

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

**Акпаралиев Р.А**

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ГЭС**

**Курс лекций для студентов направления  
640200."Электроэнергетика и электротехника"  
по профилю «Гидроэлектроэнергетика»  
всех форм обучения**

**Бишкек – 2014**

УДК.:627-1/-9:621.311.214(072)

*Рекомендовано к печати решением Ученого совета КГТУ им. И.Раззакова  
Протокол № 4от 24.12.2014г.*

Рецензенты: канд.техн.наук, доц. Тагайматова А.А.  
гл. инженер Каскада Аламединских ГЭС Айтуганов У. Ш.  
нач. ЭМЦ Каскада Аламединских ГЭС Бабушкин И.А.

**Акпаралиев Р.А**

**Гидротехнические сооружения ГЭС:** Курс лекции по дисциплине «Гидротехнические сооружения ГЭС» для студентов направления 640200."Электроэнергетика и электротехника" по профилю «Гидроэлектроэнергетика» всех форм обучения / КГТУ им. И. Раззакова; / - Б.: ИЦ «Текник», 2014. - 68 с.

В курсе лекций приводятся нормативные и инженерные методы расчета и проектирования основных гидротехнических сооружений комплексных и энергетических гидроузлов. Даются рекомендации по расчетам и конструированию бетонных и грунтовых плотин, а также основных водосбросных сооружений на скальных основаниях. Рассматриваются вопросы компоновки и конструкций гидросооружений на примерах ряда построенных гидроузлов в Мире.

Предназначены для студентов направления 640200."Электроэнергетика и электротехника" всех форм обучения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Основные требования к проектам гидросооружений.....	5
1. Гидротехника, ее задачи и состав.....	9
1.1. Классификация гидротехнических сооружений.....	10
1.2. Воздействие воды на сооружения.....	12
1.3. Методы гидротехники.....	15
1.4. Общие понятия о водоподпорных сооружениях.....	16
1.5. Плотины и их классификация.....	20
1.6. Взаимодействие напорного гидроузла (плотины) и речного потока.....	26
1.7. Гидрологический режим верхнего бьефа.....	32
2. Бетонные плотины на нескальных основаниях.....	37
2.1. Основные типы и конструкции бетонных плотин.....	37
2.2. Проектирование профиля водослива плотины.....	39
2.2.1. Начальный безвакуумный профиль водослива.....	39
3. Земляные плотины. общие понятия, классификация и условия работы.....	45
3.1. Общие сведения.....	45
3.2. Типы земляных плотин.....	45
3.3. Деление земляных плотин по способам их возведения.....	50
3.4. Условия работы земляной плотины.....	51
3.5. Дренаж плотин.....	53
3.6. Пропуск воды через земляные плотины .....	56
3.7. Выбор типа земляной плотины. Роль имеющихся для плотины материалов.....	56
4. Крепление нижнего бьефа водосливных бетонных плотин.....	60
4.1. Общие вопросы проектирования крепления Нб.....	60
4.2. Общие сведения о креплении Нб водосбросных бетонных плотин.....	64
4.3. Основные элементы крепления Нб.....	65
4.4. Проектирование крепления Нб.....	67
4.5. Гасители энергии простого типа.....	69
4.6. Специальные гасители энергии.....	70
5. Мероприятия, связанные с образованием водохранилищ.....	80
5.1. Проектирование водохранилищ и подпертых бьефов.....	83
5.2. Нижний бьеф.....	86
Литература.....	90

## **ВВЕДЕНИЕ**

Возобновляемые источники энергии, из них особенно гидроэнергетика, за последние десятилетия заняли устойчивое положение в качестве важной составляющей электроэнергетики многих стран мира. Объекты гидроэнергетики могут сооружаться практически на любых водных объектах, имеющих гидроэнергетический потенциал: реках и ручьях, водосбросных сооружениях мелиоративных систем, водосбросах тепловых электростанций, питьевых водоводах, продуктопроводах предприятий, канализационных коллекторах и др. В связи с этим остро встает вопрос о корректности в расчетах и проектировании гидротехнических сооружений, играющих важную роль среди других объектов гидроэнергетики.

Строительство гидроузлов комплексного назначения ведется в самых различных климатических, геологических и топографических условиях нашей страны. Возводятся и намечаются к строительству гидроузлы, в состав которых входят плотины из грунтовых материалов и оптимальные водосбросные сооружения. Прогресс в развитии исследований, проектирования и строительства плотин из грунтов и камня позволил существенно увеличить высоту и объем насыпи плотин, использовать для строительства плотин створы, ранее считавшиеся для этого непригодными; более экономично использовать на месте грунты и камень.

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТАМ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

## Нормативные указания по проектированию гидросооружений

### Общие положения по проектированию

Гидротехнические сооружения (ГТС) следует проектировать исходя из требований комплексного использования водных ресурсов, схем использования водотоков, с учетом положений федеральных, региональных и отраслевых программ совершенствования хозяйства.

При разработке проектов гидроузлов и ГТС необходимо учитывать топографические, инженерно-геологические, гидрологические, сейсмологические, экологические условия строительства, технические характеристики проекта. Типы ГТС, их параметры и компоновку выбирают из сравнения технико-экономических показателей вариантов с учетом:

- функционального назначения ГТС;
- места возведения сооружений, природных условий района строительства (топографических, гидрологических, климатических, инженерно-геологических, гидрогеологических, сейсмических, биологических и др.);
- методов производства работ и трудовых ресурсов;
- развития отраслей хозяйства, в том числе энергопотребления, судоходства, транспорта, объектов орошения и осушения, водоснабжения;
- прогноза изменения гидрологического, включая ледовый режим рек в верхнем (ВБ) и нижнем (НБ) бьефах, заиления наносами и переформирования русла и берегов рек и водохранилищ, затопления и подтопления территорий и инженерной защиты расположенных на них сооружений;
- воздействия на окружающую среду;
- влияния строительства и эксплуатации объекта на социальные условия и здоровье населения.

При проектировании конструкций ГТС необходимо обеспечить их прочность и устойчивость, долговечность, возможность наибольшего

использования местных строительных материалов, условия проведения ремонтно-восстановительных работ. Следует учитывать условия их строительства, возможность сокращения сроков строительства.

Конструкции и размеры ГТС должны обеспечивать благоприятный гидравлический режим потока при пропуске максимальных расчетных расходов воды, маневренность в изменении уровней и расходов, нормальную работу сооружений в сложных наносных и ледовых условиях.

При проектировании ГТС нужно обеспечить:

- их безопасность (надежность) на стадиях строительства и эксплуатации;
- максимальную экономическую эффективность строительства;
- инструментальный и визуальный контроль за состоянием ГТС и их оснований, природными и техногенными воздействиями на них;
- подготовку ложа водохранилища;
- необходимые условия судоходства;
- сохранность флоры и фауны, рыбоохранные мероприятия;
- минимально необходимые расходы воды, благоприятный гидравлический режим в бьефах с учетом интересов водопользователей.

При проектировании ГТС следует рассматривать технико-экономическую целесообразность:

- совмещения ГТС с различными функциями;
- возведения ГТС и поэтапного их ввода в эксплуатацию;
- унификации компоновки оборудования, конструкций и их размеров и методов производства работ;
- использования напора, создаваемого на гидроузлах транспортного, мелиоративного, рыбохозяйственного и энергетического назначения.

### **Обеспечение безопасности гидросооружений**

При разработке проекта ГТС следует руководствоваться безопасностью ГТС и нормативными требованиями по ее обеспечению. ГТС должны отвечать требованиям безопасности, быть удобными в эксплуатации, обеспечивать возможность наблюдений за их работой,

состоянием гидросилового и механического оборудования. В составе проекта ГТС следует разрабатывать специальный проект натуральных наблюдений за их работой и состоянием в процессе строительства и эксплуатации для выявления дефектов, назначения ремонтных мероприятий, предотвращения аварий, улучшения режимов эксплуатации и оценки уровня безопасности.

В составе проекта ГТС должны быть разработаны критерии их безопасности. Перед вводом в эксплуатацию ГТС и во время ее критерии безопасности должны уточняться по результатам натуральных наблюдений за состоянием ГТС, нагрузок и воздействий, а также изменений характеристик материалов ГТС и оснований, конструктивных решений. В соответствии содействующим законодательством ГТС, повреждения которых могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций, на всех стадиях их создания и эксплуатации подлежат декларированию безопасности.

Декларация безопасности ГТС является обязательной частью проекта, ее утверждают в органах надзора за безопасностью ГТС.

Декларация безопасности подлежит корректировке:

1) перед вводом ГТС в эксплуатацию; 2) после первых двух лет эксплуатации; 3) не реже одного раза в каждые последующие пять лет; 4) после реконструкции и капитального ремонта ГТС; 5) при выводе ГТС из эксплуатации и при консервации; 6) после аварийных ситуаций.

При проектировании ГТС должны быть предусмотрены конструктивно-

технологические решения по предотвращению развития возможных опасных повреждений и аварий, которые могут возникнуть во время строительства и эксплуатации. В проектах должны выполняться расчеты по оценке материальных и социальных ущербов от аварии ГТС с прорывом напорного фронта. Следует предусматривать мероприятия по снижению негативных воздействий возможных аварий ГТС на окружающую среду.

