизна откосов плотины характеризуется **коэффициентом откоса m** , представляющим собой котангенс угла наклона откоса к горизонту ($m = \text{ctg}\alpha$). Крутизна откосов плотины из-за различных условий их работы различна: верховой откос проектируют более пологим, низовой – более крутым (табл. 4.3).

Для предварительного назначения заложения откосов можно использовать рекомендации [1, 2, 10, 18] или табл. 4.3 с последующей проверкой их статической устойчивости.

Т а б л и ц а 4.3

Рекомендуемые коэффициенты откосов земляных плотин

Высота плотины, м	Коэффициенты заложения откосов		
	верхового m_1	низового m_2	
		без дренажа	с дренажом
5	2,0	1,5	1,5
5–10	2,5	2,0	1,5–2,0
10–15	2,5–3,0	2,5	2,0–2,5
15–20	3,0–3,25	2,5–2,75	2,0–2,5
20–30	3,5	2,75–3,0	2,0–2,5

Подошва плотины опирается на основание, которое для грунтовых плотин может быть представлено как скальными, так и нескальными грунтами. На торфяном основании, как правило, допускается возведение плотин при их высоте до 20 м. В зависимости от свойств грунтов основания плотины разделяют на водопроницаемые и неводопроницаемые, что учитывается в фильтрационных расчётах плотин и их оснований.

По способу возведения земляные плотины могут быть [1, 2, 5, 14, 15, 18, 30]:

– насыпными, возводимыми путём сухой отсыпки грунта (с транспортных средств) с последующим его уплотнением;

– насыпными без искусственного уплотнения грунта – с отсыпкой его пионерным способом насухо;

– намывными, возводимыми средствами гидромеханизации или гидравлическим способом;

– полунамывными, боковые части которых (внешние откосные призмы) отсыпаются насухо, а внутренняя часть (ядро) намывается средствами гидромеханизации;

– насыпными с отсыпкой грунта (лёссового или морёного) на участки плотины, залитые водой (мокрый способ возведения плотин);

– возводимыми способом направленных взрывов: в этом случае тело плотины образуется путём массового выброса грунта с берегов при помощи зарядов взрывчатого вещества.

Конструкции земляных плотин выбирают на основе технико-экономического сравнения вариантов, исходя из наличия на месте строительства в требуемом количестве грунтов с различными физико-механическими и противифльтрационными свойствами. **Примеры конструкций насыпных грунтовых плотин** с учётом размещения в их теле грунтовых материалов и противифльтрационных устройств приведены на рис 4.1. При этом названы наиболее часто применяемые типы противифльтрационных устройств.

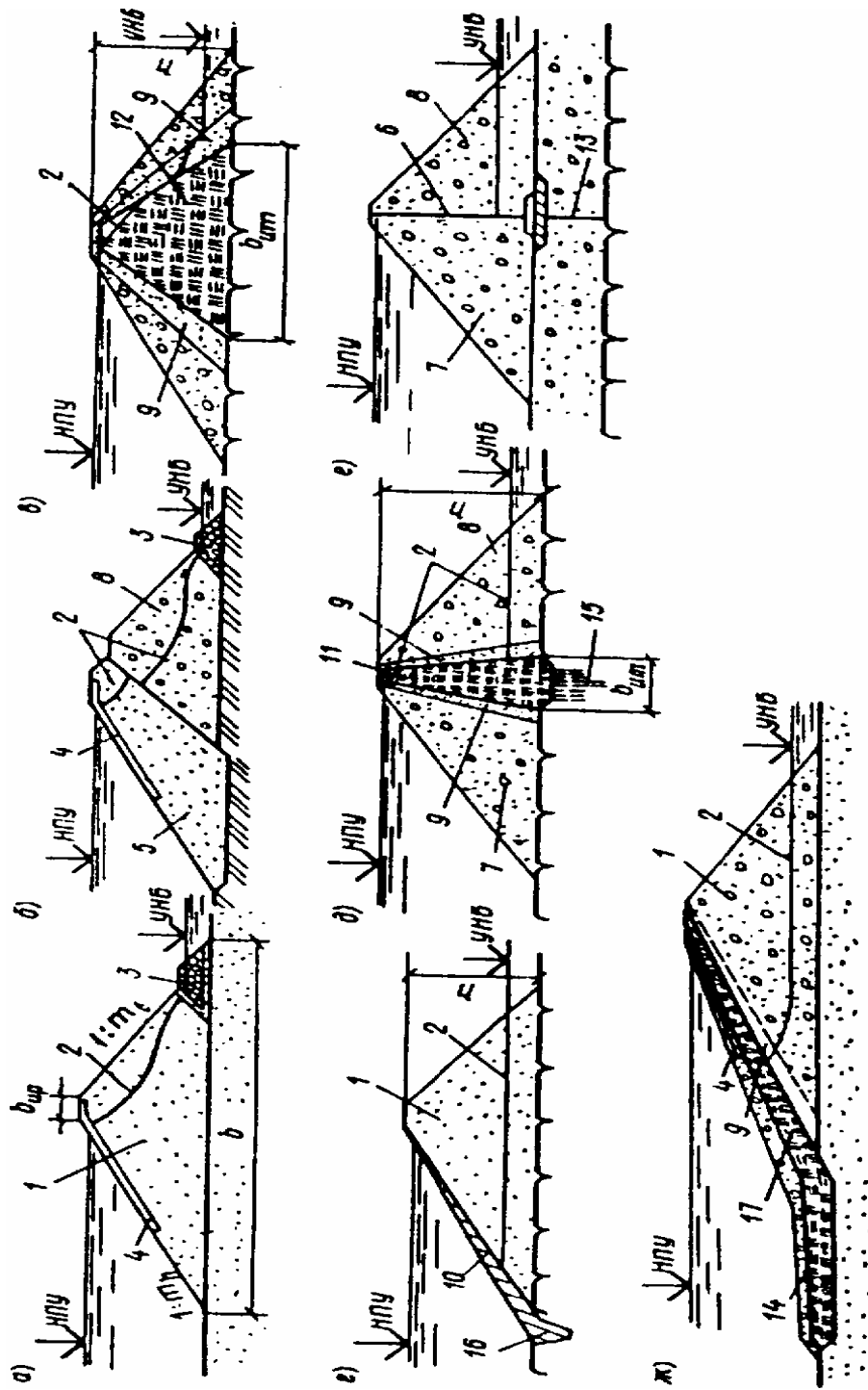


Рис. 4.1. Виды земляных насыпных плотин.

а – однородная; б, в – неоднородная; г – с экраном из негрунтовых материалов; д – с грунтовыми ядром (вертикальным или наклонным); е – с негрунтовой диафрагмой; ж – с грунтовым экраном; 1 – тело плотины; 2 – поверхность депрессии; 3 – дренаж; 4 – крепление откосов; 5 – верхняя грунтовая противофильтрационная призма; 6 – диафрагма; 7 – верхняя призма; 8 – низовая призма; 9 – переходный слой; 10 – экран из негрунтовых материалов; 11 – грунтовое ядро; 12 – центральная грунтовая противофильтрационная призма; 13 – шпунт или стенка; 14 – понур; 15 – инъекционная (цементационная) завеса (висячая); 16 – зуб; 17 – грунтовый экран; h – высота плотины; b – ширина плотины понизу; $b_{ит}$ – ширина противофильтрационного устройства понизу; $b_{ит}$ – ширина плотины по гребню; m_1 – коэффициент верхового откоса; m_2 – коэффициент низового откоса

Однородные плотины (рис. 4.1, а) устраивают при наличии на месте строительства относительно водонепроницаемого материала (лёсс, суглинок, глина). В этом случае плотины возводят без противофильтрационных устройств.

В **неоднородных плотинах** (рис. 4.1, б, рис. 4.2) грунты располагаются в определённой последовательности: менее водопроницаемый грунт – на верховом откосе плотины или в центральной части. Применяют плотины этого типа в том случае, когда на месте нет достаточного количества однородного материала или имеющийся грунт сильно водопроницаем.

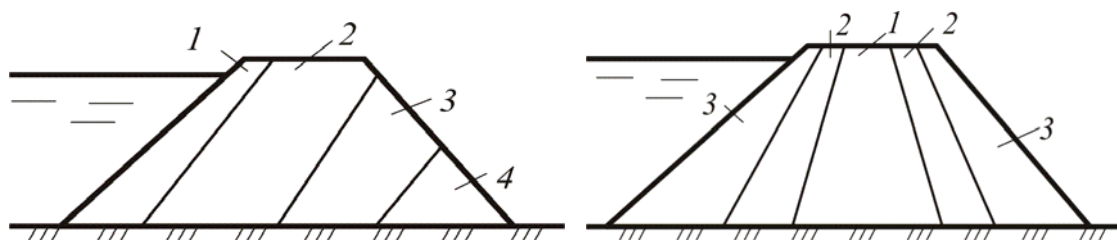


Рис. 4.2. Неоднородная плотина:
1 – суглинок; 2 – супесь; 3 – песок; 4 – гравий, камень

При строительстве плотин из более проницаемых грунтов (песков, супесей) для снижения потерь на фильтрацию применяют различные противофильтрационные устройства – экраны, ядра, диафрагмы (рис. 4.1, г–ж), дренажи.

Экраны – противофильтрационные элементы, которые располагаются в верховом клине плотины, ближе к верховому откосу.

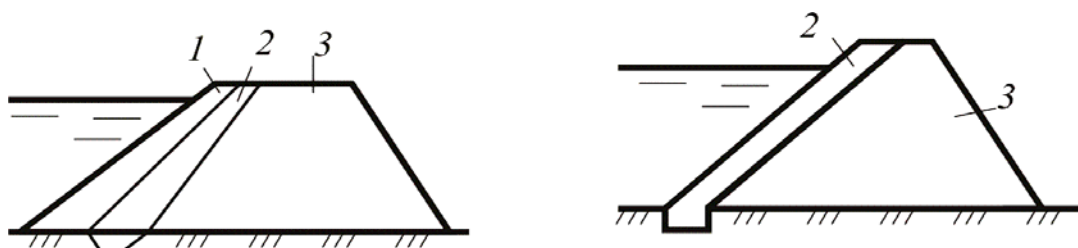


Рис. 4.3. Схема плотины с экраном:
1 – защитный слой; 2 – экран; 3 – плотина

Экран может быть пластичным, из таких грунтовых материалов, как глина, суглинок и торф, и жёстким – из бетона, ж/б, дерева, а также из материалов, полученных на основе битумов и полимеров (асфальтобетон, пластбетон, полиэтиленовая плёнка и др.).

Пластичные экраны выполняют из суглинка, смеси глины и песка в соотношении 6:4, а также глинобетона (24 % глины, 36 % песка и 40 % гравия). Рекомендовано выполнение пластичных экранов при превышении

коэффициента фильтрации грунта тела плотины и над коэффициентом фильтрации материала экрана в 80–100 раз [18, 26, 30]. Минимальная толщина экрана поверху не должна быть менее 0,8 м, а понизу – не менее 0,1 Н (напора). Возвышение экрана над нормальным подпорным уровнем воды в водохранилище принимают в зависимости от класса сооружения равным 0,5–0,7 м. Для защиты от промерзания экран покрывают защитным слоем из песка, гравия или щебня толщиной 1–1,5 м у основания плотины и слоем толщиной не менее глубины промерзания выше максимального подпорного уровня воды.

Жёсткие экраны дороже пластичных и вследствие осадки тела плотины могут повреждаться, поэтому их применяют сравнительно редко и лишь при отсутствии грунтов для пластичных экранов и соответствующем ТЭ обосновании.

По условиям производства работ и эксплуатации часто предпочитают устраивать вместо экрана **ядро**, располагая его в центральной части профиля плотины. Преимущество ядра по сравнению с экраном состоит в том, что оно меньше подвержено опасным деформациям, так как поддерживается в устойчивом состоянии боковыми призмами плотины и защищается ими от температурных воздействий.

Назначение ядра, также как и экрана – уменьшение фильтрации воды через тело плотины. Выполняют ядро из пластичного материала – глины или жирного суглинка. Толщину ядра понизу и поверху принимают такой же, как и экрана, а превышение над нормальным подпорным уровнем воды – равным 0,3 – 0,5 м (в зависимости от класса сооружения).

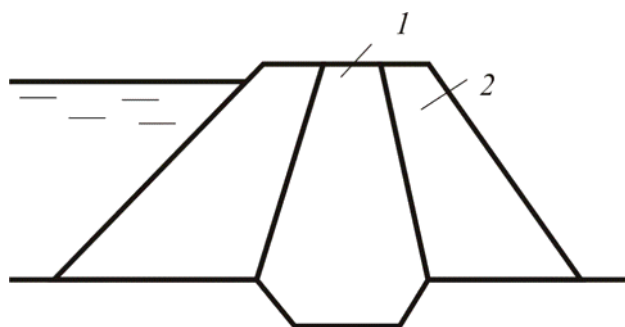


Рис. 4.4. Схема плотины с ядром:
1 – ядро (глина, суглинок); 2 – тело плотины

Противофильтрационный элемент в центральной части тела плотины может выполняться из негрунтовых материалов – в виде жёсткой **диафрагмы** или стенки (бетон, железобетон, металл, дерево) (рис. 4.5).

Диафрагмы могут быть жёсткими (из монолитного железобетона) и гибкими (из сплошной тонкой железобетонной плиты или отдельных плит с соответствующим уплотнением швов); из листового материала или плоского шпунта и из битумных материалов.

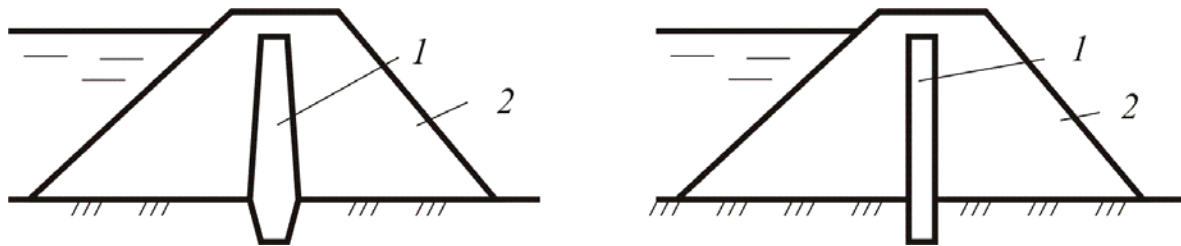


Рис. 4.5. Схема плотины с диафрагмой:
1 – диафрагма (бетон, ж/б, металл); 2 – тело плотины

Для приёма профильтровавшихся через тело плотины вод и отвода их в нижний бьеф без размыва низового откоса в низовом клине плотины часто предусматривают дренажи различной конструкции. Все типы конструкций дренажей, кроме наклонного (прислонённого), можно считать противофильтрационными устройствами (конструкции дренажей и область их применения будут рассмотрены ниже).

Плотины с каменной призмой в низовом клине (можно считать разновидностью дренажа) строят при наличии на площадке строительства достаточного количества крупнообломочного строительного материала – камня. Его укладывают в нижней части низового клина плотины. Для предотвращения вымыва грунта через каменную дренажную призму между грунтом тела плотины и каменной дренажной призмой укладывают слои песка и мелкого гравия.

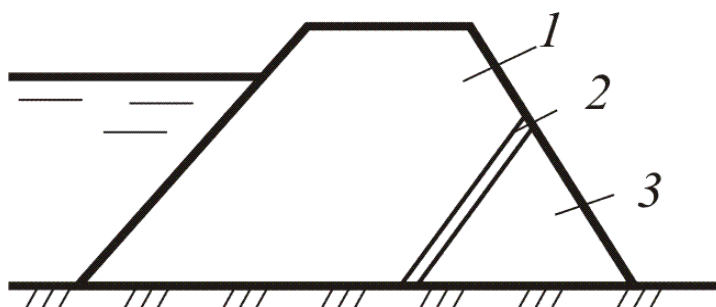


Рис.4.6. Схема плотины с призмой:
1 – тело плотины;
2 – песок, гравий или галька;
3 – каменная призма

Земляные насыпные плотины перечисленных выше типов строят преимущественно на водонепроницаемых основаниях или когда коэффициент фильтрации тела плотины значительно больше коэффициента фильтрации грунтов основания. В этих случаях необходимы противофильтрационные устройства для уменьшения фильтрационного расхода воды и предотвращения фильтрационных деформаций грунта в теле самой плотины, а также повышения устойчивости её низового откоса.

В плотинах, строящихся на водопроницаемых грунтах оснований, предусматривают в основании дополнительные противифльтрационные устройства – понур, зуб, инъекционную или цементационную завесу, шпунтовую стенку.

При небольшой глубине проницаемого слоя под плотиной (2–3 м) в основании однородной плотины, примерно под серединой верхового откоса, закладывают **зуб**, который заполняют глиной или суглинком. Зуб в этом случае следует заглубить в водоупор на 0,5–0,75 м.

Если толщина водопроницаемого слоя основания составляет 4–6 м, то для сопряжения тела плотины и водоупором закладывают зуб глубиной 1–1,5 м и забивают в нём шпунт, который опускают в водоупор.

Плотины с экраном и ядром при небольшой мощности водопроницаемого основания также сопрягают с водоупором закладкой зуба под ядром или экраном (рис. 4.1, г).

При большой мощности водопроницаемого основания устраивают плотины с экраном и **понуром** (рис. 4.1, ж) из грунтовых малопроницаемых материалов или плотину с вертикальным ядром, дополненным **висячей инъекционной завесой** (рис. 4.1, д, рис. 4.7).

Понур является продолжением экрана и делается из того же материала, что и экран. Толщина его в верховом конце должна быть не менее 0,7 м, а в месте сопряжения с экраном – 1–2 м. Длину понура принимают обычно $3-5H$ и более (H – максимальный напор перед плотиной). Сверху понур, как и экран, покрывают защитным слоем толщиной 1–2 м.

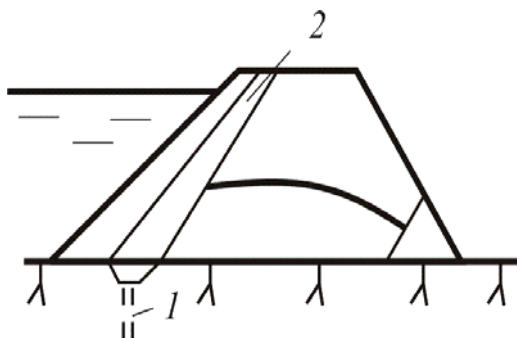


Рис. 4.7. Схема плотины с экраном и цементационной завесой:
1 – завеса; 2 – экран

Плотины с диафрагмой и цементационной (или битумной) завесой под ней (рис. 4.8) применяют при небольшой и средней мощности водопроницаемого основания. В последнем случае диафрагмы можно выполнять висячие (рис. 4.9), то есть не доходящие до водоупора. Диафрагмы могут быть жёсткими и гибкими. Глубину заложения и размер диафрагмы устанавливают фильтрационными и статическими расчётами.

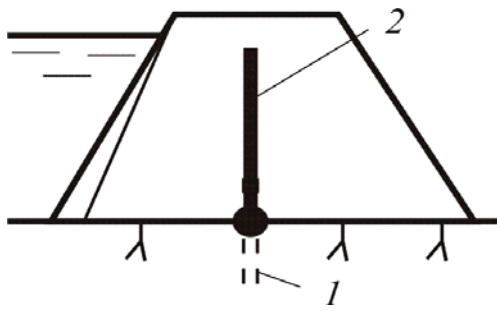


Рис. 4.8. Схема плотины с диафрагмой и цементационной завесой:
1 – завеса; 2 – диафрагма

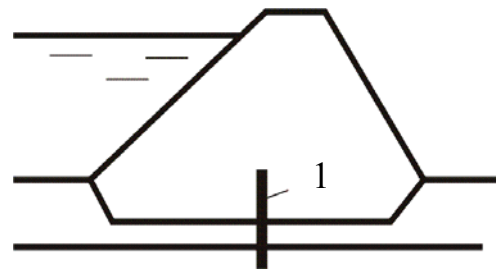


Рис. 4.9. Схема плотины с висячей диафрагмой:
1 – диафрагма

При глубоком залегании водоупора под подошвой плотины сопряжение плотины с основанием принимает более сложные формы (рис. 4.10–4.11).

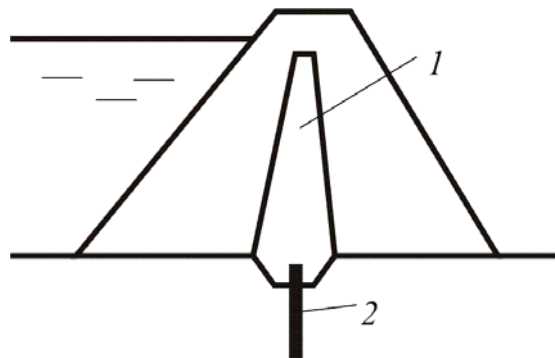


Рис. 4.10. Схема плотины с ядром и висячей шпунтовой стенкой:
1 – ядро; 2 – шпунтовая стенка

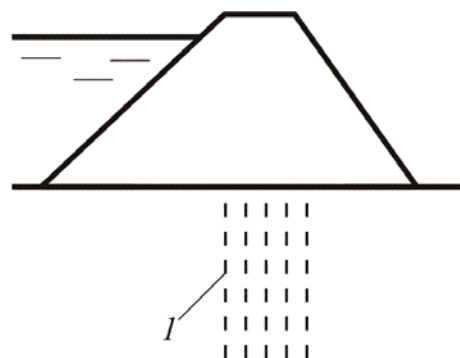
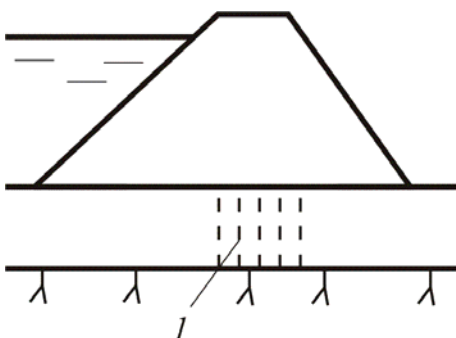


Рис. 4.11. Схема плотин с инъекционными завесами:
1 – инъекционная завеса

Плотины с инъекционной завесой, входящей в водоупорную толщу основания, преимущественно скального, применяют, когда невозможно

выполнить диафрагму или зуб. При большой мощности водопроницаемой толщи основания противофильтрационная завеса может не доходить до водоупора на величину, определяемую специальными расчётами.

Конструкцию и размер основных элементов земляной плотины для конкретного объекта выбирают на основе технико-экономических расчётов с учётом условий и особенностей их работы.

4.2.2. Обоснование требований к грунтам основания и тела плотины

При оценке качества грунта оснований и выборе грунта для проектируемых гидросооружений следует руководствоваться требованиями и положениями [1; 2; 16; 26].

Возведение грунтовых плотин возможно как на скальных, так и на не-скальных основаниях. При оценке качества скального основания необходимо обратить внимание на степень трещиноватости и заполнение трещин мягкими, легковымываемыми и растворимыми грунтами, на наличие тектонических нарушений и ослабленных зон, которые могут разрушаться под влиянием фильтрации и насыщения их водой. При оценке качества грунтов нескального основания обращают особое внимание на наличие порового давления в связи с их консолидацией; водорастворимых включений.

Земляные насыпные плотины можно возводить, согласно п.2.5 [26], из всех видов грунтов, за исключением :

- а) содержащих водорастворимые включения хлоридных солей более 5 % по массе, сульфатных или сульфатно-хлоридных более 10 % по массе;
- б) содержащих не полностью разложившиеся органические вещества (например, остатки растений) более 5 % по массе или полностью разложившиеся органические вещества, находящиеся в аморфном состоянии, более 8 % по массе;
- в) сильнольдистых и льдистых грунтов.

Содержание органических и водорастворимых примесей в грунтах, применяемых для намыва плотины, следует допускать в количествах, при которых их остаток в теле намывной плотины после производства работ по ее намыву будет не выше величин, допустимых при отсыпке грунтов в тело плотины.

Предварительную оценку пригодности карьерного грунта для намыва плотин в зависимости от зернового состава производят по графикам (рис. 4.12) [26]. Предпочтительными для намыва однородных плотин являются песчаные грунты I группы; песчаные и гравийные грунты II группы целесообразно предусматривать для неоднородных плотин с мелкопесчаной центральной зоной или глинистым ядром.

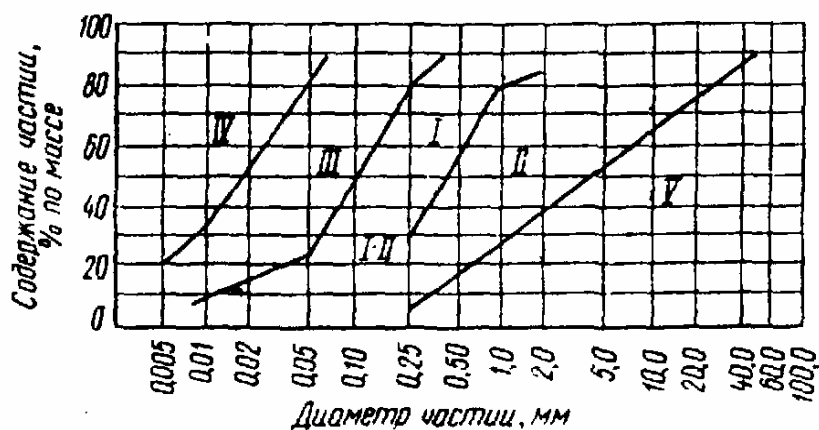


Рис. 4.12. Группы грунтов, используемых для намыва плотин

Предпочтительными для намыва однородных плотин являются песчаные грунты I группы. Песчаные и гравийные грунты II группы целесообразно предусматривать для неоднородных плотин с мелкопесчаной центральной зоной или глинистым ядром. Супеси (III группа), суглинки (IV группа), гравийные и галечниковые грунты (V группа), а также лёссовидные грунты можно использовать для намыва при соответствующем технико-экономическом обосновании. При этом супеси и лёссовидные суглинки следует использовать для намыва однородных плотин, а также для намыва центральной слабопроницаемой зоны неоднородных плотин. Гравийно-галечниковые грунты – для намыва боковых зон этих плотин.

Для создания грунтовых противофильтрационных устройств (экранов, ядер, понуров, зубьев) следует применять слабопроницаемые глинистые грунты с коэффициентом фильтрации $K_f \leq 0,1$, а также искусственную грунтовую смесь из глинистых, песчаных и крупнообломочных грунтов. Для экранов и понуров плотин III и IV классов допускается применять торф с покрытием из минеральных грунтов.

Для возведения каменно-набросных и каменно-земляных плотин используются крупнообломочные грунты: рваный камень из карьеров, глыбово-щебенистый, валунно-галечниковый и гравийный материалы, удовлетворяющие требованиям по прочности, морозостойкости, химическим свойствам.

4.2.3. Выбор местоположения гидроузла и компоновка сооружений

Выбор местоположения створа гидроузла при заданном составе сооружений осуществляется на основании технико-экономического сравнения вариантов с учетом различных компоновок сооружений. На выбор створа и компоновку сооружений существенное влияние оказывают топографические и инженерно-геологические условия, водность реки, условия строи-

тельства и эксплуатации сооружений. По топографическим условиям следует створ гидроузла располагать в наиболее узком месте балки или речной долины без значительного затопления и подтопления территорий, прилегающих к водохранилищу, а по геологическим условиям – отдавать предпочтение скалистым, плотным глинистым и песчаным основаниям. Расположение водопропускных сооружений должно максимально исключать возможность опасных размывов берегов и подмыва плотины в период их эксплуатации, а также предусматривать возможность использования их для пропуска строительных расходов. На выбор створа гидроузла влияют и строительные факторы: наличие местных грунтовых строительных материалов, возможность возведения гидроузла с минимальными затратами времени, средств и без ущерба окружающей природной среде.

4.2.4. Элементы конструкции плотины

Выбор типа плотины обуславливается топографическими и геологическими условиями в створе и наличием в достаточном количестве необходимого грунта как строительного материала для тела плотины, противодиффузионных устройств и дренажных конструкций, а также схемой организации и технологии работ. Согласно [1, 26] грунтовые плотины подразделяют на четыре типа: земляные насыпные, земляные намывные, каменно-земляные и каменно-набросные.

Ширину гребня плотины принимают в зависимости от условий производства работ, категории и типа дороги, устраиваемой по гребню, но не менее 4,5 м. Ширина земляного полотна принимается для автомобильной дороги I категории 27,5 м; II – 15 м; III – 12 м; IV – 10 м; V – 8 м [24]. Проезжая часть гребня плотин укрепляется одеждой в зависимости от категории дороги. Гребень плотин без дороги специально не укрепляется. Для обеспечения стока атмосферной воды гребень плотин делается с поперечным уклоном в обе стороны от оси. По краям проезжего полотна автомобильной дороги предусматривают обочины или тротуары для пешеходов, а по краям гребня плотины – ограждения (надолбы высотой 1–1,2 м на расстоянии 2–3 м друг от друга, стенки-парапеты). Необходимо и устройство освещения гребня. Пример конструктивного решения гребня плотины представлен в приложении (рис. 1П).

В плотинах средней и большой высоты откосы имеют ломаное очертание (более пологие в нижней части). При переменном заложении откосов объем тела плотины уменьшается.

На откосах плотины (в частности, в местах перелома уклона) устраивают горизонтальные площадки – бермы, которые предназначены для уменьшения среднего уклона откосов, упора одежды (крепления) вышележащей части откоса, безопасного и организованного отвода дождевых вод, проезда подъемно-транспортных средств при производстве каких-либо

работ по креплению откосов (бетонирование, укладка плит и т.п.) и всевозможных ремонтных работ.

Верховой откос плотины испытывает различные нагрузки: гидростатическое давление воды; динамическое давление воды (волновое давление); взвешивающее давление воды; ветровое давление; воздействие атмосферных осадков; температурные воздействия. Для защиты откосов от разрушения применяют различные покрытия в зависимости от класса сооружения, величины и характера нагрузок. Наибольшее распространение получили каменные, бетонные и железобетонные покрытия, реже – асфальтовые и биологические (дёрн, посадка кустов).

Крепление верхового откоса осуществляют в пределах сработки уровня верхнего бьефа и на 2–5 м выше и ниже крайних горизонтов воды.

Откосы малых плотин обычно крепятся каменной наброской по слою обратного фильтра или естественной песчано-гравийной смеси толщиной 15–20 см. Толщина каменной наброски зависит в основном от высоты волны, коэффициента заложения откоса, крупности веса камня. Более надежно крепление верхового откоса из одиночной и двойной каменной мостовой по слою щебеночной или гравелистой подготовки толщиной 15–20 см. Толщина каменной мостовой обычно 25–30 см и более.

Статический расчёт каменного крепления (наброски и мощения) заключается в проверке его устойчивости против взвешивающегося давления, которое возникает при скате волны с откоса.

Верховые откосы высоких плотин и средней высоты обычно крепятся бетонными и железобетонными плитами по слою песчано-гравелистой подготовки. Плиты могут быть монолитные размером от 5×5 до 20×20 м, толщиной от 15...20 до 50 см; бетонируются они непосредственно на откосе плотины.

Крепление откосов может быть выполнено сборными железобетонными плитами размером от 1,5×1,5 до 1,5×3 м, толщиной от 8–10 до 15–20 см.

Габариты и вес сборных железобетонных плит обуславливаются грузоподъемностью подъемно-транспортных механизмов.

Для повышения устойчивости крепления применяют упоры, располагая их в местах перехода к неукрепленному откосу и на бермах. Бермы упрощают устройство упоров и делают их более надежными.

Низовой откос земляных плотин обычно крепится путем посева трав, покрытия дерном по слою растительной земли в 20–30 см. На крупных плотинах низовые откосы крепятся слоем гравия 10–20 см, в более ответственных случаях – одиночной мостовой. В зоне волнения в нижнем бьефе откос плотины крепится аналогично верховому на высоту вкатывания волны и с некоторым запасом.

При назначении заложений откосов нужна высота плотины. В первом приближении она определяется по формуле

$$H_{пл} = \nabla \text{НПУ} - \nabla \text{дна} + (2 \dots 4) \text{ м}, \quad (4.1)$$

где 2...4 м – предварительно назначенное превышение отметки гребня плотины над статическим уровнем воды в верхнем бьефе (ВБ).

После расчетов по определению отметки плотины высота должна быть уточнена. Заложение откосов ($m = \text{ctg } \alpha$) должно обеспечивать их статическую устойчивость. При проектировании земляных плотин высотой более 25–30 м выполняется статический расчет устойчивости откосов независимо от вида основания, а при слабых основаниях – и для плотин высотой более 10 м.

Отметка гребня грунтовой плотины определяют из условий полного исключения перелива воды через него при накате волны и ветровом нагоне по формулам

$$\nabla \text{ГП} = \nabla \text{НПУ} + h_{s \ 1 \%}; \quad (4.2)$$

$$\nabla \text{ГП} = \nabla \text{ФПУ} + h_{s \ 50 \%},$$

где $h_{s \ 1 \%}$ и $h_{s \ 50 \%}$ – превышения гребня плотины над расчетными уровнями воды в ВБ, м;

$\nabla \text{НПУ}$ – отметка нормального подпорного уровня;

$\nabla \text{ФПУ}$ – отметка форсированного подпорного уровня.

Превышение гребня плотины h_s , м, в обоих случаях определяется по формуле [1, 27]

$$h_s = \Delta h_{set} + h_{run \ 1 \%} + a, \quad (4.3)$$

где Δh_{set} – ветровой нагон воды в верхнем бьефе, м;

$h_{run \ 1 \%}$ – высота наката ветровых волн обеспеченностью 1 %, м;

a – запас возвышения гребня плотины, м, которую определяют как большую из величин 0,5 м и $0,1 h_{1 \%}$ ($h_{1 \%}$ – высота волны 1 %-й вероятности превышения).

4.2.5. Дренажные устройства

Дренаж земляных плотин устраивается со стороны низового откоса с целью понижения положения кривой депрессии. Предупреждение размыва низового откоса, отвода фильтрационной воды, проходящей через тело и основание плотины в нижний бьеф, позволяет уменьшить заложение низового откоса и повысить его устойчивость. Это происходит за счет того, что гидравлические сопротивления движению воды в дренаже резко уменьшаются, поэтому происходит падение депрессионной кривой. Пусть фильтра-

ция уменьшается, градиент напора и расход несколько возрастают, однако выход в НБ становится безопасным (в отношении разлива), т.к. материал дренажа и его устройство не допускают вымывания частиц грунта (суффозии).

Дренаж рекомендуется устраивать во всех типах плотин и при различной их высоте. При надлежащем обосновании допускается не устраивать дренаж в следующих случаях:

1. В плотинах на водонепроницаемом основании и при низком стоянии уровня грунтовых вод.

2. В невысоких однородных земляных плотинах с напором до 5 м из глинистых грунтов с числом пластичности $W_n \geq 10$ при механическом уплотнении грунта.

3. В плотинах, низовой клин которых устроен из каменной наброски или крупнозернистых материалов.

Дренаж состоит из двух основных частей: приемной – в виде обратного фильтра из одного или нескольких слоев и отводящей – для отвода воды из тела плотины в нижний бьеф. Обратный фильтр не допускает вымыва частиц грунта из тела плотины. Отводящая часть включает в себя и выпуски из дренажа в НБ.

По конструкции и расположению в теле плотины различают несколько типов дренажа (рис. 4.13). Тип дренажа устанавливается в зависимости от величины фильтрационных расходов и режима уровней НБ.

Размеры дренажей определяют с помощью гидравлических и фильтрационных расчетов с учетом возможности их выполнения в производственных условиях современными техническими средствами. Исходя из этого минимальные размеры отдельных элементов дренажей принимают следующими: ширина дренажных лент 0,4–0,5 м; толщина слоев обратного фильтра 0,15–0,2 м; диаметр дренажных труб 0,15–0,2 м; коэффициент заложения откосов дренажных призм, слоев, кюветов – не менее 1. Простейший дренаж низового клина плотины в виде трехгранной призмы осуществляется: а) при устройстве на водонепроницаемом основании; б) при наличии фильтрации через грунты основания.

Дренажный банкет устраивают из каменной наброски. Кроме основного своего назначения, он является упором низового откоса плотины. С внутренней стороны дренажного банкета, примыкающей к телу плотины, и в основании его укладывается обратный фильтр из слоев песка и гравия, щебня, или других фильтрующих материалов, например минерального волокна, пористого бетона.

В плотинах из суглинистых грунтов обратный фильтр можно устраивать из одного слоя гравия или щебня. Общая толщина обратного фильтра из одного или двух слоев принимается 0,2–0,4 м.

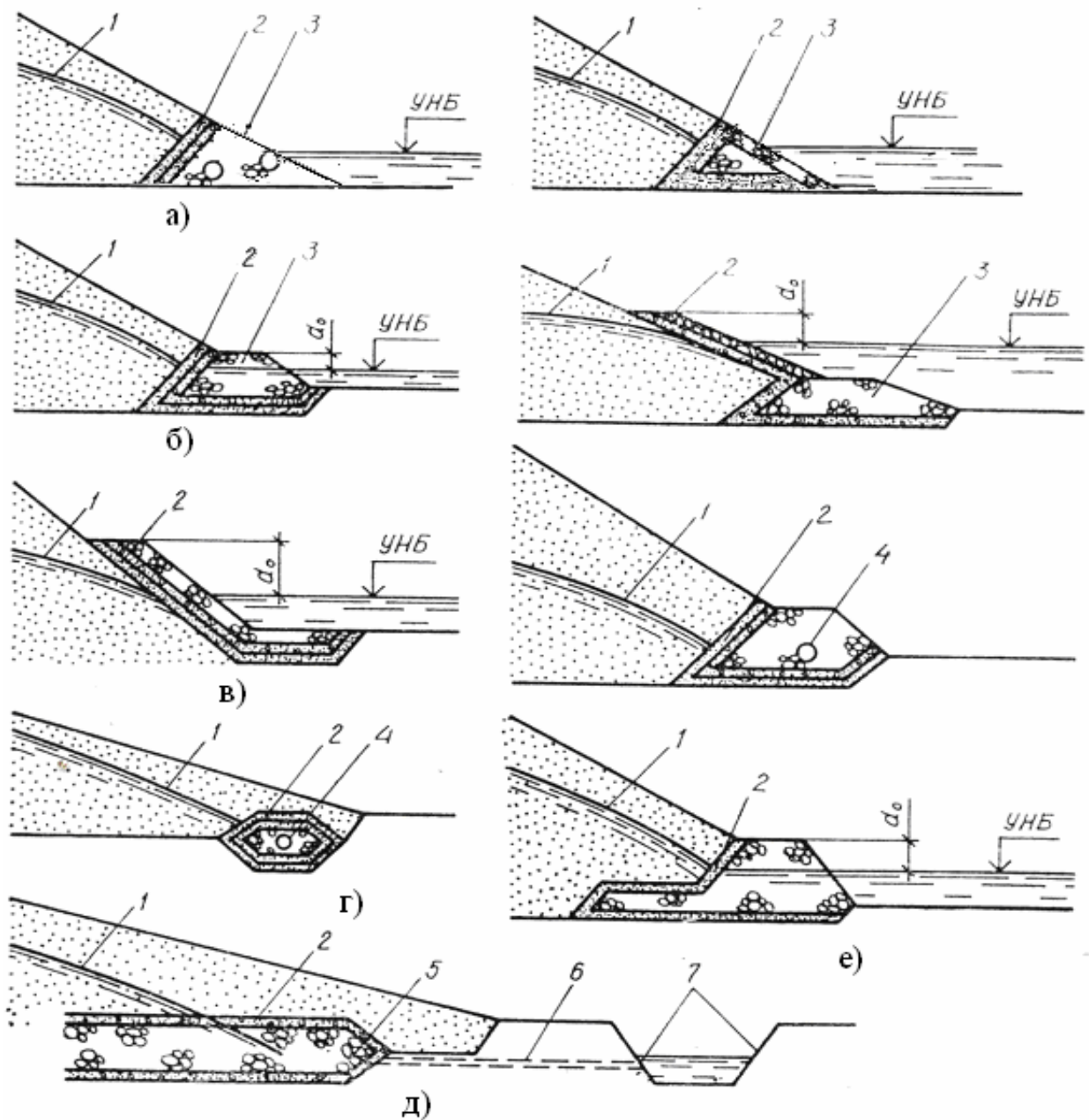


Рис. 4.13. Схемы основных типов дренажей:
 а – простейший дренаж; б – дренажный банкет; в – наслойный дренаж;
 г – трубчатый; д – горизонтальный; е – комбинированный; 1 – кривая депрессии;
 2 – обратный фильтр; 3 – банкет; 4 – труба; 5 – дренажная лента;
 6 – отводящая труба; 7 – отводящая канава

Верх дренажного банкета должен возвышаться над максимальным уровнем воды в нижнем бьефе не менее чем на $d_0 = 0,5$ м. Коэффициент внутреннего откоса дренажной призмы принимается $m_4 = m_5 = 1 \dots 1,5$. Ширина банкета поверху принимается по условиям производства работ, но не менее 1 м. Дренажный банкет можно устраивать без бермы. Тогда наружный откос дренажного банкета располагается заподлицо с низовым откосом плотины.