## **Требования по охране окружающей среды**

При разработке проекта ГТС следует руководствоваться законодательством России об охране окружающей среды и соответствующими нормативными документами. Следует также рассматривать мероприятия по улучшению экологической обстановки по сравнению с природной, использованию водохранилищ, НБ и соседних земель для развития туризма, рекреации земель и вовлечения их в хозяйственную деятельность.

При создании плотин следует предусмотреть инженерную защиту или перенос жилых и производственных объектов, историко-архитектурных памятников, благоприятные режимы уровней в ВБ и НБ, подготовку затапливаемых территорий, а при необходимости – переселение из района возможного затопления и благоустройство территории. Разработка природоохранных мероприятий должна включать: изучение состояния природной среды, составление прогнозов ее изменений, разработку мер защиты, способов контроля за состоянием среды и дополнительные мероприятия по сохранению экологической обстановки при эксплуатации ГТС.

Для выполнения требований по охране природной среды необходимо

производить оценку и прогнозирование:

- 1) изменения геологических и гидрогеологических условий – режима уровней, условий питания, химизма подземных вод, засоления грунтов;
  - 2) фильтрационных потерь воды из водохранилища;
  - 3) изменений природной среды при создания водохранилища;
  - 4) изменения хода руслового процесса, трансформации русла нижних бьефов, заиления и переработки берегов водохранилищ;
  - 5) изменений термического и ледового режимов в бьефах, образования полыней и заторов льда;
- б) изменения сейсмологической обстановки, частоты землетрясений.

При проектировании ГТС следует учитывать изменения природных условий, которые приводят к следующим негативным процессам в основаниях:



- 1) повышению активности ближайших тектонических разломов;
- 2) подтоплению и затоплению территорий, оценку которых необходимо выполнять, руководствуясь нормативами;
- 3) переработке берегов и заилению водохранилищ;
- 4) химической суффозии растворимых карбонатных пород;
- 5) суффозии песков, суффозионного карста;
- 6) возникновению оползней.

В качестве природоохранных мероприятий для управления развитием указанных процессов следует разрабатывать мероприятия, включающие: бетонирование крупных трещин, дренажно-противофильтрационные устройства, уплотнение, цементацию, инъекцию, планировочные работы, замену грунтов, берегоукрепительные конструкции, оградительные и водоотводные сооружения (дамбы, каналы, трубопроводы), регулирование режима работы ВБ, рекультивацию земель; рекреационные зоны и т.п.

## 1.ГИДРОТЕХНИКА, ЕЕ ЗАДАЧИ И СОСТАВ

Наука об использовании водных ресурсов для различных хозяйственных целей, о борьбе с вредными проявлениями водной стихии и необходимых для этого инженерных сооружениях называется гидротехникой. Инженерные сооружения, при помощи которых непосредственно осуществляются те или иные водохозяйственные мероприятия, называются гидротехническими.

Использование водных ресурсов обычно требует того или иного инженерного воздействия на естественный водный поток или водоем: изменения его расхода (или емкости), уровней водной поверхности, скоростей течения и их направления, изменения воздействий потока на русло и берега, направления части воды данного источника за его пределы при помощи искусственных водоводов (каналов, трубопроводов и т. п.). Такие воздействия осуществляются гидротехническими сооружениями (кратко – гидросооружениями) и частично при помощи гидравлических машин (турбин, насосов и пр.).

Для возведения гидротехнических сооружений, которые обычно омываются водой, служат для нее искусственным руслом, ограждают от нее территории, поднимают ее уровень, выдерживают ее напор и испытывают другие ее воздействия, крайне важно знать законы, управляющие движением и покоем жидкости, в данном случае воды. Поэтому гидромеханика с гидравликой является другой важнейшей наукой, теснейшим образом связанной с гидротехникой и служащей ее опорой.

Поскольку гидротехнические сооружения являются инженерными сооружениями, то науки, необходимые для последних, нужны и для гидротехнических: строительная механика и теория упругости, механика грунтов и инженерная геология, строительные материалы и конструкции, технология строительного производства и др. Особенно важны для гидротехнических сооружений механика грунтов и инженерная геология, так как гидросооружения передают значительные нагрузки на горные породы и грунты, вызывая их деформации, производят изменения в режиме грунтовых вод, нередко опасные. Вода, выходящая из гидротехнических сооружений, может вызвать размыв и разрушение их оснований и берегов, к которым сооружения примыкают.

Таким образом, гидротехника рассматривает и изучает методы использования водных ресурсов для нужд народного хозяйства и средства для этого – гидротехнические сооружения. В частности, рассматриваются методы изысканий и исследований природных условий, в которых будут работать сооружения, методы проектирования (расчетов и конструирования), возведения и эксплуатации сооружений.

## **1.1.КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

а) По роду водоема, потока, источника воды гидротехнические сооружения подразделяются на: 1 – речные, возводимые в реках или связанные с использованием речных вод, 2 – озерные и 3 – морские.

б) По характеру воздействия гидротехнических сооружений на водный поток или водоем и наоборот по условиям воздействия на них воды сооружения эти могут быть разделены на следующие основные виды:

1 – водоподпорные или водонапорные сооружения, создающие и испытывающие на себе подпор воды, удерживающие обычно значительные объемы ее перед собой; сюда относятся в основном плотины и дамбы на реках, озерах, морях, шлюзы, различные перегородивающие водоток сооружения;

2–регуляционные или выправительные сооружения (водонаправляющие, водоограждающие, водостесняющие), задачей которых является регулирование условий протекания потоков в руслах и воздействия воды на берега и дно русла (размывы, отложения наносов), регулирование воздействия озерных и морских волн и течений на побережья и т. п.; сюда относятся берего- и дноукрепительные сооружения, струенаправляющие и отклоняющие поток дамбы, наносозадерживающие сооружения, волноотбойные сооружения (волноломы, молы), сооружения, регулирующие движение льда и плавающих тел (запаны, ледозащитные стенки, ледорезы), и т. п.;

3 –водопроводящие сооружения или водоводы, назначением которых является подвод или отвод воды из одних пунктов в другие; по существу это искусственные русла: каналы, туннели, лотки, трубопроводы;

4 –водозаборные сооружения (водоприемники), задачей которых является забор воды из водотока (реки) или водоема (озера, моря) в нужном количестве для направления ее в водовод;

5 – водосбросные сооружения или водосбросы, служащие для сброса воды из водоемов (водохранилищ, прудов, каналов, напорных бассейнов и пр.).

в) По водохозяйственному назначению все гидротехнические сооружения разбиваются на общие, находящие себе применение в нескольких или во всех отраслях водного хозяйства, и специальные, отраслевые, применяемые только в одной какой-либо отрасли и являющиеся для нее специфическими.

К числу общих гидротехнических сооружений относится большинство перечисленных выше водоподпорных, водопроводящих, водозаборных, водосбросных и регуляционных сооружений.

К числу специальных, отраслевых, сооружений надо отнести:

1–гидроэнергетические сооружения, применяемые при использовании водной энергии, рек, озер и морей – водоприемники, здания гидроэлектростанций, аванкамеры и напорные бассейны, уравнивательные башни и шахты и др.;

2–гидросооружения водного транспорта, служащие для обеспечения судоходства и сплава – судоходные шлюзы, судоподъемники, причальные сооружения (пристани, пирсы, портовые набережные), судоремонтные и судостроительные устройства (эллинги, доки), портовые оградительные сооружения, судоходные указательные знаки (маяки, створные знаки и пр.), лесосплавные сооружения (лотки, бревноспуски, плотоходы, запаны, боны и пр.);

3–гидросооружения для целей мелиорации (оросительные или ирригационные, осушительные и обводнительные) – водозаборные устройства, шлюзы-регуляторы, отстойники, оросительная и осушительная сеть, водомеры, вододелители, дренажные устройства, коллекторы и пр.;

4–гидросооружения для целей водоснабжения и канализации – водоприемники, каптажные сооружения, насосные станции, фильтры, пруды-охладители, брызгальные бассейны, очистные устройства, коллекторы, ливнеспуски, колодцы и пр.;

5 – гидросооружения для использования водных недр – для рыбного хозяйства – рыбоходы, рыбоподъемники, рыбоспуски, рыбоводные пруды и бассейны и пр.

## 1.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДЫ НА СООРУЖЕНИЯ

От других инженерных сооружений гидротехнические отличаются тем, что они несут свою службу, находясь в воде – стоячей или движущейся, соленой (морской) или пресной, которая оказывает на них механическое, физико-химическое и биологическое действия.

а) Механическое действие воды на сооружения сказывается в виде давления – гидростатического и гидродинамического. Давление воды является основной нагрузкой большинства гидросооружений, определяющей их размеры и формы.

В особенности велико значение горизонтальной составляющей давления воды – напора – в подпорных сооружениях, стремящегося сдвинуть сооружение по его основанию или вместе с частью основания.