Наслонный дренаж выполняется на участках плотины, перекрывающих затопленную пойму, и при отсутствии на месте достаточного количества камня. Толщина наслонного дренажа принимается по условиям работ, но не менее

$$t_g = (2,5 \dots 3) D_{ш} + \delta_{обр.ф}, \quad (4.14)$$

где $D_{ш}$ – диаметр приведенного к шару камня (определяется как для крепления верхового откоса);

$\delta_{обр.ф}$ – толщина обратного фильтра.

Превышение гребня наслонного дренажа d_0 над максимальным уровнем нижнего бьефа принимается как для дренажного банкета с учетом высоты выклинивания фильтрационного потока на низовой откос плотины.

При отсутствии камня или других грунтовых материалов устраивается *трубчатый дренаж* из гончарных, бетонных или асбестоцементных труб. Трубы делаются перфорированными с обсыпкой обратным фильтром или с незаделанными стыками. Диаметр труб устанавливается гидравлическим расчетом исходя из условия обеспечения безнапорного движения воды в трубах, но не меньше 0,2 м. Трубы укладываются в тело плотины вдоль низового откоса на расстоянии от его подошвы не больше 1/4–1/3 ширины плотины по основанию и не меньше глубины промерзания. Вокруг дренажной трубы укладывается сначала слой гравия или щебня, затем слой песка. Общая толщина слоев 0,4–0,6 м.

Для отвода воды из трубчатого дренажа в нижний бьеф по длине плотины устраиваются отводящие дрены (коллекторы), выходящие в кювет, который проходит параллельно подошве плотины. Расстояние между отводящими дренами устанавливается на основании гидравлического расчета с учетом расхода дренажных вод и пропускной способности отводящих дрен.

В однородных земляных плотинах на маловодопроницаемом основании при отсутствии воды в НБ можно устраивать *горизонтальный дренаж* из гравия или щебня с песком. Толщина плоского дренажа бывает в среднем 0,5 м, ширина принимается 1/4–1/3 ширины плотины по низу. *Комбинированный дренаж* применяется в случае частого повышения уровня НБ во избежание выхода депрессионной кривой на откос. Он может быть в виде дренажной призмы и наслонного дренажа, в виде плоского горизонтального дренажа в сочетании с наслонным дренажем и др.

Дренаж в виде дренажной призмы и наслонного дренажа устраивают, если максимальный уровень воды в нижнем бьефе поднимается выше верха дренажной призмы. В этом случае верх наслонного дренажа располагается выше максимального уровня воды на 0,5–1 м. Комбинированный

плоский горизонтальный дренаж в сочетании с наклонным дренажем устраивают при небольшой фильтрации через тело плотины и при наличии воды в НБ, недостаточном количестве камня на месте строительства.

Обратные фильтры устраиваются на контакте дренажа или пригрузки и дренируемого тела плотины или ее основания, если оно водопроницаемое. Основное назначение обратных фильтров – предотвращать опасную механическую суффозию из защищаемого мелкозернистого грунта. Гранулометрический состав обратного фильтра подбирается так, чтобы обеспечивались:

- предотвращение опасного для прочности и устойчивости защищаемого грунта развития механической суффозии в области, примыкающей к фильтру;

- непроницаемость частиц скелета защищаемого грунта в фильтр, а также непроницаемость частиц скелета самого фильтра в дренаж или каменную наброску;

- предотвращение опасной для прочности и устойчивости фильтра механической суффозии в самом слое фильтра;

- некольматируемость фильтра мелкими частицами, выносимыми фильтрационным потоком из защищаемого грунта.

Основными задачами проектирования обратных фильтров являются:

- выбор естественных карьерных или искусственных грунтов, пригодных для устройства обратных фильтров;

- определение гранулометрического состава первого и последующих слоев обратного фильтра;

- определение водопроницаемости обратного фильтра;

- установление толщины и числа слоев обратного фильтра.

Для устройства обратных фильтров применяется лишь несвязные естественные или искусственные материалы твердых и плотных каменных пород, не содержащие водорастворимых солей.

По условиям производства работ толщину слоев фильтра следует принимать:

- при ручной укладке (при планировке и уплотнении) – 10 см;

- при механизированной укладке – 20 см;

- при отсыпке фильтра в текущую воду или однослойного фильтра – не менее 0,75 м; для двухслойного и более каждый последующий слой должен быть не менее 0,5 м (по нормам).

Тип дренажа, число слоев обратного фильтра и их состав окончательно определяют на основе технико-экономического сравнения вариантов конструкции.

4.2.6. Сопряжение тела земляной плотины с основанием, берегами и бетонными сооружениями

Плотина не обеспечит своего назначения, если не будет правильно решен вопрос сопряжения ее с основанием, берегами и гидротехническими сооружениями гидроузла. Сопряжение земляной плотины во всех случаях должно быть плотным (водонепроницаемым) и надежным.

Далее рассматриваются возможные конструктивные схемы сопряжения земляной плотины с основанием при устройстве той или иной водонепроницаемой (экран, ядро, диафрагма) и других конструкций.

Тело плотины должно плотно примыкать к основанию и берегам. В основании тела плотины снимается и удаляется верхний растительный слой, обычно сильно фильтрующий и теряющий прочность при намокании. Глубина этого слоя обычно бывает 0,3–0,4 м. При залегании водонепроницаемого грунта на небольшой глубине врезка плотины (зуба) осуществляется до непроницаемого слоя.

На нескальных грунтах для пресечения возможной фильтрации через сильно фильтрующие прослойки и ходы землероев в основании плотины, примерно под бровкой верхового откоса плотины, из того же грунта, что и тело плотины, устраивается зуб. При помощи зуба с основанием сопрягаются экраны, ядра, диафрагмы.

На скальных грунтах сопряжение с основанием выполняется при помощи зуба, а если основание трещиноватое, то под зубом делается цементационная завеса. Сопряжение тела плотины с берегами следует делать в виде наклонных плоскостей с горизонтальными или наклонными уступами (рис. 4.14, а). Сопряжение уступами с вертикальными плоскостями (рис. 4.14, б) не рекомендуется, так как при таком сопряжении в связи с резкими изменениями высоты могут возникать вертикальные трещины в теле плотины.

Экраны, ядра, диафрагмы, шпунты заглубляются до водонепроницаемого грунта берега или на такое расстояние, чтобы фильтрация в обход их и тела плотины была неопасна.

Сопряжение с поверхностями (плоскостями) бетонных, деревянных сооружений является слабым местом, облегчающим контактную фильтрацию воды. При сопряжении тела плотины со стенками сооружений из других материалов скорости течения фильтрующейся вдоль сооружения воды должны быть безопасными, кроме того, должна быть обеспечена плотность примыкания грунта тела плотины к стенкам. Для получения безопасных скоростей течения воды, фильтрующейся из верхнего бьефа в нижний, должна быть создана надлежащая длина пути фильтрации. Это достигается устройством открылков в стенках, а также бетонных, железобетонных или стальных диафрагм и шпор (рис. 4.15). Диафрагмы и шпоры соединяются с боковой стенкой сооружения при помощи шва с уплот-

нением. Для обеспечения плотного примыкания грунта тела земляной плотины к боковым стенкам сооружения внутренним поверхностям последних необходимо придавать небольшой наклон.

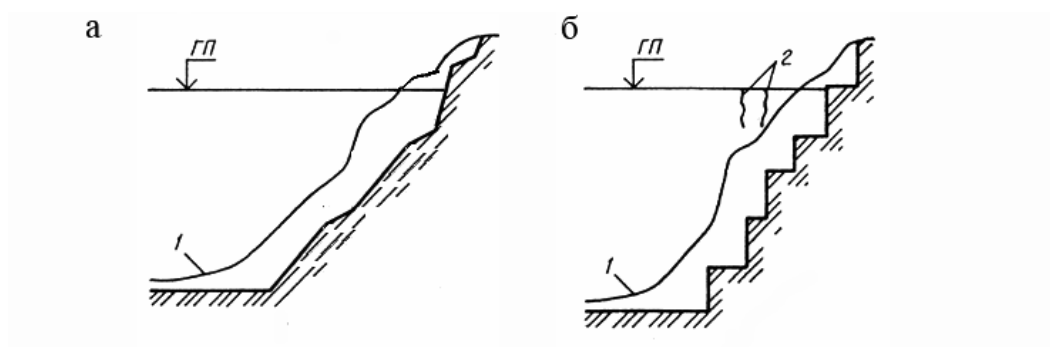


Рис. 4.14. Схемы сопряжения тела плотины с берегами:
 а – в виде наклонных плоскостей с короткими горизонтальными уступами;
 б – уступами с вертикальными плоскостями;
 1 – естественная поверхность берега; 2 – трещины

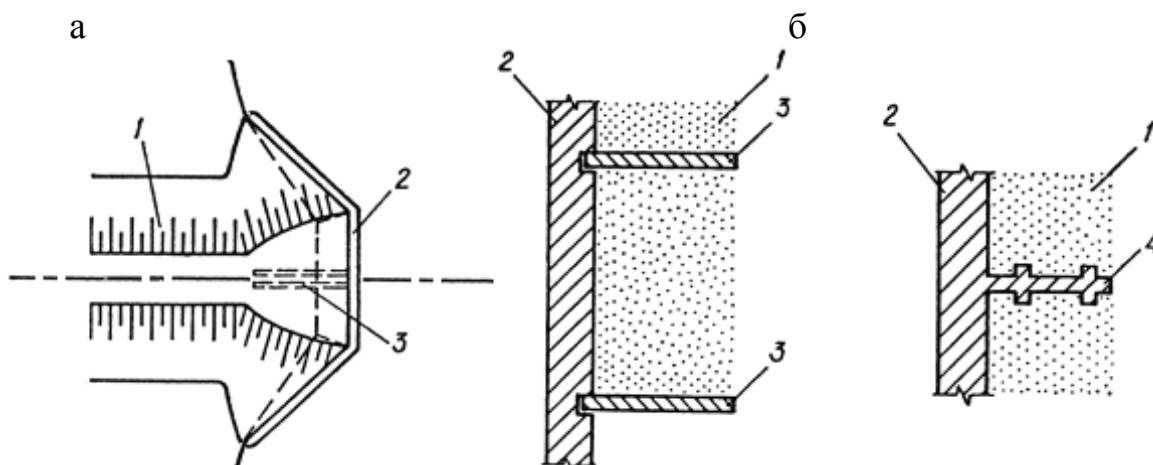


Рис. 4.15. Схемы сопряжения тела земляной плотины со стенками сооружений из других материалов:
 а – план плотины; б – разрез;
 1 – земляная плотина; 2 – стенка сооружения;
 3 – диафрагма; 4 – шпора

4.3. Фильтрационные расчеты тела плотины

4.3.1. Общие положения

Одним из основных этапов проектирования земляных плотин является фильтрационный расчет.

Исследования фильтрации земляных плотин получили отражение в трудах советских ученых. Параллельно развивались гидромеханические и

гидравлические методы расчета фильтрации плотины как на водонепроницаемых, так и на водопроницаемых основаниях.

Гидромеханические методы более точные, они позволяют определить скорости фильтрации, давление и расход в любой точке профиля плотины. Однако получение гидромеханических решений связано с большим объемом математических расчетов, поэтому такие методы используются лишь для простых конструктивных схем плотин.

Гидравлические методы решения фильтрации, широко применяющиеся в настоящее время, имеют ряд допущений, упрощений, но и они с достаточной для практики точностью позволяют определять средние скорости фильтрации, положение депрессионной кривой, фильтрационный расход через плотину.

Фильтрационный расчет проводится с целью:

1) определения положения в плотине кривой депрессии (депрессионной поверхности), которая делит плотину на две зоны: ниже кривой депрессии – в грунте движется фильтрационный поток и частицы грунта находятся во взвешенном состоянии; выше кривой депрессии – грунт находится в состоянии естественной влажности;

2) определения фильтрационных градиентов в теле и основании плотины с целью недопущения фильтрационных деформаций в грунте и обоснования наиболее рациональных и экономичных форм, размеров и конструкций плотины, ее противофильтрационных и дренажных устройств;

3) определения фильтрационного расхода воды через плотину и основание с целью последующей оценки фильтрационных потерь из водохранилища и в случае необходимости разработки тех или иных мероприятий для снижения фильтрационных потерь.

Фильтрационные расчеты выполняются для условий плоской задачи для максимальных напоров и, в частности, для русловой плотины при соотношении уровней воды в бьефах: \downarrow НПУ – \downarrow СНУВНБ; грунт тела плотины считают однородно-изотропным, т.е. значение коэффициента фильтрации в любых точках области фильтрации и во всех направлениях принимают постоянным; при наличии водоупора в основании плотины его считают условно водонепроницаемым.

Один грунт k_1 по отношению к другому k_2 считается водонепроницаемым, если

$$\frac{k_1}{k_2} > 80 \dots 100.$$

Водонасыщенная зона тела земляной плотины образует область фильтрации, имеющую границы (граничные условия). Можно выделить 5 граничных участков области фильтрации (рис. 4.16):

$$h_1 = \frac{L_p}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{m_2}\right)^2 - (H_1 - H_2)^2} + H_2. \quad (4.19)$$

Ординаты кривой депрессии находят по уравнению

$$y = \sqrt{H_1^2 - \frac{H_1^2 - h_1^2}{L - m_2 \cdot h_1} \cdot x}, \quad (4.20)$$

- где q – удельный фильтрационный расход, $\text{м}^3 / \text{сут} \cdot \text{м}$;
 k_ϕ – коэффициент фильтрации грунта тела плотины, $\text{м} / \text{сут}$;
 H_1 – глубина воды в ВБ, м ;
 H_2 – глубина воды в НБ, м ;
 h_1 – ордината кривой депрессии в месте выхода ее на низовой откос, м ;
 m_1 и m_2 – коэффициенты заложения соответственно верхового и низового откосов;
 L – расстояние от оси ординат до подошвы низового откоса, м ;
 ΔL_b – расстояние от оси ординат до раздельного сечения, м ;
 h_s – превышение гребня плотины над расчетным уровнем воды в ВБ, м ;
 x и y – переменные абсцисса и ордината.

Задаваясь различными значениями x , по уравнению (4.20) определяем соответствующие значения y .

По полученным точкам строят кривую депрессии (рис. 4.17).

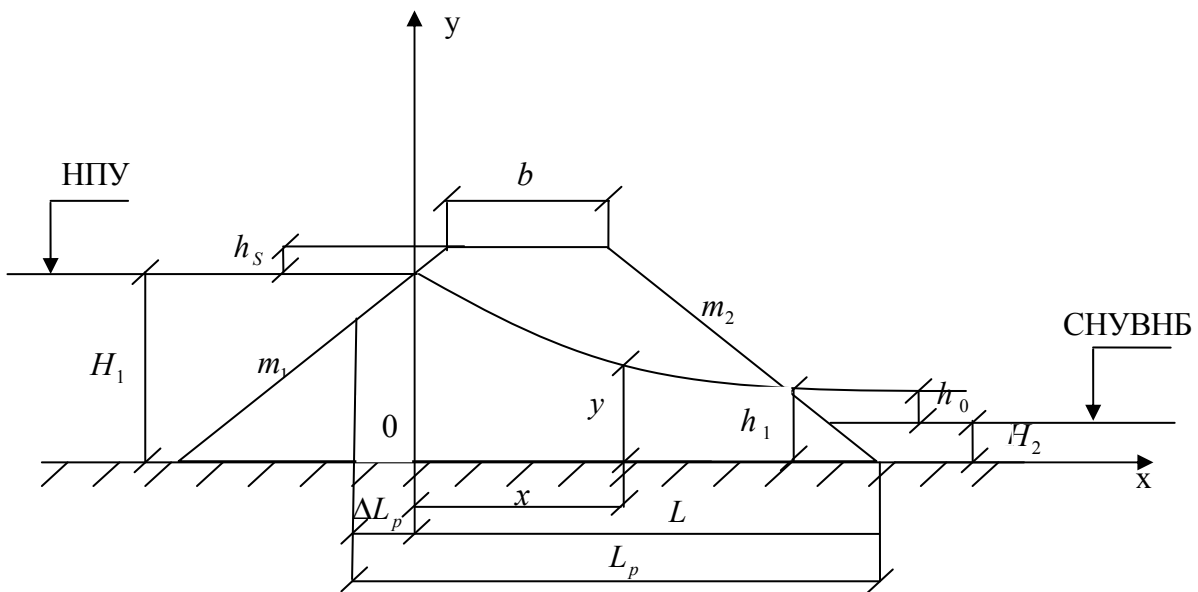


Рис. 4.17. Схема к расчету фильтрации через однородную плотину

При отсутствии воды в НБ расчет фильтрации ведут аналогично. Вместо уравнений (4.15) и (4.19) используют уравнения:

$$h_1 = \frac{L_p}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{m_2}\right)^2 - H_1^2}; \quad (4.21)$$

$$\frac{q}{k_\phi} = \frac{H_1^2}{2 \cdot (L_p - m_2 \cdot h_1)}. \quad (4.22)$$

4.3.3. Расчет фильтрации через грунтовую однородную плотину с дренажным банкетом при наличии воды в НБ на водонепроницаемом основании

Расчет фильтрации ведем по уравнениям:

$$\frac{q}{k_\phi} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \cdot L_p}; \quad (4.23)$$

$$L_p = L + \Delta L_b + \Delta L_n; \quad (4.24)$$

$$L = h_s \cdot m_1 + b + m_2(H_1 + h_s - h_d) - m_3 \cdot h_d; \quad (4.25)$$

$$\Delta L_n = m_3 \cdot \frac{H_2}{3}, \quad (4.26)$$

где m_3 – коэффициент заложения верхового откоса дренажной призмы.

ΔL_b определяется по уравнению (4.18).

$$y = \sqrt{H_1^2 - \frac{H_1^2 - h_c^2}{L} \cdot x}; \quad (4.27)$$

$$h_c = \sqrt{H_1^2 - 2 \cdot (L + \Delta L_b) \frac{q}{k_\phi} + H_2^2},$$

где h_c – ордината кривой депрессии над подошвой верхового откоса дренажной призмы, м.

При отсутствии воды в НБ расчет выполняют по уравнениям (4.15)–(4.20), а ордината h_c определяется по выражению

$$h_c = f(m_3) \frac{q}{k_\phi}, \quad (4.28)$$

в котором $f(m_3)$ принимают в зависимости от коэффициента m_3 .

m_3	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$f(m_3)$	0,74	0,86	0,94	0,98	1,0

Далее по полученным значениям строим кривую депрессии (рис. 4.18).

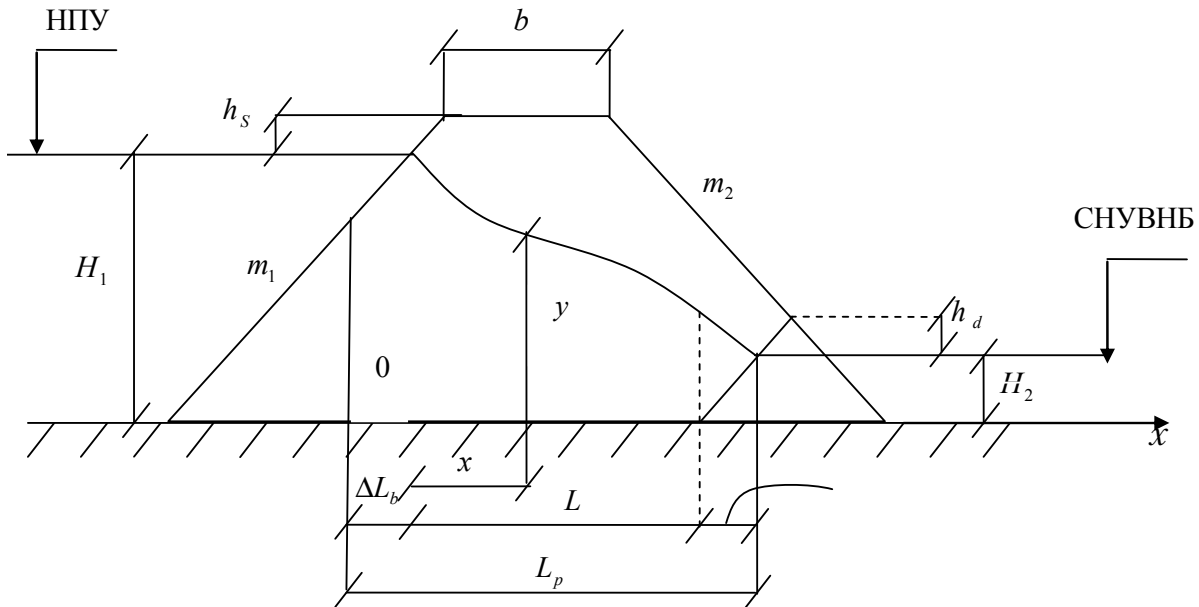


Рис. 4.18. Схема к расчету фильтрации через однородную плотину с дренажной призмой

4.3.4. Расчет фильтрации через грунтовую однородную плотину с ядром при наличии воды в НБ на водонепроницаемом основании

Плотину такой конструкции приводят к однородной плотине (к однородной с наслойным дренажом, с дренажной призмой и т.д.) по способу виртуальных длин. Заменяют толщину действительного ядра толщиной приведенного (виртуального) ядра, используя зависимость

$$\delta_{пр} = \delta_c \cdot \frac{k_{\phi}^T}{k_{\phi}^Я}, \quad (4.29)$$

где $\delta_{пр}$ – приведенная толщина ядра, м;

δ_c – средняя толщина действительного ядра, м:

$$\delta_c = \frac{\delta_в + \delta_н}{2}; \quad (4.30)$$

k_{ϕ}^T и $k_{\phi}^Я$ – коэффициенты фильтрации соответственно грунта тела плотины и ядра, м/сут;

$$\frac{k_{\phi}^T}{k_{\phi}^Я} \approx 80 - 100.$$

Дальнейший расчет фильтрации проводится соответственно для однородной плотины, плотины с дренажной призмой и т.д. по вышеприведен-

ным зависимостям и схемам. При расчете фильтрации через грунтовую однородную плотину с экраном можно применить расчет по методу виртуальных длин (рис. 4.19) (как и для ядра).

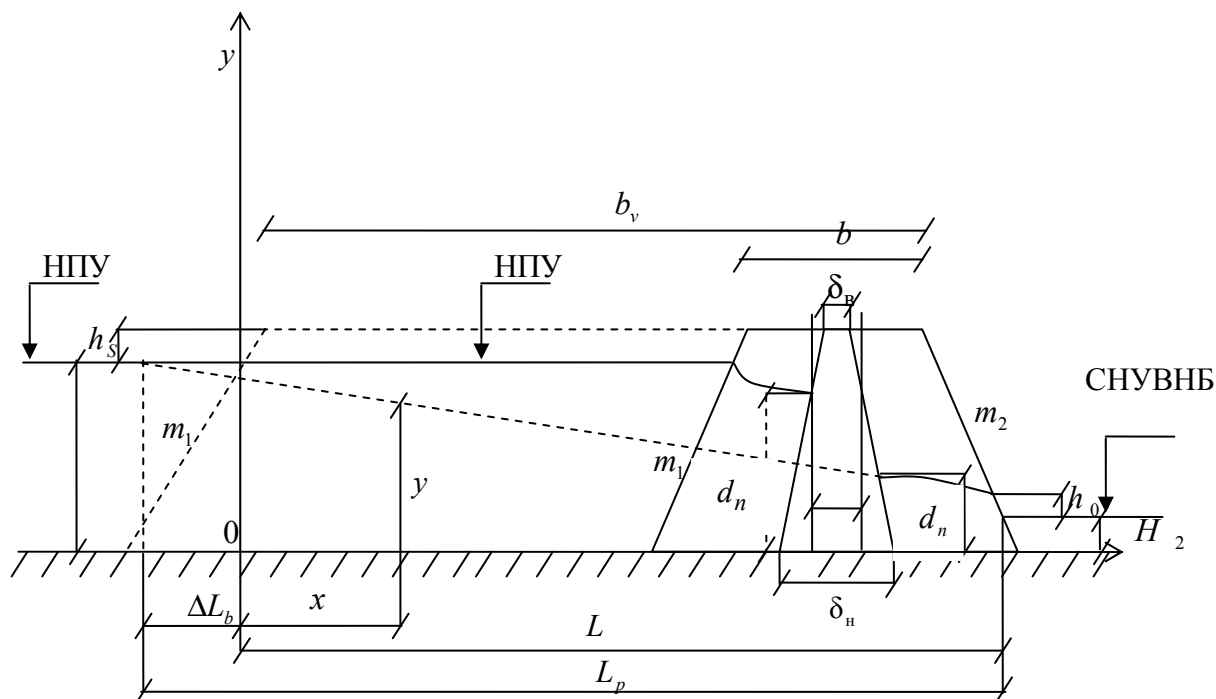


Рис. 4.19. Схема к расчету через грунтовую плотину с ядром

4.3.5. Расчет фильтрации через однородную грунтовую плотину с трубчатым дренажом без воды в НБ на водонепроницаемом основании

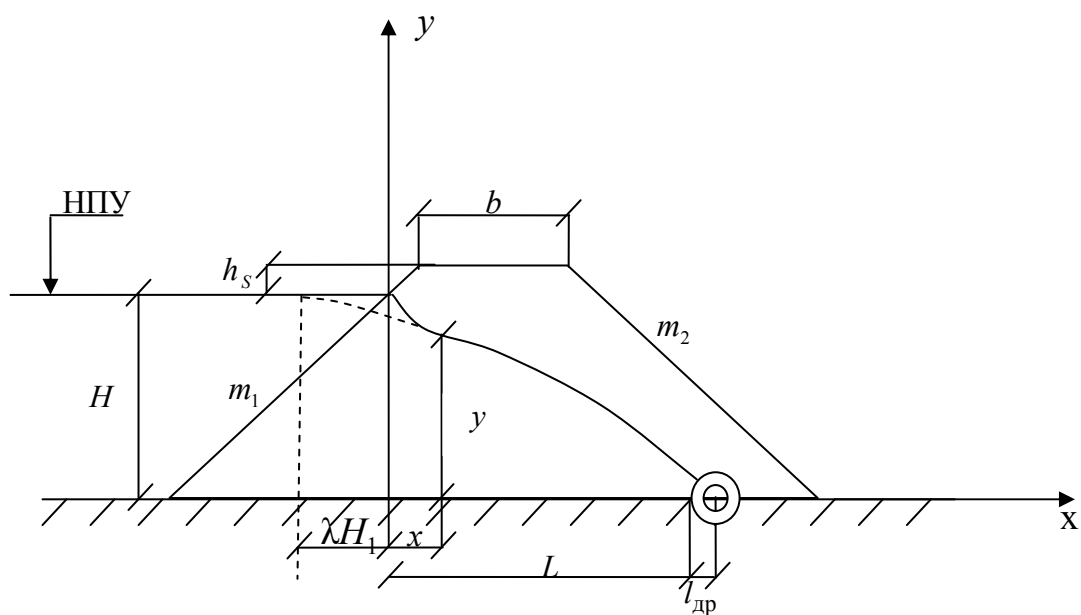


Рис. 4.20. Схема к расчету через грунтовую плотину с трубчатым дренажом

Фильтрационный расход:

$$q = \frac{k_{\phi} \cdot H_1^2}{2(L + \lambda \cdot H_1)}. \quad (4.31)$$

Уравнение кривой депрессии (рис. 4.20):

$$y = \sqrt{2 \cdot \frac{q}{k_{\phi}} (L + l_{\text{др}} - x)}. \quad (4.32)$$

$$\lambda = m_1(1 + 2 \cdot m_1); \quad l_{\text{др}} \approx 0,5 \cdot \frac{q}{k_{\phi}}.$$

Депрессионная кривая исправляется визуально в зоне, где $y \geq H_1 - \frac{q}{k_{\phi}}$.

4.3.6. Расчет фильтрации через грунтовую однородную плотину с дренажным банкетом при наличии воды в НБ на водопроницаемом основании

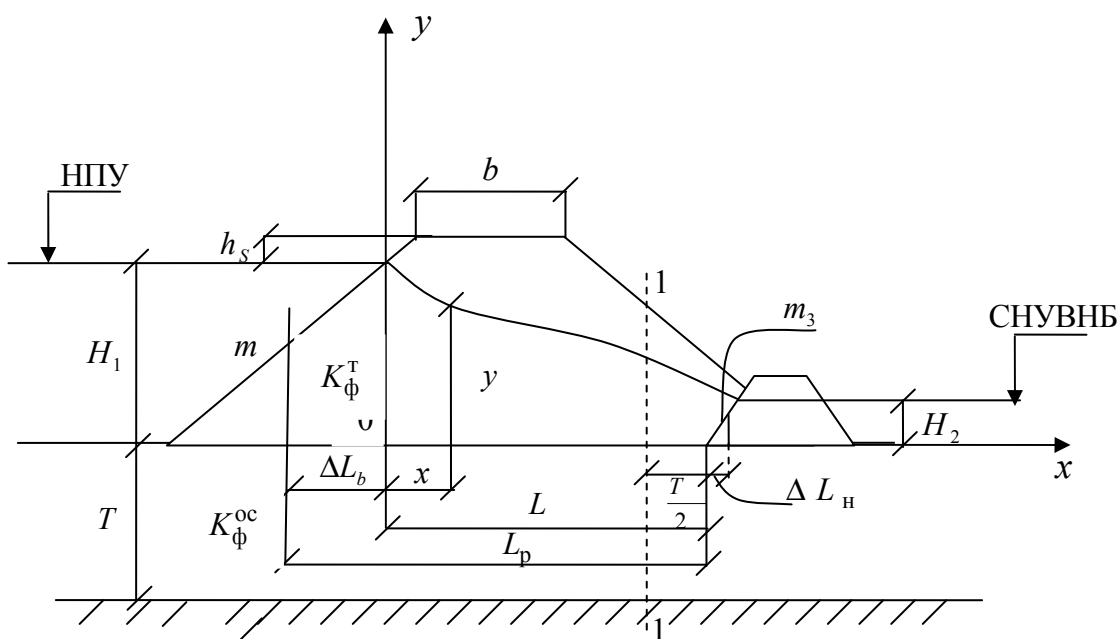


Рис. 4.21. Схема к расчету через плотину с дренажной призмой

Расчет удельного расхода производится по уравнению

$$\frac{q}{k_{\phi}^T} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \cdot L_p + \Delta L_n} + \frac{(H_1 - H_2) \cdot T}{L_p + 0,4 \cdot T}, \quad (4.33)$$

где $L_p = L + \Delta L_B$; $\Delta L_B = 0,4(H_1 + T)$; $\Delta L_n = \frac{m_3 \cdot H_2}{3}$.

Ординаты кривой депрессии между сечением 1-1 и дренажом (рис. 4.21) находятся по формуле

$$y = \sqrt{h_c^2 - (h_c^2 - H_2^2) \cdot \frac{x - L + \frac{T}{2}}{\frac{T}{2} + \Delta L_n}}, \quad (4.34)$$

а между осью ординат и сечением 1-1

$$y = \sqrt{H_1^2 - \frac{H_1^2 - h_c^2}{L - \frac{T}{2}} \cdot x}, \quad (4.35)$$

где h_c – ордината кривой депрессии в сечении 1-1, определяемая по зависимости:

$$h_c = \sqrt{(H_1 + T)^2 - 2 \cdot \frac{q}{k_{\Phi}^T} \cdot (L_p - \frac{T}{2}) - T}, \quad (4.36)$$

где L – расстояние от оси ординат до подошвы внутреннего откоса дренажа, м, вычисляемое по уравнению (4.11);

T – мощность водопроницаемого слоя, м.

В случае отсутствия воды в НБ расчет фильтрации ведем по уравнениям (4.34–4.36), принимая $H_2 = 0$.

Расчет удельного расхода производится по уравнению

$$\frac{q}{k_{\Phi}^T} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \cdot L_p + \Delta L_n} + \frac{(H_1 - H_2) \cdot T}{L_p + 0,4 \cdot T}, \quad (4.37)$$

где $L_p = L + \Delta L_{\text{в}}; \Delta L_{\text{в}} = 0,4(H_1 + T); \Delta L_n = \frac{m_3 \cdot H_2}{3}. \quad (4.38)$

Во всех фильтрационных расчетах плотин из грунтовых материалов, кроме удельного фильтрационного расхода, необходимо знать общий расход фильтрационного потока через тело и основание плотины. Для этого плотину разбивают по длине на ряд участков длиной l_1, l_2, l_3 и т.д. (рис. 4.22).

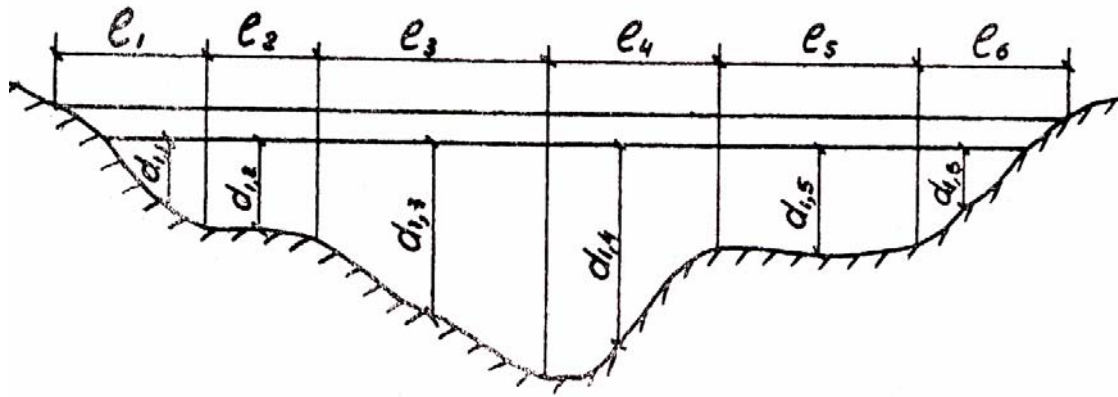


Рис. 4.22. Расчетная схема определения общего расхода фильтрационного потока через тело грунтовой плотины

Сначала по приведенным выше формулам вычисляют расходы для каждого участка отдельно в зависимости от типа и конструкции плотины: q_1, q_2, q_3 и т.д. Общий расход через тело и основание плотин будет равен

$$Q = q_1 \cdot l_1 + q_2 \cdot l_2 + \dots + q_n \cdot l_n. \quad (4.39)$$

Оценку фильтрационной прочности грунтов тела и противофильтрационных устройств выполняют в зависимости от наибольшего напора, действующего на плотину, по формуле

$$J_{lst,m} = \frac{J_{cr,m}}{\gamma_n}, \quad (4.40)$$

где $J_{lst,m}$ – действующий средний градиент напора в расчетной области фильтрации;

$J_{cr,m}$ – критический средний градиент, зависящий от грунта;

γ_n – коэффициент надежности, определяемый классом сооружения.

Оценка фильтрационной прочности грунтов основания определяется величиной градиента на выходе фильтрационного потока из основания за пределами тела плотины $J_{вых}$, который сравнивается с допустимым, определяемым в зависимости от коэффициента разнотерности грунта основания.

4.4. Расчет устойчивости плотины

4.4.1 Общие требования к устойчивости плотин

Земляные плотины имеют настолько значительный вес, что нет необходимости делать проверку устойчивости самой плотины на сдвиг. Неустойчивыми могут оказаться откосы плотин, крутизна которых существенно влияет на объем и стоимость плотины, поэтому оправдано стремление устраивать откосы с возможно меньшими заложениями.

Предельная крутизна откосов для несвязных (сыпучих) грунтов соответствует углу их внутреннего трения J . Если угол наклона откоса больше этой величины, то обрушение будет происходить в виде перемещения грунта по плоскости, наклонной к горизонту под углом внутреннего трения.

Сползание откоса, сложенного из связных грунтов, т.е. грунтов, обладающих силами трения и сцепления, может произойти как на всем его протяжении, так и на отдельном участке. Кривая обрушения близка к дуге окружности.

Для расчета устойчивости откоса земляных плотин предложено несколько методов, основанных на двух разных теориях: теория «предельного равновесия», согласно которой считается, что во всех точках сдвигающейся массы грунта существует предельное равновесие, и теории, которая основывается на использовании модели отвердевшего отсека обрушения грунта.

В инженерной практике чаще применяют вторую теорию. В основу расчета по этой теории положены следующие соображения и допущения:

- поверхность обрушения АВ (рис. 4.23), по которой под действием соответственного веса грунта Q может произойти его сползание, принимается криволинейной, круглоцилиндрической, описанной радиусом R из центра вращения;

- сползающая масса отсека обладает как силой трения, так и силой сцепления.

В проектной практике применяются и другие методы расчета:

- горизонтальных сил взаимодействия при круглоцилиндрической поверхности скольжения;

- горизонтальных сил взаимодействия при ломаной поверхности скольжения;

- наклонных сил взаимодействия при ломаной поверхности скольжения;

- весового давления круглоцилиндрической поверхности скольжения для откосов плотин при $m \geq 1,7$;

– равновесия моментов при круглоцилиндрической поверхности скольжения для откосов плотин при $m \leq 2,5$.

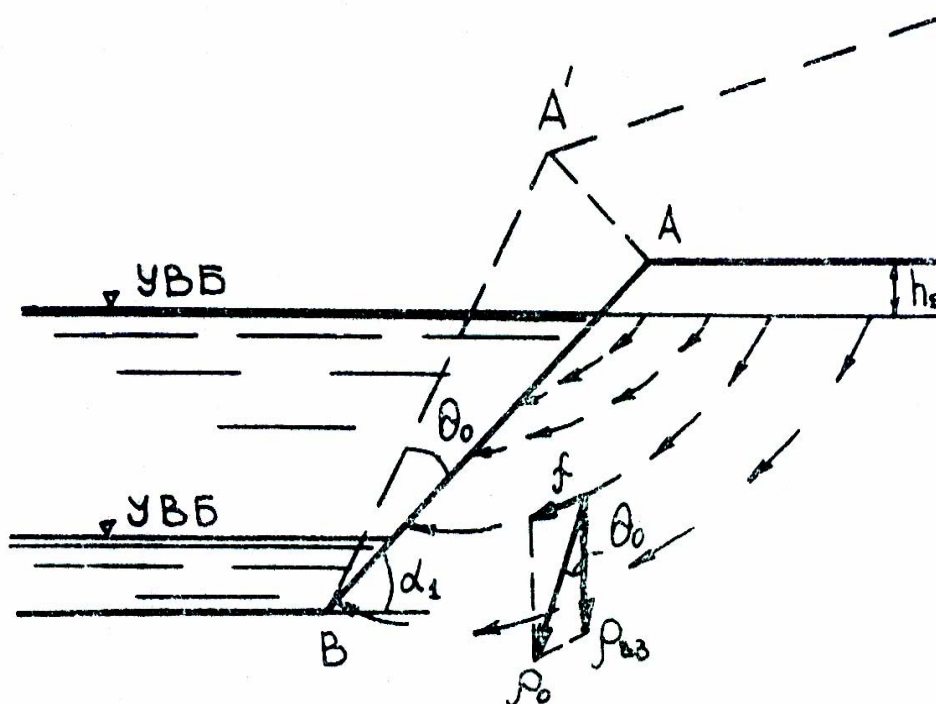


Рис. 4.23. Влияние снижения уровня воды на устойчивость откоса

Основные расчетные случаи для низового и верхового откосов даны в п.5.12 [26]. Следует учитывать снижения уровня воды, так как это ведет к явлению «обратной» фильтрации.

4.4.2. Расчет устойчивости откосов

Сначала оценим устойчивость верхнего и низового откосов в сравнении:

– верховой откос обычно положе низового ($m_1 > m_2$), а потому и устойчивее к обрушению;

– на верховой откос вода давит, «прижимая» грунт внутрь.

Низовой же откос более крутой, и часто считают, что если устойчив низовой откос, то верховой – тем более.