Гидродинамическое давление возникает в результате движения воды, в особенности учет его важен при значительных скоростях, действии ветровых волн, гидравлического удара, а в сейсмических районах – в результате действия сейсма. Гидродинамическое силовое воздействие оказывает и вода, фильтрующаяся в основании сооружений или в пористом материале.

Но вода оказывает механическое давление на гидросооружения не только как жидкость. Зимой и ранней весной ледяной покров, образующийся в водоемах, может производить статическое давление при повышении температуры льда и динамическое – в виде ударов плывущих льдин.

Наносы, влекаемые потоком, осаждаясь перед гидросооружением, создают на последнее также статическое давление (распор), действующее в ту же сторону, что и напор воды.

б) Физико-химическое действие воды сказывается на материале сооружений и на водопроницаемом грунте основания. Так, движущаяся с большими скоростями вода, особенно если она влечет с собой наносы, истирает поверхности сооружения (каменные, бетонные, деревянные), иногда в короткий срок приводя их в негодность, разрушает речное ложе, даже скальное; металлические части подвергаются коррозии (ржавлению и окислению), вследствие чего полезная толщина их постепенно уменьшается, в среднем для стали и на 0,02—0,08 мм в год.

Бетонные части сооружений, подвергаясь действию фильтрующейся через них воды, могут разрушаться в результате выщелачивания из них несвязанной (свободной) извести, если вода обладает агрессивными свойствами, или в результате периодического замерзания и оттаивания воды в порах и трещинах бетона. Фильтрационные воды ведут также разрушительную работу в основаниях сооружений, если в последних присутствуют включения гипса, ангидрита, каменной соли и тому подобных легкорастворимых веществ.

в) Биологическое действие воды сказывается в некоторых случаях также неблагоприятно, так как различные организмы, живущие в воде, ведут свою разрушительную работу. Последняя выражается в процессах гниения дерева; наблюдаются и явления бактериальной коррозии материалов.

Многообразное воздействие воды на гидротехнические сооружения заставляет принимать ряд, иногда сложных, мероприятий по защите от разрушений их материала, а также основания и береговых примыканий.

Описанные воздействия воды на сооружения не являются постоянными; они изменяются во времени, поскольку изменчивы все гидрологические факторы: расходы и уровни воды, напоры, скорости течения и пр. Приходится учитывать эту изменчивость и, в особенности, возможные максимальные (экстремальные) значения этих факторов и предвидеть их на длительный ряд лет вперед. При этом надо иметь в виду, что ошибки в оценке тех или иных факторов приводили и могут иногда приводить и в будущем к авариям гидротехнических сооружений и даже катастрофам. Необходимо данному вопросу уделять особо большое внимание, чтобы избежать таких тяжелых последствий.

***Индивидуальность гидросооружений.*** Гидротехнические сооружения по их размерам, форме и условиям работы теснейшим образом связаны с топографическими, геологическими и гидрологическими условиями места постройки. Особенно важны геологические условия, которые очень часто именно и определяют тип сооружения, его размеры и стоимость, а отсюда и общую экономичность водохозяйственного предприятия. А так как комплекс конкретных топографических, гидрологических и геологических условий почти не повторяется в природе, то почти каждое гидротехническое сооружение весьма индивидуально. В гидротехническом проектировании поэтому не может быть, как правило, шаблона, и в каждом отдельном случае гидротехническая задача решается индивидуально, своеобразно, на основе глубокого изучения местных условий путем специальных изысканий и исследований, анализа этих условий и учета в проектировании.

Вместе с тем это отнюдь не исключает возможности широкого применения сборности отдельных элементов и их стандартизации.

### 1.3.МЕТОДЫ ГИДРОТЕХНИКИ

Теоретическое исследование вопросов является, конечно, основным методом, так как приводит к установлению зависимостей и закономерностей, позволяющих рассчитывать гидротехнические сооружения, т. е. определять их формы и размеры, не прибегая к эксперименту, устройству моделей и пр.

Экспериментальный лабораторный метод играет большую роль в гидротехнике. Он применяется в двух видах: в общем, когда специальным опытом проверяются те или иные положения теории или когда на основе системы опытов строится теория, и в виде лабораторного моделирования сооружений и конструкций, когда последние выполняются в виде геометрически подобных или с заранее заданными искажениями моделей, на которых замеряются искомые величины (давления жидкости, скорости течения, деформации и пр.). Моделирование играет большую роль в гидротехнике, позволяя находить правильные решения при отсутствии возможности использовать теоретические решения или вообще при отсутствии последних.

Экспериментальный натурный метод отличается от предыдущего тем, что опыты и наблюдения проводятся не в лаборатории, а на строящихся, выстроенных и эксплуатируемых гидротехнических сооружениях, а иногда и на специальных опытных сооружениях, выполненных в натуральную величину. При помощи этого метода проверяется правильность теоретических расчетных данных, положенных в основу проекта сооружения, и накапливаются новые данные для разработки теорий.

Метод вариантного проектирования, заключающийся в рассмотрении ряда вариантных решений задачи и их технико-экономическом сопоставлении, позволяет установить зависимости в сравнительно узких конкретных границах и найти наиболее целесообразное в техническом и экономическом (т. е. народнохозяйственном) отношении решение.

Статистический метод применяется для обобщения данных по многократно применявшимся типам конструкций и получения статистических зависимостей, которые могут быть использованы в дальнейшем. Пользоваться этим методом следует с осторожностью, так как этот метод отражает, так сказать, «вчерашний день» техники, ее прошлое, и необходимо, используя его, учитывать тенденции дальнейшего развития теории и практики в данной области.

Метод аналогий и повторения решений – наиболее примитивный, но при правильном применении в конкретных случаях надежный. Он заключается в использовании решения или конструкции, уже примененной на практике в известных условиях, для данного случая, условия которого сходны с условиями аналога или образца.

Метод этот следует применять также осторожно, так как с одной стороны, в гидростроительстве природные условия для сооружений редко вполне повторяются, а с другой – легко впасть в консерватизм, отказываясь от поисков новых решений.

Одним из полезных проявлений метода аналогий является разработка типовых решений для конструкций или их деталей, часто повторяемых в узле или системе.

## 1.4. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

**Виды водоподпорных сооружений.** Водоподпорным называется сооружение, удерживающее с одной своей стороны воду на более высоком уровне, чем с другой.

Часть водоема, реки или канала по ту сторону водоподпорного сооружения, где имеется более высокий уровень воды, называется верхним бьефом (сокращенно в. б.), или подпертым бьефом, а по другую сторону, где уровень более низок, называется нижним бьефом (н. б.). Разность уровней воды верхнего и нижнего бьефов называется напором или подпором; в некоторых случаях вода в нижнем бьефе может отсутствовать.

а) Водоподпорные сооружения, перегораживающие речное русло или речную долину, носят название плотин. Плотины небольшой высоты,



в частности, устраиваемые в речном русле для регулирования речной эрозии, носят название порогов и запруд. б) Водоподпорные земляные сооружения, устраиваемые по берегам рек для защиты береговых земель от временного затопления паводками, носят название дамб, или валов.

в) Водоподпорные сооружения, обычно земляные, устраиваемые для защиты морских или озерных побережий от затоплений морем или озером при подъемах воды в них в результате приливов или ветровых нагонов, называются морскими или озерными дамбами.

г) К числу водоподпорных сооружений относится также ряд специальных сооружений, как например, некоторые типы зданий гидроэлектростанций, стены напорных бассейнов, судоходные шлюзы, плотоходы, шлюзы на мелиоративных (оросительных, осушительных) системах и некоторые другие.

**Назначение гидроузлов.** Комплексы гидротехнических сооружений, в которых создается подпор воды, называются подпорными или напорными гидроузлами.

В соответствии с водохозяйственными целями, для которых напорные узлы сооружений возводятся, они могут быть:

а) гидроэнергетическими, если цель гидроузла – получение гидроэнергии и в состав гидроузла входит гидроэлектростанция, которая непосредственно использует энергию создаваемого перепада воды;

б) воднотранспортными, или транспортными, если основное назначение узла – обслуживание водного транспорта и в составе сооружений имеются транспортные сооружения; воднотранспортные гидроузлы могут подразделяться на судоходные, если река судоходна, и лесосплавные, если на реке имеет место только лесосплав и нет судоходства; создаваемое этими узлами повышение уровня воды в реке увеличивает глубины ее, уменьшает скорость течения и вообще улучшает условия судоходства;

в) водозаборными, если назначение узла – только обеспечение забора воды из реки для отвода ее каналом, трубопроводом, туннелем;

г) водохранилищным или регулирующими сток, если назначение узла – перераспределение расходов воды на нижележащем участке реки,

например, для борьбы с паводками, наводнениями, для целей благоустройства; эти цели достигаются образованием водохранилища, в котором в период паводков на реке задерживается часть воды, а в период маловодья или в соответствии с потребностями она выпускается из водохранилища.

**Классификация гидроузлов по величине напора.** По величине напора, создаваемого узлом на реке, гидроузлы делятся:

а) на узлы низконапорные, или русловые, в которых нормальный подпертый уровень, как правило, не выходит за пределы меженного русла и при этом пойма не затопляется; величина напора в наших условиях – примерно 2—8 м;

б) узлы среднего напора или средненапорные – с напором порядка от 8—10 до 30—40 м, для наших равнинных рек характерны при использовании гидроэнергии напоры в 12—25 м.