Расчет устойчивости верхового откоса выполняется для случаев:

1) принимается максимально возможное снижение уровня воды в водохранилище от НПУ или от подпорного уровня, соответствующего пропуску максимального расхода, относимого к основным сочетаниям воздействий, с наибольшей возможной скоростью; при этом учитываются силы неустановившейся фильтрации;

2) уровень воды в верхнем бьефе находится на самой низкой отметке, но не ниже $0,2 H$, где H – высота откоса; уровень грунтовой воды в теле плотины принимается на той же отметке, что и уровень воды в водохранилище;

3) принимается максимально возможное снижение уровня воды в верхнем бьефе с наибольшей возможной скоростью, начавшееся от ФПУ; при этом учитываются силы неустановившейся фильтрации.

Расчет устойчивости низового откоса плотин выполняется для случаев:

1) в верхнем бьефе стоит нормальный подпорный уровень (НПУ), дренажи работают нормально, в теле плотины – установившаяся фильтрация; при наличии воды в нижнем бьефе глубина ее принимается максимально возможной, но не более $0,2 H$, где H – высота откоса; при большей глубине в расчетах она принимается равной $0,2 H$;

2) подпорный уровень и уровень нижнего бьефа определяются максимальным расходом, относимым к основным сочетаниям нагрузок и воздействий (случай водосбросов без затворов);

3) в верхнем бьефе форсированный подпорный уровень воды.

Среди многих существующих методов расчета устойчивости откосов наибольшее распространение получил метод расчета по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, в свою очередь имеющий много разновидностей. При выполнении расчетов этими методами следует иметь в виду их приближенность. Поэтому при окончательном выборе устойчивого профиля земляных плотин необходимо учитывать опыт эксплуатации построенных сооружений, конструктивные и строительные соображения.

Устойчивость откосов однородных земляных плотин приближенно можно рассчитывать по графику (рис. 4.24), принимая при этом, что оползание откоса под действием собственного веса будет происходить по круглоцилиндрической поверхности. Установив на основании полевых или лабораторных исследований удельный вес грунта γ_r , кН/м³, угол внутреннего трения грунта откоса φ° , кН/м³, удельное сцепление c , кПа, и зная высоту откоса H , м, по графику (рис. 4.24) находят угол безопасного откоса α° , предварительно определив величину c ($\gamma_r H$). Для предварительных расчетов значения φ и c можно принимать по табл. 1П.

По графику (см. рис. 4.24) можно решать следующие задачи: предварительно задавшись уклоном откоса, проверять, будет ли откос устойчив; определять предельную высоту откоса при данном его уклоне; находить уклон откоса при данной его высоте.

Обычно откосы земляных плотин сложены неоднородными по составу грунтами, даже в плотинах из однородного грунта. Это объясняется тем, что в однородных плотинах грунт, лежащий ниже поверхности депрессии, имеет иной удельный вес и сцепление, чем вышележащий.

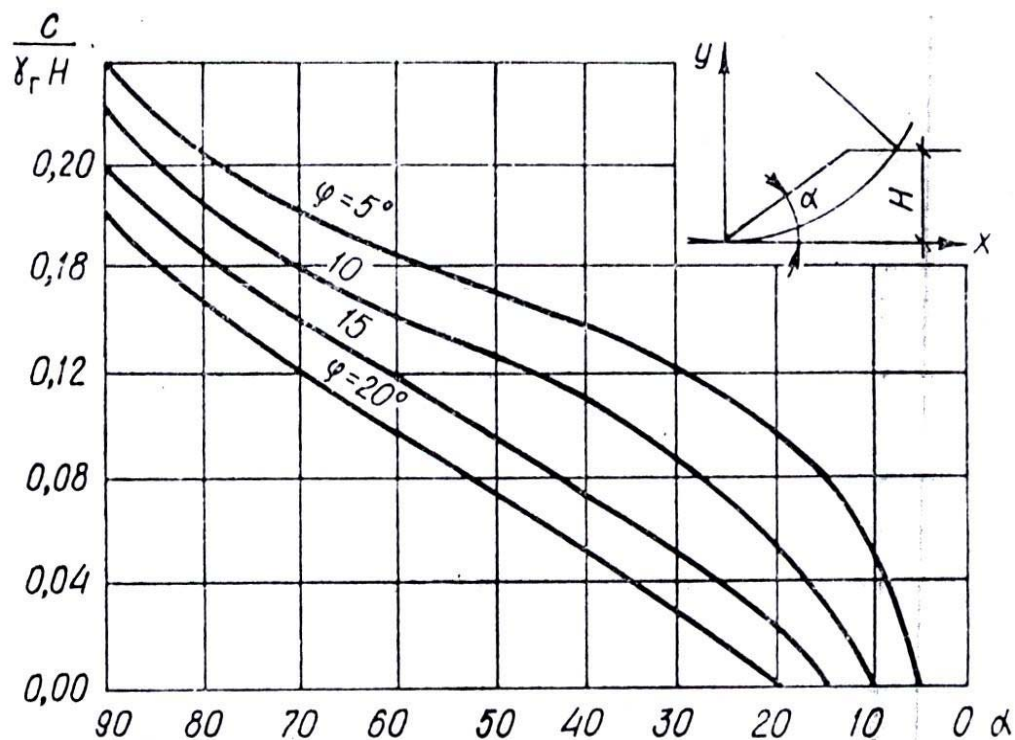


Рис. 4.24. График для расчета устойчивости откосов земляных плотин

Откосы неоднородных земляных плотин (рис. 4.25) можно также рассчитывать по методу круговых поверхностей скольжения. В этом случае предполагается, что в грунте тела и основания плотины может образоваться круглоцилиндрическая опасная поверхность скольжения под действием сил веса грунта откоса, в связи с чем произойдет сползание грунта откоса и выпучивание основания. Сползанию грунта будет сопротивляться сила трения и сцепления по поверхности обрушения.

Проверка устойчивости откоса сводится к определению коэффициента устойчивости k_y , который равен (если не считать сил бокового давления) отношению момента удерживающих сил (трения и сцепления) к моменту сдвигающих сил:

$$k_y = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{сдв}} \quad (4.41)$$

Расчет выполняется в условиях плоской задачи, когда рассматривается отрезок плотины длиной, равной единице. Грунт плотины выше кривой депрессии имеет естественную влажность, а ниже ее находится в взвешенном состоянии.

Выбрав по определенному правилу точку, из неё как из центра проводят дугу окружности радиусом R , захватывающую только тело плотины (например, в случае скального основания) или и часть основания. Выделенный массив грунта, который может сползти по дуге этой окружности, делится вертикальными плоскостями на отсеки шириной $b = R/m_0$ (обычно $m_0 = 10$ или 20). Дренаж отдельно не учитывают.

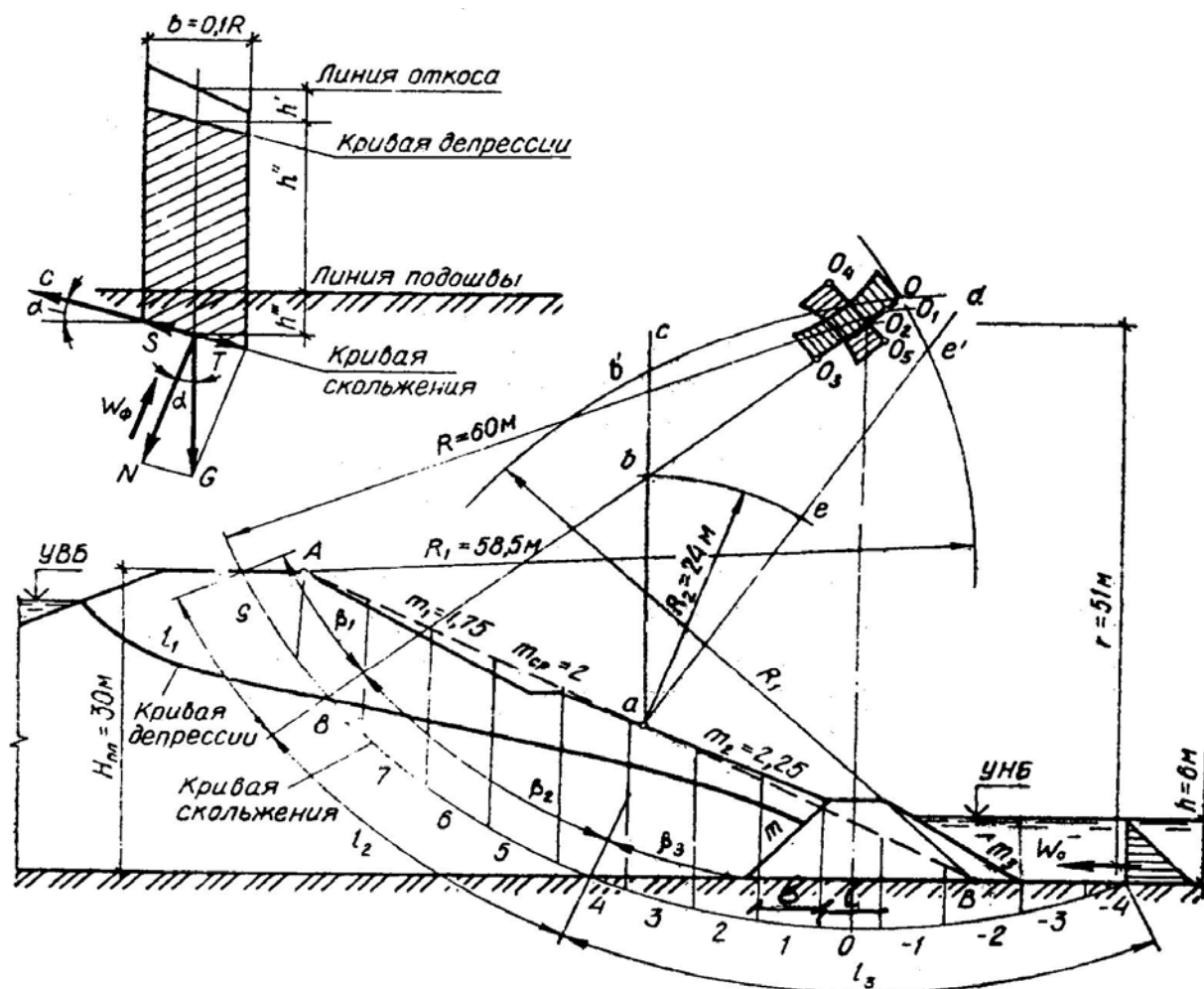


Рис. 4.25. Схема к расчёту коэффициента устойчивости низового откоса земляной плотины

Отсек, располагающийся симметрично относительно вертикали, проходящей через центр кривой скольжения, обозначается как нулевой. Нумерация отсеков, расположенных от нулевого отсека в сторону откоса, принимается со знаком плюс, а в направлении от откоса – со знаком минус.

В общем случае выделенный отсек грунта находится под действием собственного веса, бокового давления соседних масс грунта и давления фильтрационного потока.

Собственный вес отсека

$$G_n = (\gamma_1 \cdot h'_n + \gamma_2 \cdot h''_n + \gamma_3 \cdot h'''_n) \cdot b, \quad (4.42)$$

- где γ_1 – удельный вес грунта плотины естественной влажности выше кривой депрессии, кН/м^3 ;
 γ_2 – удельный вес взвешенного грунта плотины ниже кривой депрессии, кН/м^3 ;
 γ_3 – удельный вес грунта основания, насыщенного водой, кН/м^3 ;
 h'_n, h''_n, h'''_n – среднее высоты полос грунта соответственно выше кривой депрессии, ниже кривой депрессии, в основании плотины, м;
 b – ширина отсека, м.

При наличии слоя воды над отсеком выше линии откоса

$$G'_n = G_n + h_n \cdot b \cdot \gamma, \quad (4.43)$$

где h_n – средняя глубина воды над отсеком, м.

Если в откосе есть слои различного грунта, то его вес определяется с учетом удельного веса каждого грунта.

Силы бокового давления грунта, действующие на вертикальных границах отсека, после суммирования их по всему сползающему массиву дают результирующую, равную нулю, и поэтому в расчете устойчивости ими пренебрегают.

Давление фильтрационной воды, действующей на n -й отсек, учитывается как внешняя сила и приближенно определяется по формуле

$$W_{\phi n} = \gamma \cdot (h''_n + h'''_n) \cdot b / \cos \alpha_n, \quad (4.44)$$

где γ – удельный вес воды, кН/м³;

n – угол между вертикалью, проходящей через центр нулевого отсека, и линией, соединяющей центр кривой скольжения с точкой пересечения оси рассматриваемого отсека с кривой скольжения.

Сила веса G_n раскладывается на составляющие: нормальную $N_n = G_n \cdot \cos \alpha_n$, направленную по радиусу кривой скольжения, и касательную $T_n = G_n \cdot \sin \alpha_n$. Сила T_n вызывает сдвиг n -го отсека по кривой скольжения. Этому будет противодействовать сила трения $S_n = (N_n - W_{\phi n}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_i$ и сила сцепления $C_n = c_i \cdot l_n$, где l_n – длина участка кривой скольжения в пределах отсека, а c_i – удельная сила сцепления.

Кроме указанных сил на рассматриваемый массив грунта действует давление воды со стороны нижнего бьефа

$$W_0 = 0,5 \cdot \gamma \cdot h^2, \quad (4.45)$$

где h – глубина воды в нижнем бьефе, м. Тогда для всего рассматриваемого массива в соответствии с формулой (4.1) силы и моменты, действующие на отдельные отсеки, суммируются и коэффициент устойчивости откоса может быть найден по формуле

$$k_y = \frac{\sum (G_n \cdot \cos \alpha_n - W_{\phi n}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i + W_0 \cdot r / R}{\sum G_n \cdot \sin \alpha_n}, \quad (4.46)$$

где

$$\sin \alpha_n = n_0 \cdot b / R = n_0 / m_0; \quad \cos \alpha_n = \sqrt{1 - (n_0 / m_0)^2};$$

$$\gamma_{\text{сж}} = 2,7.$$

Для неполных отсеков синус угла α_n принимается равным его доле от полной ширины отсека, пропорциональной фактической ширине отсека.

Тогда

$$k_y = \frac{\sum \left[G_n \cdot \sqrt{1 - (n_0/m_0)^2} - W_{\phi n} \right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i + W_0 \cdot r / R}{\sum G_n \cdot n_0 / m_0}, \quad (4.47)$$

где n_0 – порядковый номер отсека грунта;

m_0 – число, равное 10 при $b = 0,1R$ и 20 при $b = 0,05R$;

r – радиус действия силы W_0 относительно центра кривой скольжения.

Удельный вес грунта плотины, расположенного ниже кривой депрессии, составляет

$$\gamma_{вз} = (1 - n_r) \cdot (\gamma_{сух} - 1), \quad (4.48)$$

где n_r – пористость грунта;

$\gamma_{сух}$ – удельный вес грунта в сухом состоянии, кН/м³.

Для сокращения расчетов силу сцепления $C = \sum c_i l'_i$ определяют не по отсекам, а по участкам с одинаковым удельным сцеплением (l'_i – длина участка кривой скольжения с постоянным значением удельного сцепления):

$$l'_i = \pi R \beta_i / 180, \quad (4.49)$$

где β_i – угол, образованный радиусами, проведенными из центра кривой скольжения до пересечения с границами ее участков, имеющих постоянное значение удельного сцепления. Обычно l измеряется по хордам на расчетной схеме

Аналогичный расчет выполняется по целому ряду кривых скольжения, чтобы найти положение кривой скольжения, для которой k_y будет минимальным.

Существует много способов определения поверхности скольжения, которой соответствует минимальный коэффициент запаса устойчивости. По рекомендации В.В. Аристовского центр такой поверхности находится следующим образом.

От середины откоса (точка a на рис. 4.25 или осредненного откоса, если откос ломаный) проводим вертикаль ac . Затем из той же точки a под углом 85° к откосу (или осредненному откосу) проводим линию ad . Из точек A и B , как из центров, проводим кривые радиусом R_1 . Площадь, ограниченная этими кривыми, будет площадью центров кривых скольжения.

Радиус

$$R_1 = (R_H + R_B) / 2, \quad (4.50)$$

где R_H, R_B – нижнее и верхнее значения радиуса поверхности скольжения, м.

Ориентировочные значения R_H и R_B в долях от высоты плотины (высоты откоса) H в зависимости от коэффициента заложения откоса $m_{от}$ принимают:

$m_{от}$	1	2	3	4	5	6
R_H	1,1	1,4	1,9	2,5	3,3	4,3
R_B	2,2	2,5	3,2	4,7	5,8	6,7

Кривые, проведенные радиусом R_1 пересекаются в точке O (рис. 4.25). Из точки a , как из центра, проводим дугу be радиусом $R_2 = aO/2$. Многоугольник $bb'Oe'eb$ является зоной пробных центров кривых скольжения. В пределах этой зоны будет расположен критический центр заданного радиуса кривой скольжения. При малых значениях сил сцепления C критический центр располагается вблизи или в самой вершине O зоны пробных центров. С увеличением значения C критический центр удаляется от вершины.

В.В. Аристовский установил, что обычно пробные центры наиболее опасных кривых скольжения располагаются вблизи линии bO . Эту линию следует принимать как линию пробных центров.

Задаваясь на линии пробных центров несколькими точками (2–3), например O, O_1, O_2, O_3 и т. д., проводим из этих точек, как из центров, кривые скольжения радиусами R, R', R'', R''' и т.д. и соответственно определяем коэффициент устойчивости по формуле (4.50). Для уточнения расчета через точку с минимальным значением k_v можно провести линию, перпендикулярную bO , на которой также наметить ряд центров и определить для них свои значения k_v . Из всех найденных значений k_v определяется $k_{v \min}$.

При подобных расчетах кроме $R_1 = (R_H + R_B) / 2$, рекомендуется принимать еще два-три промежуточных радиуса кривых скольжения R_l в пределах

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R_H + R_B}{2} < R_l < R_B, \\ R_H < R_l < \frac{R_H + R_B}{2} \end{array} \right\}. \quad (4.51)$$

Для каждого значения R_l проводим линию пробных центров и, как указано выше, определяем значения коэффициента устойчивости. Из всех

полученных значений его устанавливаем минимальное значение k_v , которое должно быть в допустимых пределах – условие (4.52).

В этих расчетах следует иметь в виду, что для откосов из несвязных грунтов центр наиболее опасной кривой скольжения расположен вблизи точки O , а для откосов из связных грунтов он удаляется от нее. Наиболее опасная кривая скольжения в отсеках из песчаного грунта на песчаном основании проходит обычно через подошву откоса, а если в основании залегает глинистый грунт, она захватывает и часть основания на глубину, обычно не превышающую высоты плотин, и при этом не выходит за пределы двух высот плотины во внешнюю сторону от подошвы откоса плотины по поверхности основания.

В соответствии с [26] устойчивость откосов обеспечивается, если удовлетворяется условие

$$k_y \geq k_n n / m, \quad (4.52)$$

где k_n – коэффициент надежности;
 n – коэффициент сочетания нагрузок;
 m – коэффициент условий работы.

Значения коэффициента k_n зависят от класса сооружения:

Класс сооружения	I	II	III	IV
k_n	1,25	1,2	1,15	1,1

Значения коэффициента n зависят от сочетания нагрузок: при основном сочетании $n = 1$, при особом – 0,9, для строительного периода – 0,95.

Значения коэффициента m зависят от метода расчета: при методе, удовлетворяющем условиям равновесия, $m = 1$, при упрощенном методе $m = 0,95$. (Расчет сводится в табл. 4.18).

Т а б л и ц а 4 . 1 8

Определение действующих сил

Номер отсека	$\sin \alpha_n$	$\cos \alpha_n$	G_n	$\sum G_n \cdot \sin \alpha_n$	$\sum G \cdot \cos \alpha_n$	$W_{\phi n}$	$\operatorname{tg} \varphi_i$	$\sum (G_n \cos \lambda_n - W_{\phi n}) \operatorname{tg} \varphi_i$	c_i	l_i	$c_i l_i$
--------------	-----------------	-----------------	-------	--------------------------------	------------------------------	--------------	-------------------------------	--	-------	-------	-----------

Наименьшее значение коэффициента устойчивости откоса k_v при соответствующем сочетании нагрузок не должно превышать величины $k_n n / m$ более чем на 10 %, если это не обусловлено особенностями сооружения. В том случае, если указанные условия не удовлетворяются, необходимо внести соответствующие изменения в конструкцию или размеры сооружения.

Для низконапорных земляных плотин IV класса высотой менее 5 м расчет устойчивости откосов не производят.

В земляных плотинах из несвязного грунта без дренажа опасным является участок низового откоса, в пределах которого происходит выход (высачивание) фильтрационной воды. Сползания грунта не будет (с некоторым запасом) в том случае, если (рис. 4.26) $\text{tg}\alpha \leq \text{tg}\varphi / 2$, где α – угол наклона откоса к основанию плотины; φ – угол внутреннего трения грунта.