в) узлы высокого напора, или высоконапорные, величина напора которых превышает 40 м.

Следует отметить, что границы между отдельными видами напорных узлов, конечно, условны и даны применительно к природным условиям нашей страны. Однако величина напора имеет значение не только для выбора типов сооружений и компоновки их, но нередко определяет и назначение узла. Так, низконапорные узлы строятся обычно в целях водозабора или для судоходства и реже бывают энергетическими (исключение – узлы малых гидроэлектростанций).

Средненапорные гидроузлы чаще всего бывают энергетическими и транспортно-энергетическими, на малых реках – также регулирующими сток. Высоконапорные узлы в основном строятся для нужд энергетики и регулирования стока в разных водохозяйственных целях.

**Состав сооружений в гидроузлах.** В состав гидроузла входят постоянные и временные сооружения.

а. Постоянные сооружения делятся на основные, вспомогательные и прочие. Основные сооружения обеспечивают нормальную работу гидроузла и делятся на общие, создающие необходимые напор, емкость верхнего бьефа и гидравлические условия, соответствующие измененному

узлом гидрологическому режиму, и специальные, осуществляющие специальные водохозяйственные функции, для которых построен узел, т. е. воднотранспортные, энергетические и прочие сооружения.

Общими сооружениями являются:

а) плотины, создающие напор и емкость верхнего бьефа (водохранилище);

б) водосбросы – водосливы и водоспуски, обеспечивающие сброс излишков воды и опорожнение водохранилища; нередко водосбросом является плотина или часть ее;

в) ледо- и шугосбросные и ледозадерживающие сооружения, позволяющие удалять из верхнего бьефа лед и шугу или защищать от них сооружения (ледозащитные стенки, запани и пр.);

г) наносоудаляющие (промывные) устройства, позволяющие сбрасывать в нижний бьеф скапливающиеся в нежелательных для сооружений местах донные наносы;

д) регуляционные (выправительные) сооружения – продольные и поперечные дамбы, ограждающие дамбы, берегоукрепительные одежды и пр., направляющие поток к отверстиям сооружений наиболее целесообразно с гидравлической точки зрения и защищающие земляные части сооружений и берега от размывов;

е) сопрягающие сооружения, задачей которых является правильное конструктивное и гидравлическое сопряжение различных по назначению и конструкции сооружений узла, например, сопрягающие устои, дамбы, отдельные быки и т. п.

Вспомогательные сооружения необходимы для осуществления эксплуатации основных и специальных сооружений; к ним относятся: жилые и административно-хозяйственные здания (эксплуатационный поселок, водоснабжение, канализация, связь, освещение и пр.), дороги на территории узла и подъездные к нему, мастерские и пр.

Прочие сооружения лишь косвенно, а не функционально связаны с гидроузлом, например, транзитные дороги с мостами через реку в зоне узла, промышленные предприятия, возникшие на базе узла, если они расположены в непосредственной близости к нему, и т. п.

б. К временным сооружениям относятся перемычки, временные мосты, дороги, силовые станции, бетонные заводы, мастерские деревообделочные и механические, рабочий поселок и прочие сооружения, необходимые для постройки постоянных сооружений.

Часть временных сооружений иногда остается и на период эксплуатации и, так сказать, совмещается с постоянными (например, дороги, мастерские, часть зданий рабочего поселка, иногда часть перемычек, временные водосбросы и т. д.). Совмещение временных сооружений с постоянными удешевляет строительство гидроузла, и потому всюду, где это возможно, стремятся к такому совмещению.

## 1.5. ПЛОТИНЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

В напорных гидроузлах плотина является главнейшим и наиболее ответственным сооружением, и чем выше напор, тем относительное значение плотины больше. Вместе с тем принципы проектирования и строительства плотин полностью могут быть использованы и в отношении всех других видов водоподпорных сооружений.

*Классификация плотин по основному материалу, из которого они устраиваются.* По этому признаку плотины могут быть подразделены на следующие типы.

1. Земляные плотины, основным материалом которых является земля, т. е. песчано-глинистый, песчаный и тому подобные грунты. Это самый древний вид плотин, получивший в последнее время новое развитие; наибольшая достигнутая высота таких плотин – около 140 м.

2. Плотины из каменной наброски и из сухой каменной кладки, в основном выполняемые из камня без применения вяжущих веществ.

Наибольшая достигнутая высота таких плотин – около 125 м.

3. Плотины каменно-земляные, в которых применены земля и каменная наброска; наибольшая осуществленная высота таких плотин – 115 м.

4. Каменные плотины, выполняемые из каменной (бутовой) кладки на растворе, широко распространенные в 19 и начале 20 в., в настоящее время из-за невозможности широкой механизации процесса кладки строятся редко. Наибольшая высота их – 95 м.

5. Бетонные плотины, являющиеся в настоящее время наиболее распространенными во всех странах. Наибольшая достигнутая высота их – 222 м, в постройке – плотина высотой 278 м.

6. Железобетонные плотины, в которых в основном применен железобетон, хотя имеются и бетонные элементы, а иногда даже и каменная кладка.

7. Деревянные плотины, имеющие обычно каменную или земляную загрузку (в частности ряжевые плотины); имеют обычно небольшую высоту, но есть примеры плотин до 22 м.

8. Стальные плотины двух типов:

а) с неподвижными металлическими частями (имеется лишь несколько примеров, наибольшая высота до 22 м);

б) с металлическими подвижными частями или затворами, которые фактически несут всю нагрузку от воды (например, плотины с поворотными фермами, с поворотными рамами, мостовые и др.); плотины эти широко распространены и обычно имеют небольшой напор.

9. Плотины комбинированные из различных материалов.

**Классификация плотин по конструктивным признакам.** По условиям конструктивным, характеру восприятия ими силовых воздействий и сопротивления их сдвигу от напора воды плотины могут быть разбиты на три основные группы:

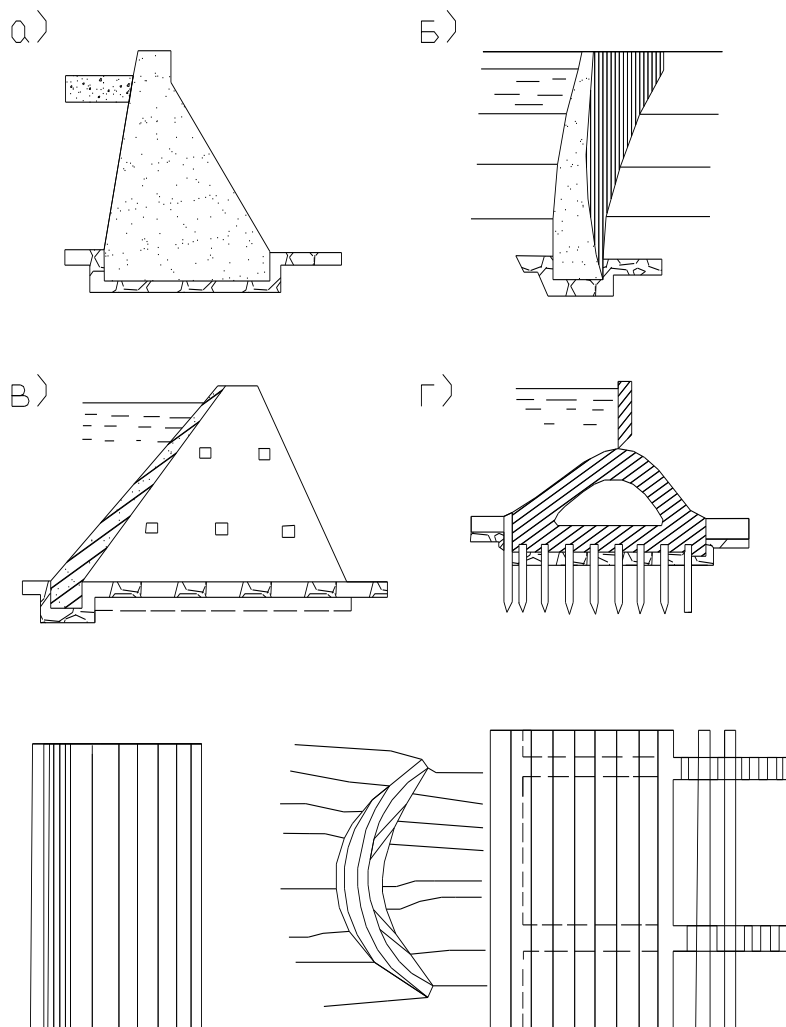
1) гравитационные, обладающие значительным весом для создания сил трения по основанию, сопротивляющихся сдвигающим усилиям от воды, действующим на плотину. Сюда относятся земляные, каменно-набросные, бетонные, ряжевые деревянные и другие плотины; в более тесном смысле, под названием гравитационных понимают у нас массивные бетонные и каменные плотины (*рис.1,а*);

2) арочные, криволинейные в плане, работающие как свод с вертикальной осью, передающий давление от воды через свои пяты скалистым берегам речной долины; строятся из бетона, железобетона, камня и редко из дерева(*рис.1,б*);

3) контрфорсные, или ребристые, в которых давление воды передается через напорные перекрытия в виде плит, арок и т. п.

вертикальным контрфорсам (ребрам), откуда и название данного типа плотины; эти плотины выполняются из бетона, железобетона, металла, дерева (*рис. 1,в*);

4) заанкеренные или консольные (*рис. 1,г*), в которых сопротивление сдвигу обеспечивается в значительной мере благодаря заделке конструкции в грунт основания (например, свайные или шпунтовые плотины, плотины с анкерным глубоким зубом и т. п.).



*Рисунок 1 - Схемы основных конструктивных типов плотин: а - гравитационная; б - арочная; в - контрфорсная (ребристая) железобетонная (с плоской напорной плитой); г - заанкеренная (со сваями)*

**Деление плотин по условиям пропуска ими воды.** Вода из верхнего бьефа может выпускаться в нижний или через плотину или через другие сооружения гидроузла.

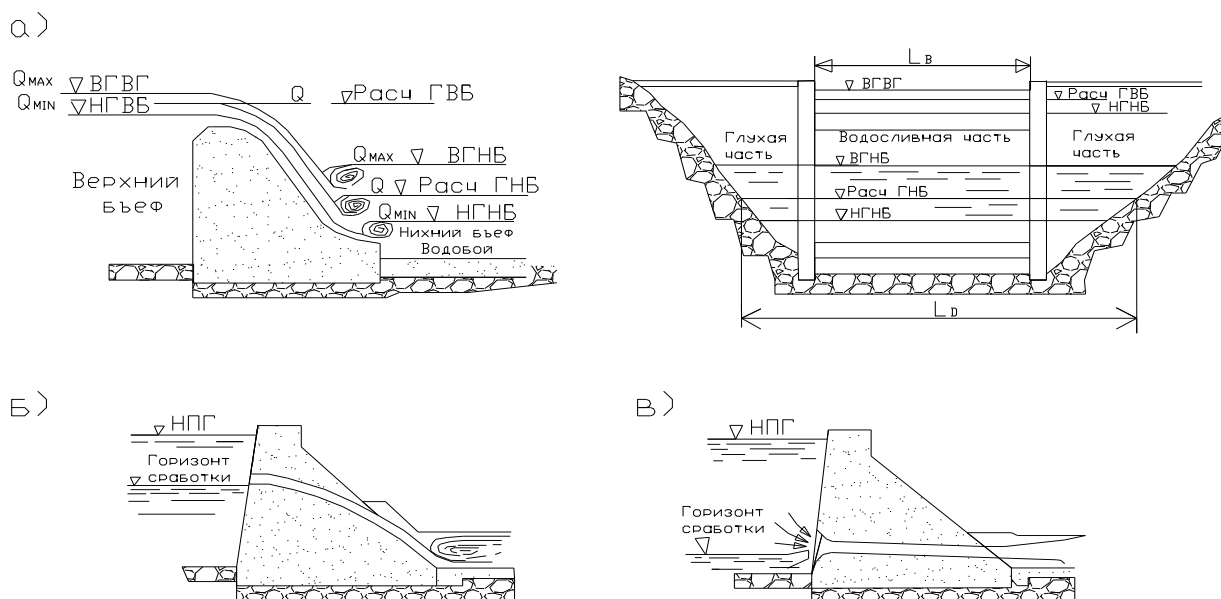
Плотины, не допускающие пропуска через них воды, называются глухими, а допускающие – водопрпускными, или водосбросными. Пропуск воды через плотину может производиться при помощи отверстий в ее теле: поверхностных, или водосливных, работающих по принципу водослива (*рис.2,а*) и глубинных, или водоспускных, работающих по принципу напорных труб (*рис.2,б,в*).

Часть плотины, занятая водосливными отверстиями, называется водосливной, или водосливом; если перелив воды допускается по всей длине плотины, то вся плотина называется водосливной.

Глубинные отверстия располагаются на некоторой глубине от уровня верхнего бьефа, положение порога их характеризует предел опускания уровня водохранилища; если порог устроен у дна реки, то отверстие называется донным (*рис. 2,в*) и фактически позволяет опорожнить весь верхний бьеф (водохранилище).

Для того чтобы можно было регулировать пропуск расходов воды через плотину по желаемому графику, отверстия плотины должны иметь затворы, позволяющие закрыть или открыть отверстия полностью или частично.

Водоспуски и глубинные отверстия снабжаются затворами всегда, водосливы же могут не иметь затворов. В последнем случае уровень воды верхнего бьефа будет зависеть от проходящего через водослив расхода воды (*рис. 2,а*), если только нет других отверстий в узле: наивысший уровень будет соответствовать максимальному расходу  $Q_{max}$ , наинизший – минимальному  $Q_{min}$ , следовательно, водосливная плотина без затворов не может регулировать ни расходов, ни горизонта воды в. б.



ВГВБ -Высокий горизонт верхнего бьефа, НГВБ -Низкий горизонт верхнего бьефа  
 ВГНБ -Высокий горизонт нижнего бьефа, НГНБ -Низкий горизонт нижнего бьефа  
 Расчет ГВБ -Расчетный горизонт верхнего бьефа, НПГ -Нормальный подпорный горизонт  
 Расчет ГНБ -Расчетный горизонт нижнего бьефа.

Рисунок 2 - Типы водосбросных отверстий в плотинах:

а - водосливное; б - глубинное; в - донное

Плотины с затворами (рис. 3 а), закрывающими водосливные или водоспускные отверстия, наоборот, могут удерживать уровень воды в б. на желаемой отметке. Это достигается тем, что при уменьшении расхода в реке уровень воды в в. б. удерживается на нужной высоте путем полного или частичного закрытия отверстий затворами, что уменьшает их пропускную способность в соответствии с изменившимся расходом; при возрастании же расхода площадь отверстий увеличивается путем открытия затворов. Таким образом, плотина с затворами позволяет регулировать уровень воды в верхнем бьефе, что весьма важно для практических целей.

В низконапорных гидроузлах, где напор на плотине не превышает обычно бытовых колебаний уровня воды, приходится во избежание значительного против бытового подъема уровня в в. б. при паводках устраивать отверстия плотин настолько значительными, что, будучи открыты, они освобождают почти все поперечное сечение русла за исключением сравнительно низкого порога, на котором стоят затворы (рис. 3.б).



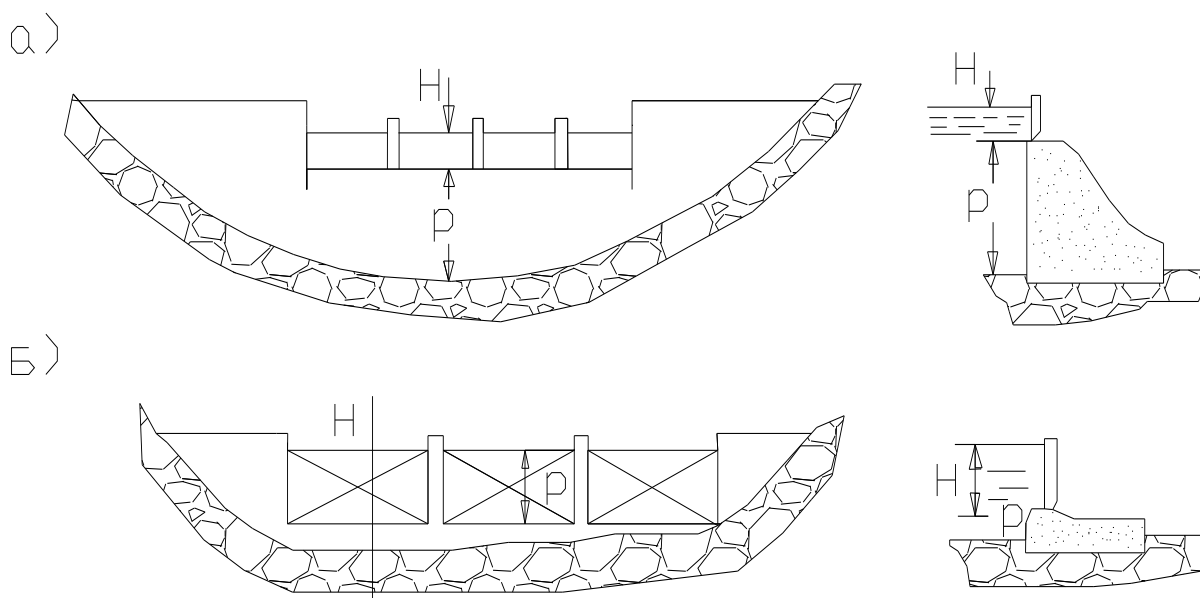


Рисунок 3 - Водосливная плотина  
 а- с высоким порогом; б- с низким порогом

В зависимости от относительной высоты порога водосливные плотины делятся на две группы:

а) плотины с высоким порогом (рис. 3,а), у которых

$$\frac{P}{H} > 2,5 - 3;$$

б) плотины с низким порогом (рис. 3,б), у которых

$$\frac{P}{H} < 1;$$

Водосливные плотины, характеризуемые отношением

$$1 < \frac{P}{H} < 2,5 - 3.$$

можно называть плотинами с повышенным порогом.