Если это условие не выдержано, необходимо предусмотреть дренаж или принять более пологий откос.

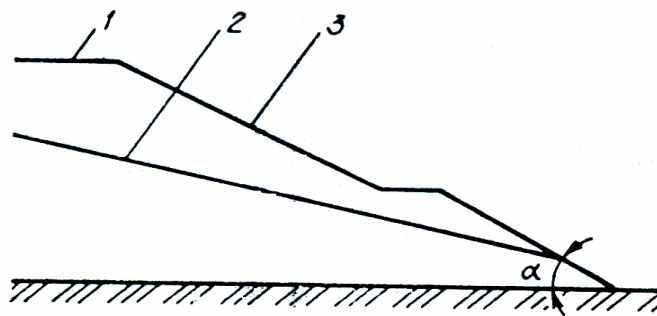


Рис. 4.26. К определению устойчивости низового откоса в зоне высачивания:
1 – гребень плотины; 2 – кривая депрессии; 3 – низовой откос

Устойчивость верхового откоса (рис. 4.27) рассчитывается при быстрой сработке водохранилища (со скоростью более 0,3–0,5 м/сут). Расчет выполняется по той же методике, что и для низового откоса, если известно положение кривой депрессии после понижения горизонта воды в верхнем бьефе. Если же положение кривой депрессии в этом случае неизвестно, то с запасом ориентировочно считают, что она занимает то же положение, что и до понижения уровня верхнего бьефа, и вес грунта в отсеках принимается с учетом его взвешенного состояния. Вес столба воды h над отсеками при этом не учитывается.

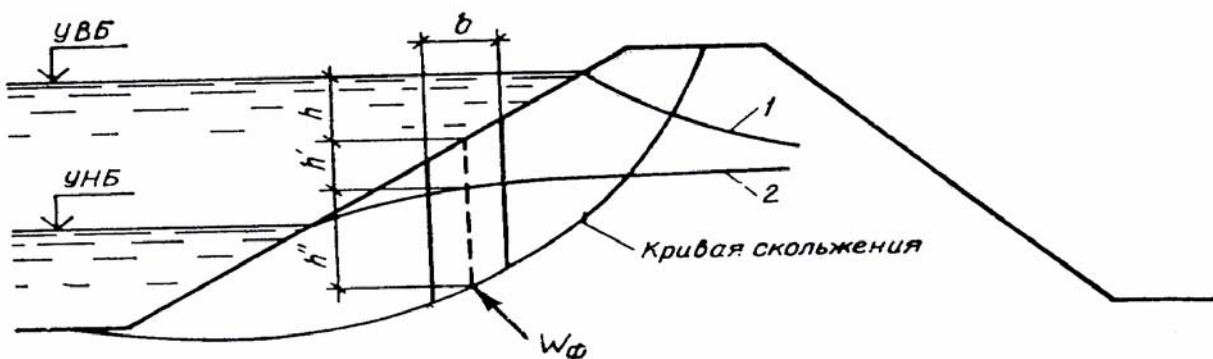


Рис. 4.27. Схема к учету сил при расчете устойчивости верхового откоса плотины:
1, 2 – депрессионные кривые соответственно до и после сработки водохранилища

4.5. Каменные и каменно-земляные плотины

Каменный материал (галька, гравий, камень) для возведения запруд, плотин стал применяться давно. Прежде всего, использовался речной галечник, имеющийся в большом количестве, особенно в горных районах. Позже стал применяться камень, добываемый в карьерах. Более широкое применение нашли комбинированные плотины из камня и грунта

4.5.1. Конструкции каменных и каменно-земляных плотин

Плотины различают каменно-набросные или просто каменные и каменно-земляные (рис. 4.28, 4.29).

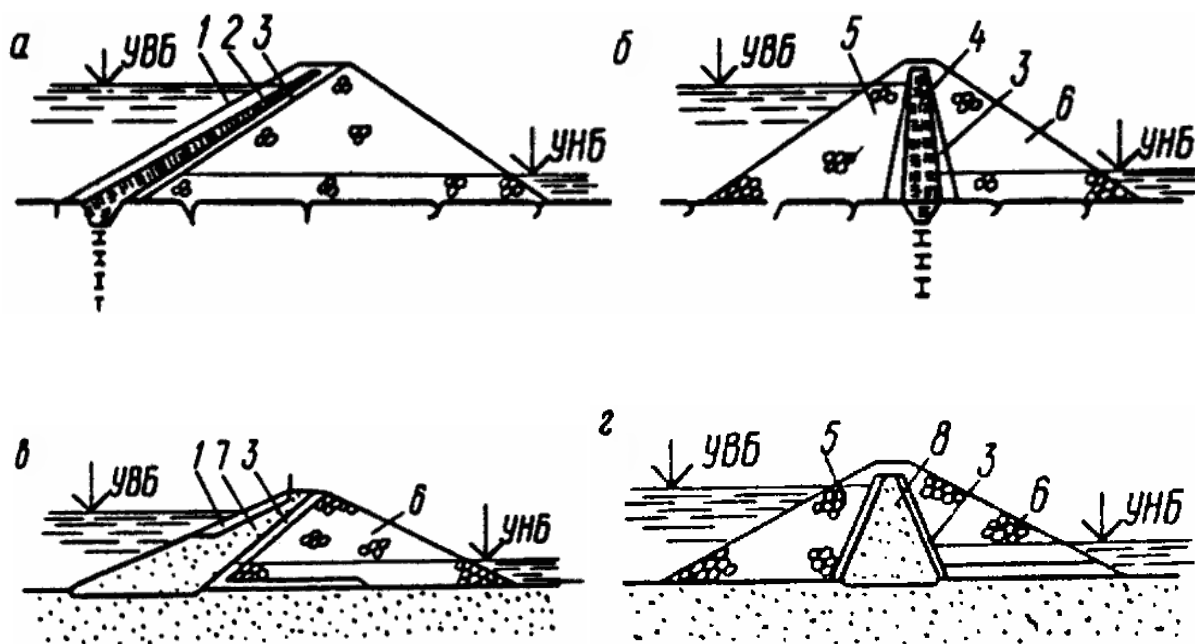


Рис. 4.28. Виды каменно-земляных плотин:
а – с грунтовым экраном; б – с грунтовым ядром;
в – с верховой грунтовой призмой; г – с центральной грунтовой призмой;
1 – крепление верхового откоса; 2 – грунтовый экран;
3 – обратные фильтры; 4 – грунтовое ядро;
5, 6 – верховая и низовая призмы;
7, 8 – верховая и центральная грунтовые
противофильтрационные призмы

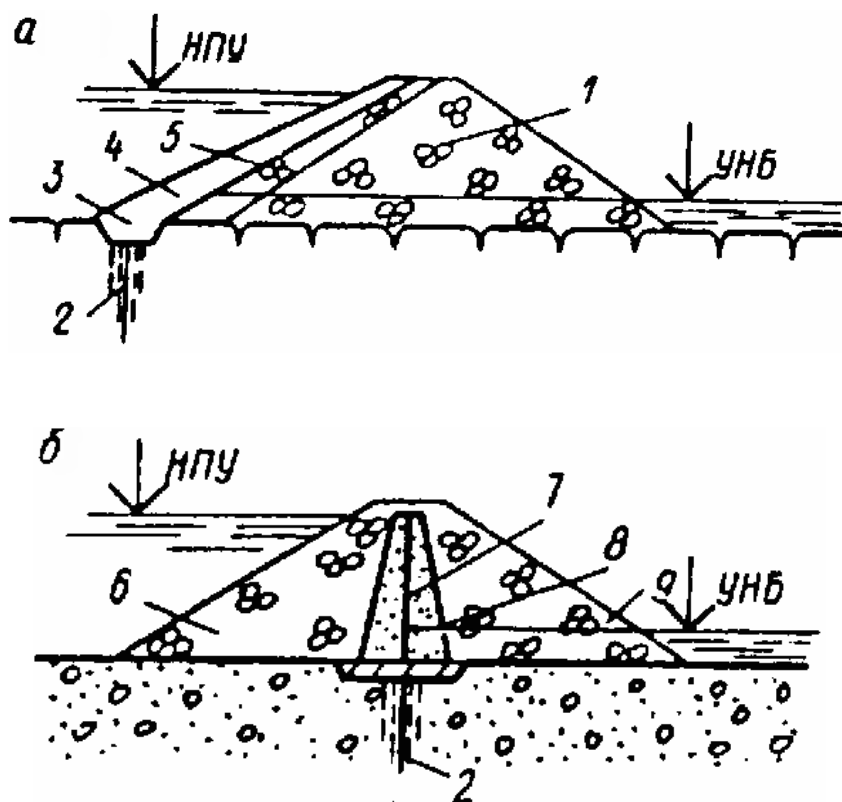


Рис. 4.29. Виды каменно-набросных плотин:
 а – с экраном из негрунтовых материалов; б – с диафрагмой;
 1 – тело плотины; 2 – цементационная завеса; 3 – бетонный зуб;
 4 – железобетонный экран; 5 – подэкранный кладка; 6 – верховая призма;
 7 – диафрагма; 8 – переходные слои; 9 – низовая призма

Противофильтрационные устройства каменных плотин (экран или диафрагма) выполняются из негрунтовых материалов (бетон, металл, асфальт, дерево), а каменно-земляных – из грунтовых материалов (глина, глинобетон, суглинок). Тело каменных плотин может быть образовано наброской или отсыпкой каменного материала, правильной кладкой камня без применения вяжущего (плотины из каменной сухой кладки).

Каменно-набросные плотины возводятся, как правило, *глухими*, не допускающими перелива воды через гребень. Однако возможно устройство *переливных* и *фильтрующих* плотин с небольшими (до 8–10 м) напорами. Профиль водосливной грани переливных плотин весьма пологий или имеет надежное крепление.

Фильтрующие плотины (без экранов, диафрагм) выполняют роль мостов (дамб) или упорных каменных банкетов при возведении земляных плотин без предварительной постройки ограждающих перемычек.

В поперечном сечении каменные плотины и плотины из сухой кладки представляют собой трапецию с крутыми, по сравнению с земляными плотинами, откосами, зависящими от характера укладки камня. Коэффициенты заложения откосов могут быть пределах от 0,5 до 2.

Устойчивый профиль каменных плотин обуславливается силой трения каменного материала. Угол естественного откоса каменной наброски зависит от размеров и формы камня, также от способа его укладки и плотности наброски и изменяется от 36 до 40–42°.

Сухую кладку при высоте плотины до 20 м можно выполнить с откосом не круче $m = 0,3 \dots 0,4$; при большей высоте – с откосом $m = 0,5 \dots 0,7$. Верховой откос каменных плотин с экранами выполняется в зависимости от размеров подэкранной сухой кладки в пределах $m = 0,9 \dots 1,2$. Откос может быть с переменным уклоном, что благоприятно отражается на работе экрана.

В каменно-земляных плотинах с ядрами верховой откос уполаживается до $m = 1,4 \dots 1,2$ и более. При наклонных ядрах и земляных экранах откос каменной наброски под экраном назначается в пределах $m = 1,0 \dots 1,4$.

Низовой откос в большинстве каменных плотин имеет уклон $m = 1,2 \dots 1,4$ на устойчивых основаниях, на неустойчивых уполаживается до $m = 1,5 \dots 2,0$.

В сейсмических районах и верховой и низовой откосы делаются на 15–20 % положе или принимаются какие-либо меры к повышению их устойчивости.

Расчет устойчивости откосов ведется аналогично расчетам земляных откосов. В тех случаях, когда вероятны сдвиги по прямым и ломаным линиям (вдоль экрана, наклонного ядра, по поверхности основания), расчет ведется не по круговым кривым скольжения, а по линиям вероятных сдвигов.

Гребень каменной и каменно-земляной плотины должен обеспечить эксплуатационные требования; его минимальная ширина принимается равной 4 м.

К основаниям каменных и каменно-земляных плотин предъявляются большие требования, чем к основаниям земляных плотин, но в меньшей степени, чем к основаниям бетонных. Для каменных плотин пригодны все виды скальных пород в основании: а из нескальных – гравелисто-галечниковые, крупнопесчаные, моренные, плотные суглинки и плотные глины. Перед наброской камня в тело плотины нескальные основания покрываются галечниковым защитным слоем. На контакте водопроницаемого основания с каменно-набросной плотины устраивается защитный слой по принципу обратного фильтра на ширину, на 30 % превышающую ширину плотины по основанию.

Плотина с экраном при тех откосах, о которых говорилось выше, всегда устойчива против сдвига. Плотина с диафрагмой или ядром находится в менее благоприятных условиях в отношении сдвига, так как сдвигу сопротивляются лишь диафрагма (ядро) и низовая призма профиля плотины. В плотинах с диафрагмой на скальном основании низовой откос пло-

тины должен быть не круче $m = 1,3$, а при глинистом основании – не круче $m = 3 \dots 4$.

Следует отметить, что при наклонном ядре в плотине устойчивость последней повышается и низовой откос может быть круче, чем при вертикальном ядре.

В каменно-земляных плотинах менее устойчивой является земляная отсыпь напорного откоса. Расчет ее устойчивости осуществляется аналогично расчету устойчивости откосов земляных плотин.

4.5.2. Строительный материал для каменных плотин

Для возведения набросных плотин используются рваный камень (из карьеров), галька, гравий, щебень.

Камень как строительный материал должен обладать прочностью, водостойкостью, стойкостью против выветривания и действия морозов, вязкостью.

Водостойкость каменного материала оценивается сопротивляемостью его химическим разрушениям, размоканию, размягчению.

Пригодными для набросных плотин являются:

– из изверженных пород – гранит, сиенит, габбро, диорит, диабаз, базальт, порфит;

– из осадочных пород – песчаники кремистые (не глинистые и не мергелистые), кварциты, плотные известняки и доломи.

Непригодными материалами для возведения каменно-набросных плотин являются малостойкие породы: сланцы, мергели, опоки и другие полускальные породы; различные лавы, туфы, трахиты (из-за легкой выветриваемости), брекчии (вследствие малого объемного веса и слабой цементированности).

Для возведения каменно-набросных плотин важны также размеры и формы получаемого в карьере камня, что влияет на пустотность наброски, величину осадки плотины и крутизну устойчивого откоса. Чем ближе форма камня к сферической, тем меньше опасность смятия, скалывания острых углов, раскалывания на части и тем меньше будут деформации наброски и осадка тела плотины. Поэтому желательно, чтобы соотношение наименьшего и наибольшего размеров камня (в наброске) не превышало $1:3 \dots 1:4$. Минимальный вес отдельных камней должен быть не ниже 80 кг. Для высоких плотин целесообразны более крупные камни. В современные плотины укладываются камни весом 0,5–1 т, а на низовом откосе (для создания упора) – в несколько тонн.

В каменных и каменно-земляных плотинах обязательно используют камень разных размеров - в целях более плотной его укладки; применяют и каменную мелочь (для заполнения пустот). Это препятствует деформации

крупных камней, увеличивает вес и уменьшает осадку наброски. Однако содержание каменной мелочи не должно превышать 5–7 %, в противном случае основная нагрузка будет восприниматься каменной мелочью (а не крупным камнем), что приведет к увеличению осадки плотины и уменьшению устойчивости ее откосов.

Для подэкрановой кладки и плотин из сухой кладки нужен постелистый камень. При устройстве подэкрановой кладки следует обеспечить надежную связь кладки с каменной наброской, для чего осуществляется подбор необходимых по форме и размеру камней.

Гравий, галька и щебень могут быть применены во внутренних частях каменно-земляных плотин и служить основным материалом гравийно-галечниковых плотин.

4.5.3. Способы укладки каменных материалов

Каменный материал в тело плотины может быть уложен несколькими способами: наброской, отсыпкой, кладкой вручную и с использованием малой механизации.

Наброска камня выполняется путем сбрасывания его с эстакад или под откос (пионерный способ). Высота сбрасывания может составлять от 6÷8 до 25–50 м в зависимости от производственных условий и прочности камня. Следует стремиться к наибольшей высоте сбрасывания камня, так как под динамической нагрузкой получается больший эффект уплотнения.

Количество пустот в наброске (пустотность) в высоких плотинах не должно превышать 30–35 %, в невысоких – 35–40 %.

Отсыпка камня осуществляется слоями с транспортных средств. Минимальная толщина слоев не должна превышать двух-, трехкратный размер камней.

Пустотность каменной отсыпки значительна – до 40 %, поэтому механическое или гидравлическое уплотнение отсыпанной каменной массы следует осуществлять тщательно.

Каменная наброска и отсыпка могут вестись насухо (в котловане) и путем сбрасывания камня в текущую воду (без перемычек). Для заполнения пустот используется гравийный, щебеночный и грунтовый материал, что обеспечивает большую плотность и прочность плотины.

Сухая кладка каменного материала в тело плотины производится вручную из хорошо подобранных камней; крупные камни укладываются с помощью крана. В этих случаях используются, главным образом, плоский, постелистый камень, но можно применять и камень неправильной формы. Более крупные камни укладываются в наружных зонах плотины, в откосах.

Особо тщательно выполняется кладка подэкранового слоя с обеспечением хорошей связи со смежными слоями каменной наброски.

При этом слои каменной кладки должны быть горизонтальными или нормальными к откосу (экрану) плотины.

Под нагрузкой плотина деформируется, уплотняется, дает осадку; в период постройки она уплотняется в основном от действия собственного веса, а после наполнения водохранилища – от давления воды. Наибольшая величина деформации тела плотины наблюдается в нижней зоне плотины, ближе к верховому откосу. Кроме этого, наблюдаются смещения тела плотины от боковых зон в центральную часть – к месту наибольшей глубины створа, где отмечаются наибольшие вертикальные осадки, и в сторону нижнего бьефа.

С учетом возможных деформаций гребень плотины в центральной части возводится несколько выше проектных отметок, в плане же продольная ось плотины делается несколько изогнутой в сторону верхнего бьефа относительно проектного положения.

4.5.4. Противофильтрационные устройства

Каменно-земляные и особенно каменные плотины характеризуются большой пустотностью, т.е. большой водопроницаемостью, поэтому необходимо устройство надежных, долговечных и экономичных противофильтрационных конструкций в теле плотины. Как и в земляных плотинах, ими могут быть экраны, ядра и диафрагмы из различных негрунтовых и грунтовых материалов.

Выбор противофильтрационной конструкции обуславливается прежде всего конструкцией и материалом тела плотины, степенью ожидаемой деформации плотины и основания, наличием соответствующего строительного водонепроницаемого материала и другими факторами.

Противофильтрационные устройства должны быть прочными для восприятия различных напряжений, обладать определенной гибкостью, что важно для сильно деформированных плотин и сжимаемых оснований.

Экраны каменных плотин могут быть выполнены из бетона, железобетона, металла, дерева, пластмассы, глины, суглинка, глинобетона, торфа, асфальта.

Бетонные и железобетонные экраны могут быть трех типов: жесткие монолитные, могущие воспринимать, главным образом, температурные деформации; полужесткие скользящие, способные воспринимать и температурные и осадочные деформации; гибкие (слоистые), способные воспринимать значительные деформации плотин.

Жесткие монолитные экраны представляют собой плиты толщиной 25–50 см, бетонизируемые непосредственно на подэкрановой сухой кладке. В плотинах небольшой высоты они могут быть выполнены из слоя торкрета в 11–12 см по арматурной сетке. Плиты экрана разрезаются швами: вертикальными температурными (через каждые 12–18 м), горизонтальными осадочными (через 8–15 м). Под ними укладываются бетонные опорные балки. Швы имеют уплотнения (противофильтрационные) из медных листов, резины, а кроме того, заливаются асфальтом, битумом.

Бетонные жесткие экраны устраиваются в случае возведения плотин на непросадочных основаниях, т.е. когда не ожидаются деформации тела плотины и основания.

Полужесткие, скользящие бетонные и железобетонные экраны отличаются тем, что они укладываются на подэкрановую сухую кладку не непосредственно, а на предварительно уложенный выравнивающий слой бетона в 10–20 см, покрываемый битумом, что позволяет экрану деформироваться независимо от подэкрановой кладки. Эти экраны дороже, но в эксплуатации лучше монолитных ввиду их большей гибкости.

Гибкие (слоистые) экраны состоят из нескольких слоев железобетонных плит размером 3×3...9×9 м с прослойками битума между ними. Для уменьшения возможной фильтрации швы в них располагаются вразбежку.