Если скорости течения в отверстиях плотин с низким порогом в период паводка не превышают допустимых для судоходства (1,8–2,0 м/сек), а размеры отверстия по глубине и ширине допускают движение судов через них, такие плотины иногда называют судоходными. Аналогично плотины, допускающие пропуск сплавляемого леса, называются лесосплавными.

## 1.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАПОРНОГО ГИДРОУЗЛА (ПЛОТИНЫ) И РЕЧНОГО ПОТОКА

### *Действие плотины (узла) на верхний и нижний бьефы.*

Водоподпорное сооружение, возведенное в реке, создает подъем уровня воды в верхнем бьефе, что влечет за собой ряд последствий, как-то: уменьшение скоростей течения, отложение наносов, подъем уровня грунтовых вод по берегам и пр. При регулировании плотиной (гидроузлом) речного стока изменяется гидрограф (ход расходов воды) в нижнем бьефе, а при задержании в в. б. наносов русло в н. б. постепенно понижается, а с ним понижаются меженные уровни реки и уровни грунтовых вод.

*Действие речного потока на водоподпорные сооружения, имеющие водосбросные отверстия, и прилегающий участок русла.* В верхнем бьефе у плотины поток имеет обычно скорости течения, меньшие, чем они были до создания подпора. Однако на подходе к водосбросным отверстиям местные скорости возрастают, и при известном их значении возможны размывы русла.

При наличии водосливного отверстия (*рис. 4,а*) увеличение скоростей от  $v_0$  в русле до  $v_1$  на водосливе приведет к тому, что наносы непосредственно у плотины отложатся более рыхло вследствие водоворотных движений. При наличии водоспуска (*рис. 4,б*) увеличенная до  $v_1$  скорость течения может вызвать размыв дна, а иногда и берегов.

В пределах тела плотины (*рис. 4*) скорости течения от  $v_1$  возрастают до  $v_2$  и  $v_3$  (пропорционально корню квадратному из величины напора), достигая 10–25 м/сек (в плотинах с напорами 5–50 м) и более. Движущаяся с такими скоростями вода производит динамическое воздействие на сооружение ввиду возникающих пульсаций потока, его изгиба соответственно форме слива, местных сопротивлений, вакуумов и пр.

В нижнем бьефе за плотиной значительная кинетическая энергия потока, пропорциональная расходу воды и квадрату скорости  $v_3$ , неизбежно разрушает русло, вызывает глубокие размывы даже скального грунта дна реки, что будет угрожать целостности плотины.

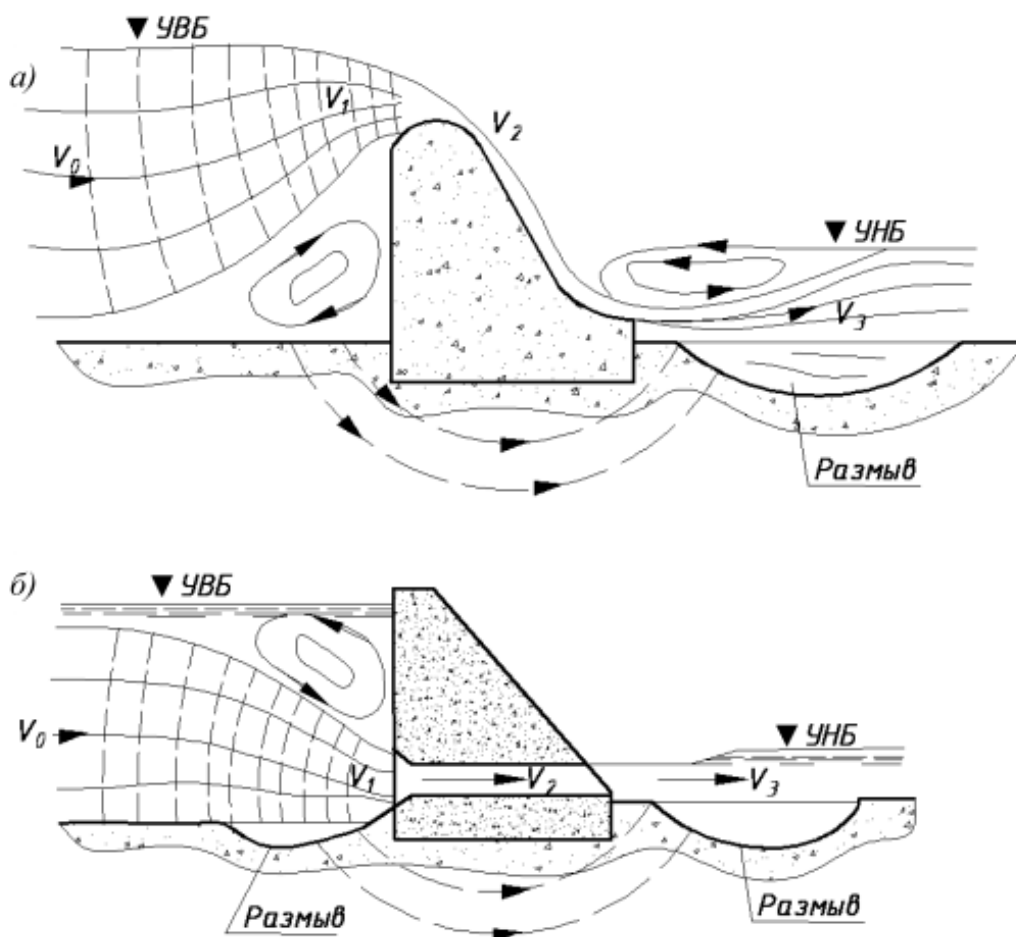


Рисунок 4 - Воздействие потока на подпорное сооружение и русло

Описанная обстановка требует при устройстве плотины принятия следующих мер для обеспечения прочности и устойчивости сооружения:

а) в верхнем бьефе – покрытие размываемых участков русла защитными одеждами;

б) в нижнем бьефе – гашение избыточной кинетической энергии искусственными мерами и защита русла от разрушения специальными покрытиями.

Для этого непосредственно за водосливом укладывают массивную плиту, называемую водобоем (рис. 5); на водобое в основном теряется большая часть кинетической энергии (путем образования вальцов при сопряжении потока с водой и б. благодаря устройству выступов, порогов, стенок, о которые ударяется, расщепляется поток, и пр.); за водобоем следует обычно гибкое, проницаемое для воды, покрытие, называемое рисбермой (рис. 5), на которой скорости потока доводятся до величин, не опасных для грунта русла;

в) придание поверхностям сооружения, по которым движется поток, плавной формы, которая должна быть так подобрана, чтобы местные сопротивления потоку, удары и прочие причины вибрации сооружения были доведены до минимума.

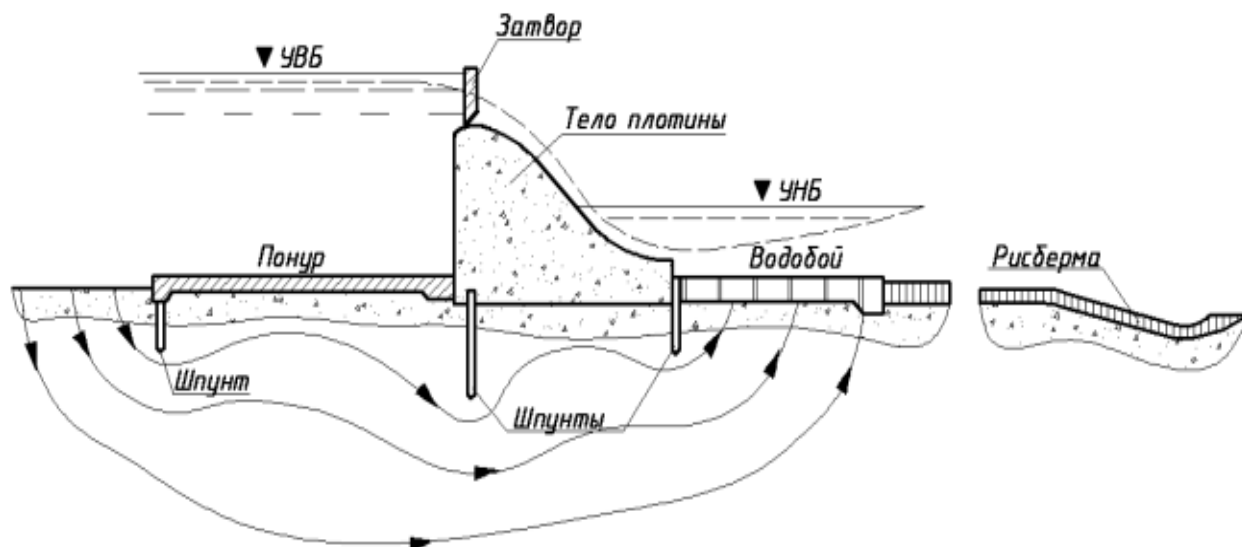


Рисунок 5 - Схема противофильтрационных устройств в плотине на не скальном основании

**Фильтрация воды под сооружениями.** Основание плотины – различные горные породы – обычно в той или иной мере проницаемы для воды. Как известно, наиболее проницаемы для воды грунты галечные, гравелистые, затем песчаные, супесчаные, менее всего проницаемы суглинки и глины. Скальные породы тоже пропускают через себя воду, если они трещиноваты, что, как правило, всегда имеет место в их верхних слоях.