Слоистые экраны обладают наибольшей гибкостью, но они сложны в выполнении и дорожи.

Для обеспечения большей водонепроницаемости бетонные экраны с поверхности торкретируются.

Металлические экраны характеризуются абсолютной водонепроницаемостью, большой гибкостью, но весьма дороги. Их выполняют из листовой стали толщиной 8–12 мм, укладываемой на специальные опорные рамы или на подэкрановую кладку с бетонным выравнивающим слоем по откосу. Недостаток таких экранов – сильная коррозия, вследствие чего необходимо антикоррозийное покрытие или использование нержавеющей стали.

Деревянные экраны устраиваются из двух и более слоев горизонтально уложенных досок толщиной 5–8 см с прокладкой рулонного гидроизоляционного материала между слоями. Доски укладываются на вертикальные брусья, заделываемые в подэкрановую кладку или в слой бетонной подэкрановой подготовки. Деревянные экраны достаточно водонепроницаемы и гибки, сравнительно дешевы, недостаток – подверженность гниению (особенно в зоне колебания уровня воды в верхнем бьефе); требуется надежное антисептирование.

Экраны из пластмасс не имеют пока широкого применения, но являются весьма перспективными при строительстве каменных, каменно-

земельных и земляных плотин. Для их устройства (и других противofiltrационных конструкций) используются пластики в виде пленок или листов из полиэтилена, поливинилхлорида и др. Такие экраны (при качественном их выполнении) водонепроницаемы, эластичны, достаточно прочны, коррозиестойчивы и дешевы. Однако они требуют надежной защиты от механических повреждений, солнечных лучей. В этих целях пластик укладывается или между подэкрановой подготовкой и защитным слоем из грунта или между бетонными плитами.

Асфальтобетонные экраны, примененные в целом ряде плотин, показали себя достаточно надежными, гибкими, дешевыми в сравнении с бетонными. Недостаток – процесс старения асфальтобетона, т.е. потеря гибкости, вызванная окислением и полимеризацией асфальта. Однако процесс старения протекает весьма медленно, и за это время деформации тела и основания плотины обычно прекращаются. Асфальтобетонные экраны устраиваются из двух или нескольких слоев толщиной 4–6 см, укладываемых на выравнивающий слой из бетона на подэкрановой кладке. С внешней стороны экран может иметь защитное покрытие (бетон, бетонные плиты) или окраску. Для обеспечения условий независимой деформации между защитным покрытием и экраном укладывается слой битума.

Грунтовые экраны по конструкции аналогичны экранам земляных плотин, они также устраиваются из суглинка, торфа, глины, глинобетона. Однако при строительстве каменных плотин необходимо надежное устройство сопряжения экрана с каменной наброской, для чего под экраном укладывается переходный слой из галечника, гравия, щебня или каменный мелочи по принципу обратного фильтра. Переходный подэкранный слой может иметь значительную толщину для образования необходимого устойчивого уклона грунтовому экрану.

Грунтовые ядра из суглинка, глины по конструкции также аналогичны ядрам земляных плотин. В этом случае, как и при устройстве грунтовых экранов, следует обеспечить надежное сопряжение ядра с каменной наброской путем устройства двух-, трехслойного гравийно-песчаного переходного слоя по принципу обратного фильтра с верхней и нижней сторон ядра. Грунтовые (пластичные) ядра обычно устраиваются в каменно-земляных плотинах. Они нечувствительны к деформациям плотины и легко приспосабливаются к нагрузкам верхнего бьефа. Ядро может быть довольно тонким, так как глина допускает большие начальные градиенты фильтрации. Плотины с ядром могут оказаться экономичнее плотин с экранами.

Ядро выполняется вертикальным или наклонным. Наклонное имеет некоторые преимущества: обеспечивает более равномерное распределение нагрузки на набросную часть плотины, обеспечивает большую устойчивость плотины против сдвига, так как сопротивляющийся сдвигу объем в

этом случае больше объема, чем при вертикальном ядре. Однако объем наклонного ядра несколько больше вертикального. Плотины с пластичным ядром менее требовательны к основанию, чем другие виды набросных плотин, и допускают большие деформации. Толщина наклонного ядра составляет 10–20 %, а иногда и 30 % высоты плотины.

Диафрагмы как противофильтрационные устройства в каменных плотинах получили незначительное применение, так как вследствие больших деформаций тела плотин жесткие диафрагмы находятся в весьма неблагоприятных условиях – подвергаются изгибу и срезу. Диафрагмы обычно представляют собой монолитную или полую *бетонную* или *железобетонную* стенку толщиной 0,5–0,9 м с различными сопрягающими с основанием: бетонными конструкциями, позволяющими свободную деформацию в сторону нижнего бьефа.

Бетонные диафрагмы с верховой стороны имеют битумное или асфальтовое покрытие.

В последние годы в гидротехническом строительстве при во ведении каменных плотин получили большое применение диафрагмы из асфальтобетона с крупным каменным заполнителем (до 300 мм). Такие диафрагмы толщиной 0,5–0,7 м построены в ФРГ при возведении каменных плотин высотой до 35 м.

Вопросы для самопроверки

Классификация гидротехнических сооружений для водоснабжения и водоотведения

1. Какие сооружения называются гидротехническими?
2. Какие сооружения относятся к гидротехническим сооружениям общего назначения?

Основные положения проектирования плотин из грунтовых материалов

3. Какими достоинствами обладают грунтовые плотины ?
4. Назовите элементы профиля плотин из грунтовых материалов.
5. Как называют откос плотины, обращённый в сторону верхнего бьефа?
6. Крутизна откосов плотины характеризуется коэффициентом откоса m . Что он собой представляет?
7. Какими могут быть земляные плотины по способу возведения?
8. При строительстве плотин из более проницаемых грунтов (песков, супесей) для снижения потерь на фильтрацию применяют различные противофильтрационные устройства. Назовите их.

9. Где в теле плотины располагается экран?
10. Из каких грунтов можно возводить земляные насыпные плотины?
11. Из каких условий принимают ширину гребня плотины? Каково её минимальное значение?
12. От чего зависит выбор створа плотины?
13. В зависимости от чего определяют высоту превышения гребня плотины над расчетным уровнем?
14. Какие применяют виды крепления верхового откоса?
15. Назовите основные составные части дренажных устройств. Каково их назначение?

Фильтрационные расчеты тела плотины

16. Какова цель фильтрационных расчетов при проектировании грунтовых плотин?
17. Обозначьте область фильтрации в теле плотины.
18. В чём суть способа виртуальных длин?
19. Как проводят определение общего расхода фильтрационного потока через тело плотины?
20. В чем состоит оценка фильтрационной прочности грунта тела плотины?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы, необходимые строителю профиля подготовки «Водоснабжение и водоотведение» для исследования поверхностных водных источников и их грамотного использования для получения пресных вод.

Рассмотренные в пособии методы исследования водных источников, методики выполнения гидрологических и водохозяйственных расчетов, вопросы конструирования и расчета плотин из грунтовых материалов отвечают действующим нормативным документам. Однако рамки пособия не позволили рассмотреть принципы проектирования водопропускных и водосбросных сооружений, которые существенно влияют на надёжность гидроузлов и режим водотока ниже места возведения плотины. С принципами конструирования и расчёта этих сооружений следует знакомиться, используя рекомендованную литературу.

Практика применения современной техники, конструкционных материалов, методов и приёмов строительства даёт возможность постоянно совершенствовать конструкции гидротехнических сооружений. На основании научных исследований меняются и методики проектирования гидротехнических сооружений. Эти вопросы будут освещаться по мере появления изменений при переиздании настоящего пособия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидротехнические сооружения [Текст]: справочник проектировщика / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-Заде, П.А. Иванов [и др.]; под общ. ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат. 1983. – 543 с.
2. Замарин, Е.А. Гидротехническое сооружение [Текст] / Е.А. Замарин, В.В. Фандеев. – М.: Сельхозгиз, 1954. – 560 с.
3. Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / П.Г. Киселев. – 4-е изд. – М.: Энергия. 1972. – 312 с.
4. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия [Текст]/ учеб. для вузов: в 2 ч. Ч.2. Специальные вопросы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий; под ред. Н.М. Константинова. – М.: Высш. шк., 1987. – 431 с.
5. Кириенко, И.И. Гидротехническое сооружение. Проектирование и расчет [Текст] / И.И. Кириенко, Ю.А. Химерик. – Киев: Вища школа. 1987. 254 с.
6. Круглов, Л.В. Бесплотинный водозабор с отстойником [Текст]: метод. указания к курсовому и дипломному проектированию / Л.В. Круглов, И.М. Крышов, С.Л. Круглов. – Пенза: ПГУАС, 2009. – 36 с.
7. Круглов, Л.В. Бетонная водосливная плотина на нескальном основании [Текст]: метод указания к курсовому и дипломному проектированию / Л.В. Круглов, И.Г. Ладайкина, В.В. Демидочкин. – Пенза: ПГАСА, 2001. – 25 с.
8. Круглов, Л.В. Фильтрация через однородную земляную плотину на водопроницаемом основании [Текст]: метод. указания к лабораторным работам / Л.В. Круглов, С.Л. Круглов. – Пенза: ПГУАС, 2007. – 24 с.
9. Курсовое и дипломное проектирование по гидротехническим сооружениям [Текст] / под ред. В.С. Лапшенкова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 448 с.
10. Ладайкина, И.Г. Проектирование плотины из грунтовых материалов [Текст]: учеб. пособие / И.Г. Ладайкина, Н.А. Денисова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 80 с.
11. Михайлов, В.Н. Гидрология [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – М.: Высш. шк., 2005. – 463 с.
12. Навоян, Х.А. Примеры гидравлических расчетов водопропускных сооружений [Текст] / Х.А. Навоян. – Киев: Будівельник, 1975. – 212 с.
13. Нестеров, М.В. Гидротехнические сооружения [Текст]: учеб. пособие / М.В. Нестеров. – Мн.: Новое знание, 2006. – 616 с. – (Техническое образование).
14. Ничипорович, А.А. Плотины из местных материалов [Текст] / А.А. Ничипорович. – М.: Стройиздат. 1973. – 320 с.
15. Проектирование гидротехнических сооружений [Текст] / И.М. Волков, П.Ф. Кононенко, И.К. Федички. – М.: Колос. 1987. – 384 с.

16. Рассказов, Л.Н. Гидротехнические сооружения [Текст]: учеб. для вузов: ч.1 / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов [и др.]. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 576 с.
17. Рассказов, Л.Н. Гидротехнические сооружения [Текст]: учеб. для вузов: ч.2 / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов [и др.]. – М.: Из-во АСВ, 2008. – 528 с.
18. Розанов, Н.Н. Плотины из грунтовых материалов [Текст] / Н.Н. Розанов. – М.: Стройиздат. 1983. – 296 с.
19. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей [Текст] // Всесоюз. проект-изыскат. ин-т и ин-т Гидропроект. – М.:Стройиздат, 1982. – 287 с.
20. Руководство по расчетам консолидации оснований и плотин из грунтовых материалов [Текст] / П 36-75 ВНИИГ. – Л.: Энергия, 1975. – 51 с.
21. Смирнов, Г.Н. Гидрология и гидротехнические сооружения [Текст]: учеб. для вузов по специальности «Водоснабжение и канализация» / Г.Н. Смирнов, Е.В. Витрешко, И.А. Мальгина; под ред. Г.Н. Смирнова. – М.: Высш. шк., 1988. – 472 с.
22. СНиП 1.06.09–84. Туннели гидротехнические. – М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 19 с.
23. СНиП 2.02.02–85. Основания гидротехнических сооружений. – М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
24. СНиП 2.05.02–85. Автомобильные дороги. – М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
25. СНиП 2.06.04–82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.:Стройиздат, 1983. – 39 с.
26. СНиП 2.06.05–84. Плотины из грунтовых материалов. – М.:ЦИТП Госстроя СССР.1985. – 32 с.
27. СНиП 33-01–2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Стройиздат, 2004
28. СНиП П-7–81. Строительство в сейсмических районах. – М.:Стройиздат, 1982. – 48 с.
29. СП 33-101–2003. Определение гидрологических характеристик. – М.: Госстрой, 2004.
30. Чугаев, Р.Р. Гидротехнические сооружения. Глухие плотины [Текст] / Р.Р. Чугаев. – М.: Высшая школа. 1975. – 328 с.
31. Шабанов, А.Д. Приближенный метод расчета железобетонных плит откосного крепления на волновую нагрузку[Текст] / А.Д. Шабанов, Н.Я. Кичигина // Гидротехническое строительство. – 1983. – №1.
32. Шабанов, А.Д. Расчет железобетонных плит крепления напорных откосов земляных сооружений [Текст]: учеб. пособие / А.Д. Шабанов, В.А. Шабанов, Л.А. Шабанов, Н.Я. Кичигина. – Саратов: Саратовск. гос. ун-т. 1987. –138 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а 1 П

Нормативные значения удельных сцеплений c^H , кПа,
и углов внутреннего трения φ^H , град, песчаных и глинистых грунтов

Вид грунтов	Обозначение характеристик	Характеристика грунтов при коэффициенте пористости e						
		0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Пески гравелистые и крупные	c^H	2	1	–	–	–	–	–
	φ^H	43	40	38	–	–	–	–
Пески средней крупности	c^H	3	2	1	–	–	–	–
	φ^H	40	38	35	–	–	–	–
Пески мелкие	c^H	6	4	2	–	–	–	–
	φ^H	38	36	32	28			
Пески пылеватые	c^H	8	6	4	2	–	–	–
	φ^H	36	34	30	26	–	–	–
Супеси	c^H	20	16	14	12	9	–	–
	φ^H	29	27	26	22	18	–	–
Суглинки	c^H	43	36	28	23	18	15	12
	φ^H	25	24	22	21	19	17	12
Глины	c^H	–	81	57	50	43	37	32
	φ^H	–	21	18	17	16	14	11

П р и м е ч а н и е . Для φ песчаных грунтов – 1,1; для φ глинистых грунтов $k_r = 1,15$.

В расчетах по деформациям оснований гидротехнических сооружений значения удельного сцепления c и угла внутреннего трения φ допускается принимать равными нормативным непосредственно по табл. 1П.

Отношение веса грунта, включая вес воды в его порах, к занимаемому этим грунтом объему, включая поры, характеризуется удельным весом грунта.

Ориентировочные пределы изменения значений удельного веса γ_r , кН/м³, скальных и нескальных грунтов:

- скальные (при временном сопротивлении одноосному сжатию $R_c \geq 4900$ кПа): *изверженные* (граниты, дефиты, парфиты и др.), *метаморфические* (гнейсы, кварциты, мраморы и др.), *осадочные* (известняки, доломиты, песчаники) 25...31
- полускальные (при $R_c < 4900$ кПа): *осадочные* (глинистые сланцы, аргиллиты, песчаники, мелы, мергели, туфы, сланцы и др.) 22...26,5
- крупнообломочные (валунные, галечниковые, гравийные и песчаные) 14...21
- глинистые (супеси, суглинки и глины): 11...21

Продолжение приложения

Ориентировочные пределы изменения значений коэффициента фильтрации k_f , см/с, нескольких грунтов:

Глина	\leq	$1 \cdot 10^{-7}$
Суглинок		$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$
Супесь		$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$
Иловатые грунты		$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$
Торфы		$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$
Песок		
мелкозернистый		$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$
среднезернистый		$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$
крупнозернистый		$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$
Гравий и галька		$1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10$

Нормативные и расчетные значения удельного веса и коэффициента фильтрации грунтов устанавливаются на основе непосредственных испытаний грунтов по специальным методикам.

Расчетные значения осредненного критического градиента напора фильтрационного потока $I_{кр}^{cp}$ для нескольких грунтов основания:

Глины	\leq	$1 \cdot 10^{-7}$
Суглинки		$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$
Песок:		
крупный		$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$
средней крупности		$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$
мелкий		$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$

Расчетные значения местного критического градиента напора $I_{кр}$ (в зоне выхода фильтрационного потока в нижний бьеф) для суффозионных грунтов определяются на физических моделях или исследованиями в полевых условиях. Для несуффозионных грунтов значения $I_{кр}$ допускается принимать не более 0,3, а при наличии дренажа – не более 0,6.

Продолжение приложения

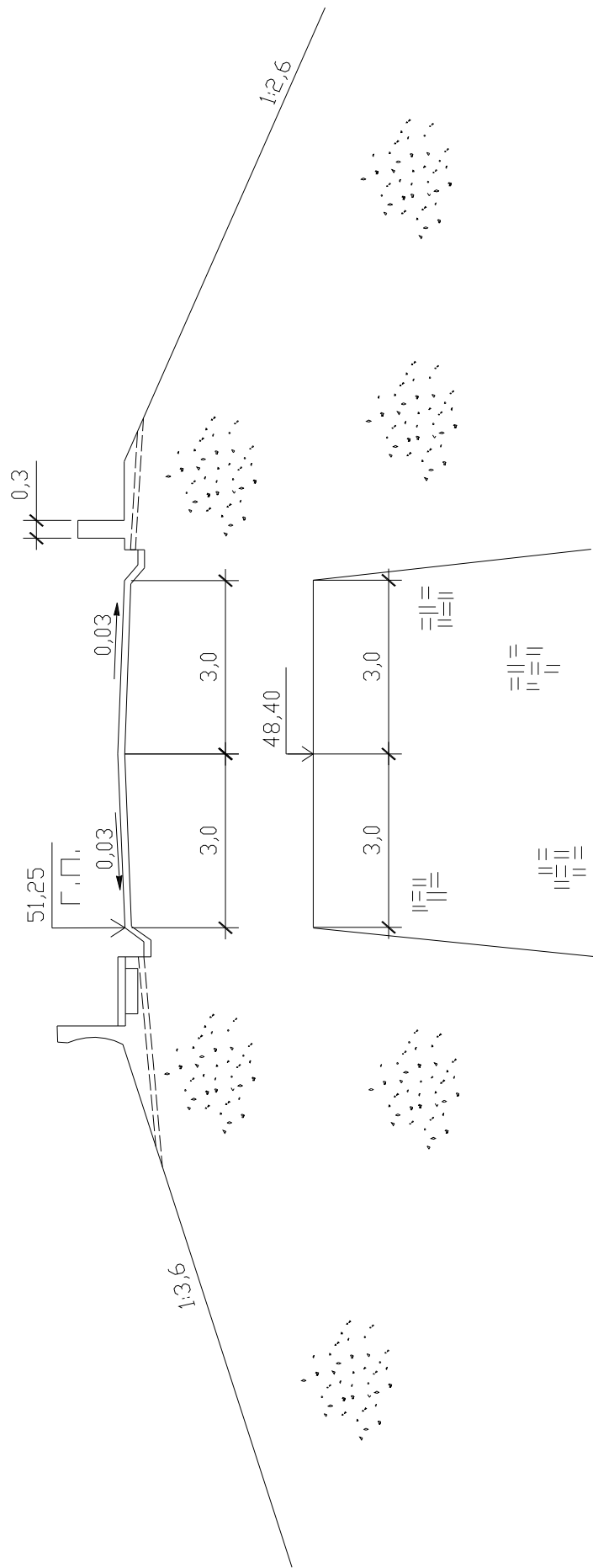


Рис. 1П. Конструкция гребня плотины

Продолжение приложения

Высоту наката на откос волн обеспеченностью 1 % по накату для фронтально подходящих волн при глубине перед сооружением $d \geq 2h_1$ % определяют по формуле 25 [3]; рекомендациям [6,10,11] или по формуле

$$H_{run\ 1\ \%} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run} \cdot h_1\ \% , \quad (4)$$

где k_r ; k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости откоса (принимаются по табл. 6 [3] или табл. 2П).

Т а б л и ц а 2 П

Конструкция крепления откоса	Относительная шероховатость r/h_1 %	Коэффициент k_r	Коэффициент k_p
Бетонными (железобетонными) плитами	–	1	0,9
Гравийно-галичниковое, 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

П р и м е ч а н и е . Характерный размер шероховатости r , м, следует принимать равным среднему диаметру зерен материала крепления откоса или среднему размеру бетонных (железобетонных) блоков.

k_{sp} – коэффициент, принимаемый по табл. 7 [3] или по табл. 3П.

Т а б л и ц а 3 П

Значение $\text{ctg } \varphi$	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

П р и м е ч а н и е : φ – угол наклона откоса к горизонту, град.

k_{run} – коэффициент, принимаемый по графикам рис. 10 [3] или по рис. 2П, в зависимости от пологости волны λ_d/h_1 % на глубокой воде.