Естественно поэтому, что после поднятия плотиной подпора основание сооружения насыщается водой, которая движется по порам и трещинам из верхнего бьефа в нижний, из зоны большего давления в зону меньшего давления (рис. 4) и (рис. 5) – пути движения показаны пунктиром). Это движение называется фильтрационным, или фильтрацией воды.

Фильтрация воды под гидротехническим сооружением влечет за собой такие последствия.

1. Происходит потеря (утечка) воды из верхнего бьефа в нижний.

2. Фильтрующаяся вода оказывает гидростатическое давление на подошву сооружения, направленное снизу вверх и постепенно уменьшающееся от верхнего бьефа к нижнему. Это давление называется фильтрационным (иногда его называют противодавлением ввиду направления его противоположно направлению сил веса). Фильтрационное давление как бы облегчает сооружение, уменьшает его вес и сопротивление сдвигающим сооружение горизонтальным силам.

3. Фильтрующаяся вода может действовать на породы основания химически, растворяя соли, имеющиеся в породах, вынося их в нижний бьеф и создавая пути для дальнейшего роста фильтрации; образующиеся в породе полости постепенно ослабляют ее и уменьшают несущую способность основания. Это явление называется химической суффозией грунта.

4. В несвязных грунтах (песок и т. п.) фильтрующаяся вода может увлекать за собой мелкие и мельчайшие частицы грунта, вынося их в нижний бьеф, что также приводит к ослаблению основания и осадкам его и сооружения. Этот процесс носит название механической суффозии или часто называется просто суффозией грунта. Вынос мелких частиц из грунта основания делает его более проницаемым для воды, скорости фильтрации возрастают, фильтрационный поток оказывается способным выносить частицы большего размера, и при дальнейшем своем развитии явление может закончиться разрушением основания и аварией сооружения.

5. При выходе фильтрационного потока в нижний бьеф струйки воды движутся почти вертикально вверх; производя давление на частицы грунта, они могут при известных условиях привести его как бы во взвешенное состояние и приподнять разрыхленную массу грунта вверх, вследствие чего произойдет недопустимая деформация сооружения, что может привести к аварии. Это явление называется выпором грунта.

Таким образом, фильтрация воды под гидротехническим сооружением может привести к катастрофическим последствиям. Для надежности сооружения необходимо предотвратить эту опасность, что достигается главным образом удлинением путей фильтрации, в результате чего при том же напоре на сооружении уменьшаются скорости и градиенты фильтрации, а с ними и опасность суффозии или выпора.

Удлинение путей фильтрации создается так, чтобы большая часть напора была израсходована на сопротивления по пути из верхнего бьефа до подошвы сооружения. Для этого впереди плотины устраивают водонепроницаемое покрытие, называемое понуром (рис. 5), а под понуром и сооружением – вертикальные преграды в виде шпунтовых стенок, или шпунтов (рис. 5), в нескальных грунтах либо в виде цементационных, битумных и других завес в скальных породах.

**Фильтрация воды в берегах в обход сооружений.** Аналогичный процесс фильтрации совершается и в берегах русла или долины, к которым примыкает подпорное сооружение. Вода из верхнего бьефа, проникая в грунт берега, движется в порах его или трещинах в обход берегового примыкания сооружения в нижний бьеф. Здесь могут происходить и явления суффозии, и оползание берегов в нижнем бьефе, и неизбежны потери части воды из верхнего бьефа.

Борьба с этим явлением ведется путем специальных мер в береговых примыканиях, удлиняющих пути обходной фильтрации или снижающих поверхность уровней грунтовых вод.

**Силовые воздействия на гидросооружения и статическая роль основания.** Силовые воздействия на гидротехнические сооружения складываются из: 1) веса сооружения; 2) различных нагрузок на него от оборудования, транспорта, людей и пр.; 3) воздействий поверхностного и подземного (фильтрационного) потоков воды; 4) прочих сил.

Все эти силы можно свести к равнодействующей  $R$ , направленной под некоторым углом к горизонту. Для равновесия сооружения необходимо, чтобы основание его смогло реализовать реактивные силы, равнодействующая которых  $R'$  направлена прямо противоположно равнодействующей нагрузок сооружения и по величине равна ей.

Под влиянием силы  $R$  в основании возникает новое напряженное состояние; при этом, как правило, основные напряжения (сжатие, скалывание), существовавшие в основании до постройки сооружения, возрастают; для безопасности сооружения они не должны превзойти допустимых для материала основания величин.

Под влиянием тех же указанных выше сил в основании могут произойти деформации упругие и неупругие. Эти деформации также не должны превосходить известных пределов в зависимости от конструкции сооружения.

Если сооружение не связано с основанием силами сцепления, то основной силой, сопротивляющейся сдвигу сооружения по основанию, будет сила трения  $S = fP$ , где  $P$  – нормальная к плоскости основания составляющая равнодействующей нагрузок и  $f$  – коэффициент трения сооружения по материалу основания. Для равновесия сооружения необходимо, чтобы составляющая  $Q$  равнодействующей  $R$ , параллельная плоскости основания:

$$Q \leq fP \quad (1)$$

Величина силы  $Q$  будет тем больше, чем больше напор сооружения. Поэтому для устойчивости на сдвиг сооружений большого напора требуются, согласно (1), значительные вертикальные силы, т. е. главным образом вес сооружения. Большую роль играет величина коэффициента трения  $f$ . При малых величинах  $f$  (например, у глинистых и песчаных оснований) и во избежание значительного веса сооружений необходимое сопротивление сдвигу повышается искусственными мерами (например, устройством заглубленного зуба плотины, анкерного понура или общим заглублением сооружения в материал основания, забивкой свай и пр.).

Таким образом, основание сооружения может надлежащим образом сопротивляться силам, действующим на него, если оно обладает:

- 1) достаточным сопротивлением сжатию и особенно скалыванию;
- 2) достаточно высоким модулем упругости и модулем деформаций, гарантирующим сооружение от чрезмерных деформаций (осадок);
- 3) достаточным коэффициентом трения между ним и материалом сооружения.

Далее, крайне важно, чтобы указанные выше свойства материала основания были достаточно неизменны во времени или, во всяком случае, не изменялись в дальнейшем в худшую сторону под воздействием сооружения, а также под влиянием климатических, геологических и других факторов. К числу таких неблагоприятных явлений относятся

размягчение пород, потеря сцепления, уменьшение коэффициента трения под влиянием фильтрации воды; выщелачивание пород, увеличение пористости, трещиноватости под химическим воздействием воды, размыв пород водой, сбрасываемой через сооружения, и т. п.

## 1.7.ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕГО БЬЕФА

Верхний бьеф условимся называть *подпертым бьефом*, если он не осуществляет сезонного, годового и многолетнего регулирования стока реки и уровень его является стабильным, с возможными небольшими колебаниями (например, при суточном регулировании стока).

Если же верхний бьеф осуществляет регулирование стока, по крайней мере сезонное, т. е. в нем накапливаются значительные объемы воды, то он называется *водохранилищем*. Уровень воды водохранилища может колебаться в значительных пределах – от нескольких до десятков метров.

**Подпор плотины и режим уровней воды.** Подпор, созданный плотиной и гидроузлом, распространяется на значительное расстояние.

Для полной ориентировки в условиях будущего режима реки необходимо построить кривые подпора как для меженных вод, так и для самых высоких паводочных, а также для промежуточных расходов воды в реке.

Особые условия распространения подпора создаются в подпертых бьефах низконапорных плотин на реках, влекущих значительное количество наносов, в частности на горных реках. Вследствие быстрой заносимости бьефа наносами в верхнем бьефе образуется новое русло с повышенным против прежнего дном. Как известно, длина распространения подпора в незанесенных бьефах может быть грубо приближенно выражена простейшей формулой

$$L = \frac{H}{J}, \quad (2)$$

где  $H$  – напор на плотине;  $J$  – средний продольный уклон потока.

На реках, богатых наносами, это выражение преобразуется



$$L = k \frac{H}{J}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий тип плотины и принимаемый по С.Т. Алтунину:

а) для плотин с затворами и разборчатых  $k = 1,5—2,2$  в среднем примерно 2;

б) для глухих плотин  $k = 4—5,7$  в среднем примерно 4,6.

Построение кривой подпора в последнем случае делается приближенно и фактически сводится к воспроизведению скорректированного продольного профиля реки до постройки плотины, но с новым повышенным начальным уровнем воды, соответствующем НПГ плотины (рис. 8).