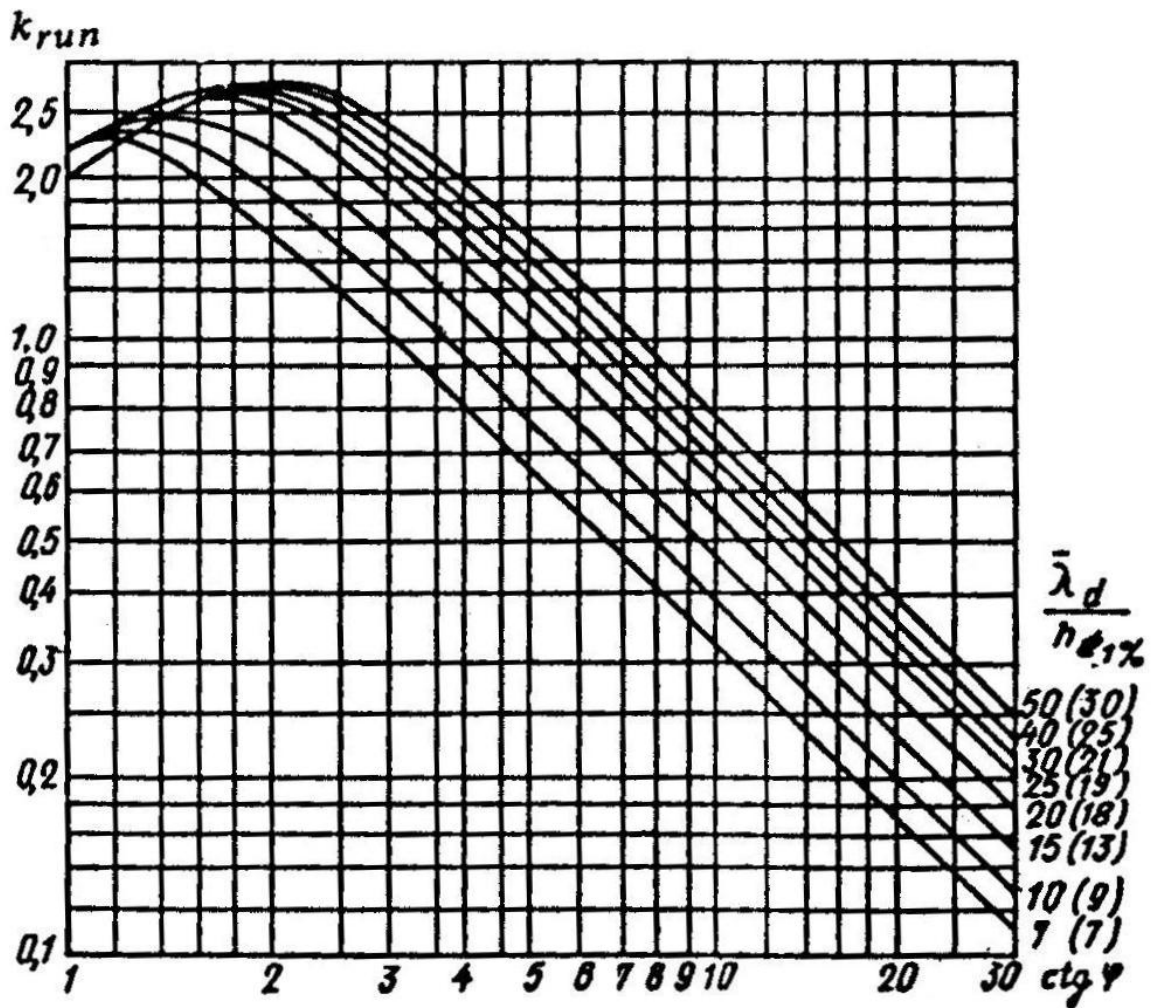


Рис. 2П. График значений коэффициента k_{run}

При глубине перед сооружениями $d < 2h_{1\%}$ коэффициент k_{run} необходимо принимать для значений пологости волны, указанной в скобках и определяемый при глубине $d = 2h_{1\%}$.

$h_{1\%}$ – высота бегущей волны обеспеченностью 1 %, м.

Высота бегущей волны, м, обеспеченностью 1 % вычисляется по формуле

$$h_{1\%} = k_i \cdot h_d, \quad (5)$$

где h_d – средняя высота волны в глубоководной зоне, м;

k_i – коэффициент, принимаемый по рис. 2 [3] или по рис. 3П для безразмерной величины $\frac{gL}{V_w^2}$.

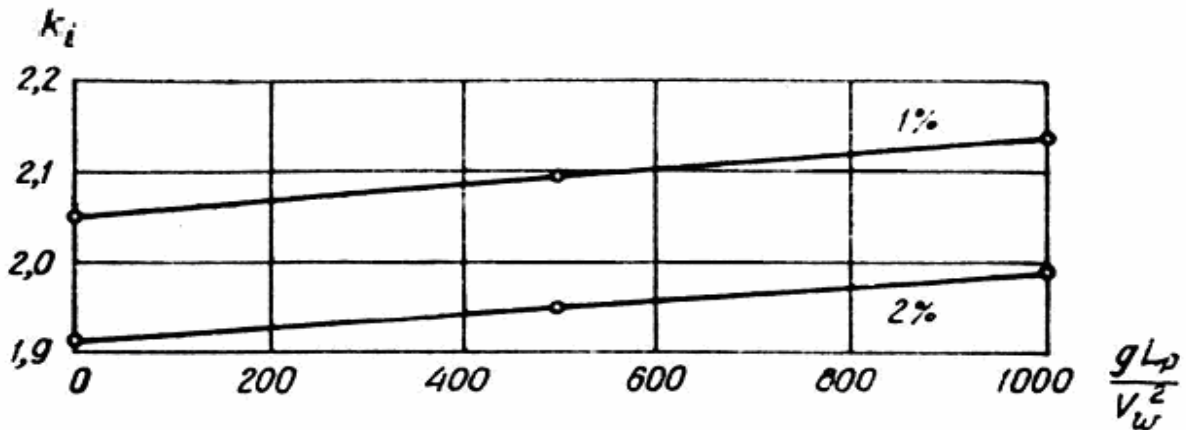


Рис. 3П. График значений коэффициента k_i

Для определения средней высоты находят безразмерные величины

$$\frac{gt}{V_w}, \frac{gL}{V_w^2}, \frac{gd}{V_w^2},$$

- где t – непрерывная продолжительность действия ветра, ч;
 L – длина разгона ветровой волны по направлению ветра, м;
 V_w – расчетная скорость ветра, м/с;
 d – глубина воды перед плотиной, м.

По графику рис. 1 [3] или рис. 4П находим значения соответствующих величин $\frac{gh_d}{V_w^2}$ и $\frac{gT}{V_w}$ и по меньшему значению из этих величин находим среднюю высоту волны h_d , м, и средний период волны T , с.

Среднюю длину волны, м, определяем по формуле

$$\lambda_d = \frac{gT^2}{2\pi}. \quad (6)$$

Высоту наката на откос обеспеченностью i , %, по накату необходимо определить умножением полученного по формуле (4) значением $h_{run\ 1\ \%}$, м, на коэффициент k_i , принимаемый по табл. 8 [3] или табл. 4П.

Таблица 4 П

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

Продолжение приложения

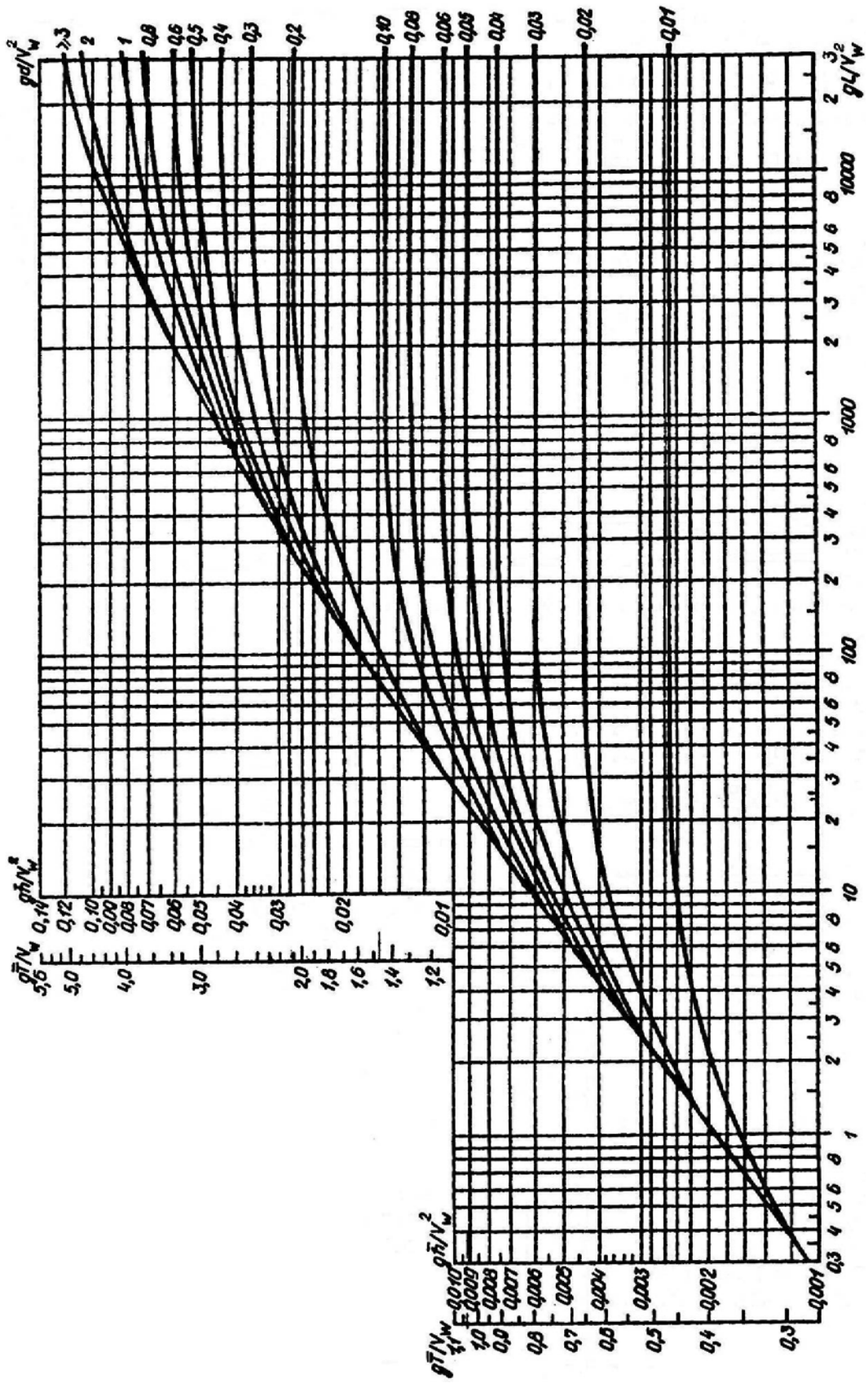


Рис. 4П. График для определения элементов ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах

Продолжение приложения

При подходе фронта волны к сооружению под углом α , град., со стороны открытой акватории величину наката волн на откос следует уменьшать умножением на коэффициент k_α , принимаемый по табл. 9 [3] или табл. 5П.

Т а б л и ц а 5 П

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

Высота ветрового нагона, м, принимается по данным натуральных наблюдений, а при их отсутствии допускается определять ее методом приближений по формулам (148^{*}) [3]:

$$\Delta h_{set} = k_w \cdot \frac{V_w^2 \cdot L}{g \cdot (d + 0,5\Delta h_{set})} \cdot \cos \alpha_w, \quad (7)$$

где α_w – угол между продольной осью водоема и направлением ветра;
 V_w – расчетная скорость ветра, м/с, принимаемая по табл. 6П;
 k_w – коэффициент, принимаемый по табл. 2^{*} [3] или по табл. 6П.

Т а б л и ц а 6 П

V_w , м/с	20	30	40	50
$k_w \cdot 10^{-6}$	2,1	3	3,9	4,8

Т а б л и ц а 7 П

Обеспеченность расчетной скорости ветра в процентах

Класс Уровень	I	II	III	IV
НПУ	2	2	4	4
ФПУ	20	20	30	50

Для небольших водохранилищ, когда ветровой нагон незначительно изменяет глубину воды и разгон волны, высоту ветрового нагона, м, можно определить по формуле

$$\Delta h_{set} = k_w \cdot \frac{V_w^2 \cdot L}{g \cdot d} \cdot \cos \alpha_w. \quad (8)$$

Из двух полученных результатов определения отметки гребня плотины выбирают наиболее высокую отметку.

Продолжение приложения

На откосах плотины следует предусматривать устройство берм, определяя их число в зависимости от высоты плотины, типов креплений откосов, условий производства работ и общей устойчивости откосов плотин [1].

Бермы устанавливаются через 10–15 м по высоте, ширина их 2–3 м (если по берме не устраивается проезд), с учетом прокладки дороги – 4,5 и более метров. На верховом откосе также устраивается берма, которая располагается на 1,5–2 высоты волны ниже уровня мертвого объема (УМО) для упора крепления верхового откоса. Для сбора стекающих с гребня и с низового откоса ливневых и талых вод по внутренней стороне бермы устраивают кюветы с выпуском воды из них в лотки, уложенные по нижерасположенному откосу.

В процессе конструирования профиля плотины решается вопрос о выборе креплений (покрытий) верхового и низового откосов плотин. Верховой откос плотины испытывает различные нагрузки: гидростатическое давление воды; динамическое давление воды (волновое давление); взвешивающее давление воды; ветровое давление; воздействие атмосферных осадков; температурные воздействия.

Крепление земляных откосов устраивают для защиты их от следующих воздействий:

а) верхового откоса: от волнового воздействия воды; ледового воздействия и от течения воды вдоль плотины в верхнем бьефе; от размыва фильтрационным потоком воды, вытекающим из плотины при снижении уровня воды в бьефе и при откате волн;

б) низового откоса: от размыва дождевыми водами, стекающими по откосу; разрушения под воздействием ветра; проникновения землеройных животных.

Для защиты откосов от разрушения применяют различные покрытия в зависимости от класса сооружения, величины и характера нагрузок.

В качестве крепления верхового откоса можно использовать: каменную наброску из несортированного камня, бетонные и железобетонные монолитные и сборные плиты, асфальтобетонные и биологические покрытия. Допускается при соответствующем обосновании применять облегченные крепления откосов: грунтово-цементные, из гравийно-галечниковых материалов и т.п.

Крепления верхового откоса плотины подразделяют на основное, расположенное в зоне максимальных волновых и ледовых воздействий, и облегченное – ниже основного крепления.

Крепление верхового откоса осуществляют в пределах сработки уровня верхнего бьефа и на 2–5 м выше и ниже крайних горизонтов воды.

Верхней границей основного крепления считают отметку гребня плотины.

Нижнюю границу основного крепления назначают ниже минимального уровня сработки водохранилища на $h = 2h_{1\%}$, но не менее чем на $1,5t$ (t – расчетная толщина ледяного покрова). На нижней границе основного крепления или при сопряжении основного и облегченного креплений предусматривают бермы, упоры из камня или бетона. Размеры упора назначают в зависимости от коэффициента заложения откоса, коэффициента трения крепления и упора по грунту откоса.

Откосы малых плотин обычно крепятся каменной наброской по слою обратного фильтра или естественной песчано-гравийной смеси толщиной 15–20 см. Толщина каменной наброски зависит в основном от высоты волны, коэффициента заложения откоса, крупности и веса камня. Более надежно крепление верхового откоса из одиночной и двойной каменной мостовой по слою щебеночной или гравелистой подготовки толщиной 15–20 см. Толщина каменной наброски обычно 25–30 см и более. Для крепления откосов каменной наброской применяют в основном несортированный камень (горную массу).

Крепление откосов монолитными и сборными бетонными и железобетонными плитами устраивают при высоте волн более 2–2,5 м. Монолитные железобетонные крепления в основном проектируют в виде секций размером не более 45×45 м каждая, разделенных температурными поперечными и осадочными продольными швами.

Верховые откосы высоких плотин и средней высоты обычно крепятся бетонными и железобетонными плитами по слою песчано-гравелистой подготовки. Плиты могут быть монолитные, размером от 5×5 до 20×20 м, толщиной от 15–20 до 50 см; бетонируются они непосредственно на откосе плотины.

Крепление откосов может быть выполнено сборными железобетонными плитами размером от 1,5×1,5 до 1,5×3 м, толщиной от 8–10 до 15–20 см.

Габариты и вес сборных железобетонных плит обуславливаются грузоподъемностью подъемно-транспортных механизмов.

Швы (конструктивные, осадочные, температурные) между плитами могут быть открытые и закрытые.

Плиты, как правило, соединяются между собой или шарнирно или жестко, для чего в торцах плит выпускается арматура

Крепление откосов сборными железобетонными плитами проектируют с омоноличиванием их в секции. Размеры плит устанавливают в зависимости от транспортного оборудования в пределах от 1,5×1,5 м до 5×5 м и толщиной 8–20 см.

Окончание приложения

Статический расчёт каменного крепления (наброски и мощения) заключается в проверке его устойчивости против взвешивающего давления, которое возникает при скате волны с откоса.

Расчет бетонных и железобетонных плит крепления производится на прочность и устойчивость и сводится к определению необходимой толщины плит, проверке их устойчивости на опрокидывание относительно верхнего и нижнего их ребер и на всплывание от взвешивающего волнового давления и других воздействий.

Для повышения устойчивости крепления применяют упоры, располагая их в местах перехода к неукрепленному откосу и на бермах. Бермы упрощают устройство упоров и делают их более надежными. Бетонные упоры выполняются монолитными или сборными.

Низовой откос земляных плотин обычно крепится путем посева трав, покрытия дерном по слою растительной земли в 20–40 см. На крупных плотинах низовые откосы крепятся слоем гравия 10–20 см, в более ответственных случаях – одиночной мостовой. В зоне волнения в нижнем бьефе откос плотины крепится аналогично верховому на высоту вкатывания волны с некоторым запасом.

Крепление низового откоса плотины следует выбирать в зависимости от грунта низовой призмы плотины и в качестве крепления можно рекомендовать:

- а) посев трав по слою растительного грунта толщиной 0,2–0,4 м;
- б) одерновку в клетку по слою растительного грунта толщиной 0,2–0,4 м;
- в) отсыпку гравия толщиной 0,2–0,4 м.

При воздействии на низовой откос льда и волн его крепление рассчитывается так же, как и для верхового откоса.

Обратные фильтры под каменной наброской, плитами с открытыми швами или со сквозными отверстиями выполняют или из одного слоя разнотернистого материала, или двух слоев материалов с различными по крупности частицами, или из искусственных водопроницаемых материалов.

Под обратными фильтрами на откосах из глинистых и мелкозернистых песчаных грунтов применяют песчаную подготовку.

Под монолитными или сборными плитами с уплотненными швами или замоноличенных в секции укладывают однослойный обратный фильтр, а при соответствующем обосновании можно применять монолитные железобетонные бесфильтровые крепления.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГИДРОЛОГИЯ	7
1.1. Предмет изучения, составные части гидрологии.....	7
1.2. Общие сведения о реках	8
1.3. Речной сток	18
1.4. Гидрологические расчёты	35
Вопросы для самопроверки.....	47
2. ГИДРОМЕТРИЯ	49
2.1. Общие положения	49
2.2. Измерение уровней	50
2.3. Промерные работы	53
2.4. Измерение скорости течения воды.....	58
2.5. Определение расходов воды	63
Вопросы для самопроверки.....	67
3. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА	68
3.1. Задачи и виды регулирования стока.....	68
3.2. Характерные режимы, объёмы и уровни воды в водохранилище .	70
Вопросы для самопроверки.....	71
4. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ	73
4.1. Классификация гидротехнических сооружений для водоснабжения и водоотведения.....	73
4.2. Основные положения проектирования плотин из грунтовых материалов	76
4.3. Фильтрационные расчеты тела плотины	95
4.4. Расчет устойчивости плотины	105
4.5. Каменные и каменно-земляные плотины	115
Вопросы для самопроверки.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	126
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	128

Учебное издание

Каледа Ирина Анатольевна
Денисова Наталья Анатольевна
Круглов Леонид Васильевич

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

Редактор Н.Ю. Шалимова
Верстка Т.А. Лильп

Подписано в печать 12.02.14. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 8,14. Уч.-изд.л. 8,75. Тираж 80 экз.
Заказ №49.



Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.