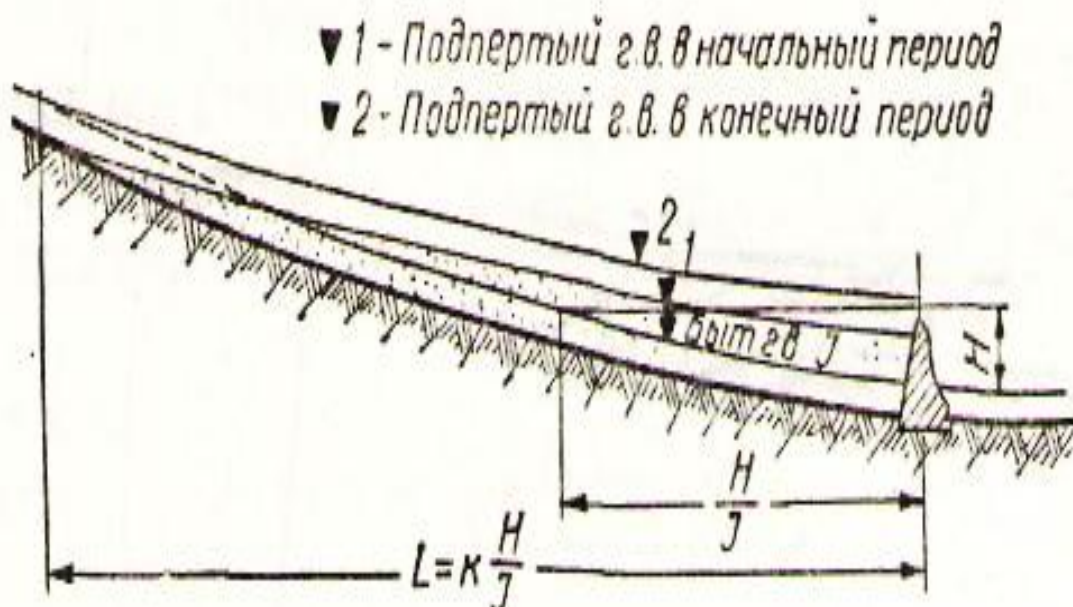


Рис 8. Схема распространения подпора плотин

Уровни воды в водохранилище колеблются от нескольких причин:

- 1) от изменения расходов воды, проходящих через плотину;
- 2) от сработки водохранилища или его наполнения;
- 3) от нагона воды длительно действующих в одном направлении ветрами;

4) от образования ледяных заторов и зажоров в хвостовой (верховой) части верхнего бьефа. При установлении расчетных отметок зоны

затопления земель подпором плотины все указанные выше факторы должны быть приняты во внимание с учетом, однако, кратковременности факторов по пп. 3 и 4.

***Отложение наносов в верхнем бьефе и борьба с этим явлением.***

Скорости течения потока и уклоны свободной поверхности воды в подпертом бьефе и особенно в водохранилище быстро падают по мере приближения к плотине ( $v_1 > v_2 > v_3 \dots$  (рис. 9)); поэтому наносы, влекаемые потоком, частично выпадают из воды, притом прежде всего в верхнем конце водохранилища, сортируясь по крупности сообразно со скоростями течения, т. е. с постепенным уменьшением крупности по направлению к плотине, как схематически показано на (рис. 9).

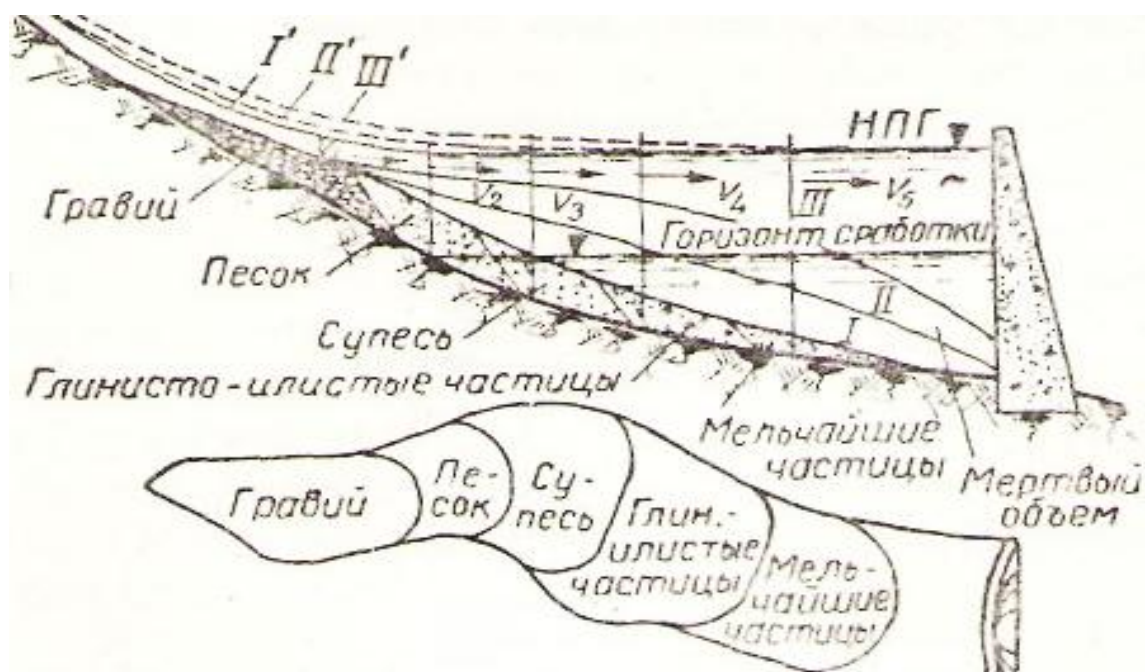


Рисунок. 9 Схема заиления водохранилища

В связи с отложением наносов емкость водохранилища уменьшается, причем темпы этого уменьшения зависят от количества наносов, от емкости водохранилища, условий работы последнего и других факторов.

Помимо наносов, приносимых рекой в водохранилище, некоторое уменьшение объема его происходит еще за счет обрушений берегов вследствие размывающего действия волн, вследствие оползней, осыпей и

обвалов крутых берегов. Под действием воли происходит так называемая «переработка берегов» в виде образования пологих «пляжей» (уклоны 1:15—1:30 и положе) на высоту действия волны.

Срок занесения (заиления) водохранилища наносами (в годах) грубо может быть подсчитан по формуле:

$$T = \frac{A}{W_1 + W_2}, \quad (4)$$

где  $A$  – расчетная емкость водохранилища;  $W_1$  и  $W_2$  – средние ежегодные объемы поступающих в водохранилище земляных масс в виде наносов ( $W_1$ ) и материалов переработки берегов ( $W_2$ ).

При этом предполагается, что все наносы полностью откладываются в водохранилище, фактически же часть наносов (мельчайших) почти всегда проносится через водохранилище, не задерживаясь в нем, часть (более крупных) может проноситься только в период паводков.

Интенсивное занесение водохранилища наносами может нарушить нормальную работу установок (энергетических, ирригационных и т. п.), а иногда и полностью прекратить ее раньше срока полного занесения. Отложения наносов в хвостовой части водохранилища создают затруднения для судоходства вследствие уменьшения глубин.

Другим последствием занесения водохранилища является постепенный подъем уровня воды водохранилища, связанный с нарастанием его дна (*рис. 9*) этапам заиления водохранилища 1, 2, 3 соответствуют горизонты воды 1', 2', 3') и вызывающий увеличение площади затоплений и подтоплений что необходимо учитывать в проектах.

В подпертых бьефах горных рек процесс заиления заканчивается образованием нового русла, аналогичного прежнему, но на более высоких отметках соответственно напору плотины.

Как видно из формулы (4), водохранилище заиляется тем скорее, чем меньше отношение  $A:W_1$ . Так как  $W_1 = \alpha \Sigma Q$  (где  $\Sigma Q$  – годовой сток реки, а  $\alpha$  – относительное содержание наносов в речной воде), то особенно опасны в отношении заиления малые водохранилища и подпертые бьефы ( $A$  мало), в частности на богатых наносами реках – горных или протекающих в сильно размываемых породах; для таких рек величина  $\alpha$  значительна и колеблется от 0,01 до 4% и более.

С занесением водохранилищ ведется борьба, но в большинстве случаев недостаточно эффективная. В этом направлении можно принимать следующие меры.

1. Промывать наносы путем выпуска воды через донные отверстия в плотине. Однако этот метод позволяет удалить лишь наносы, скопившиеся в непосредственной близости от отверстий плотины, за счет увеличения донных скоростей течения на этих коротких участках (см. *(рис. 4,б)*).

Чтобы смыть наносы на всем протяжении верхнего бьефа, или на большей его части, необходимо увеличить скорости течения по всему бьефу, что может быть сделано лишь при понижении уровня в водохранилище в паводок почти до бытовых отметок. Такая мера может быть редко осуществлена, так как при этом теряется почти вся полезная емкость водохранилища, что недопустимо.

2. Механически удалять наносы в хвостовой части верхнего бьефа. Это дорогостоящее мероприятие, которое оправдывает себя только в том случае, если продукты землечерпания (песок, гравий, галька) используются как строительный материал.

Более эффективны предупредительные меры, которые, однако, также дороги:

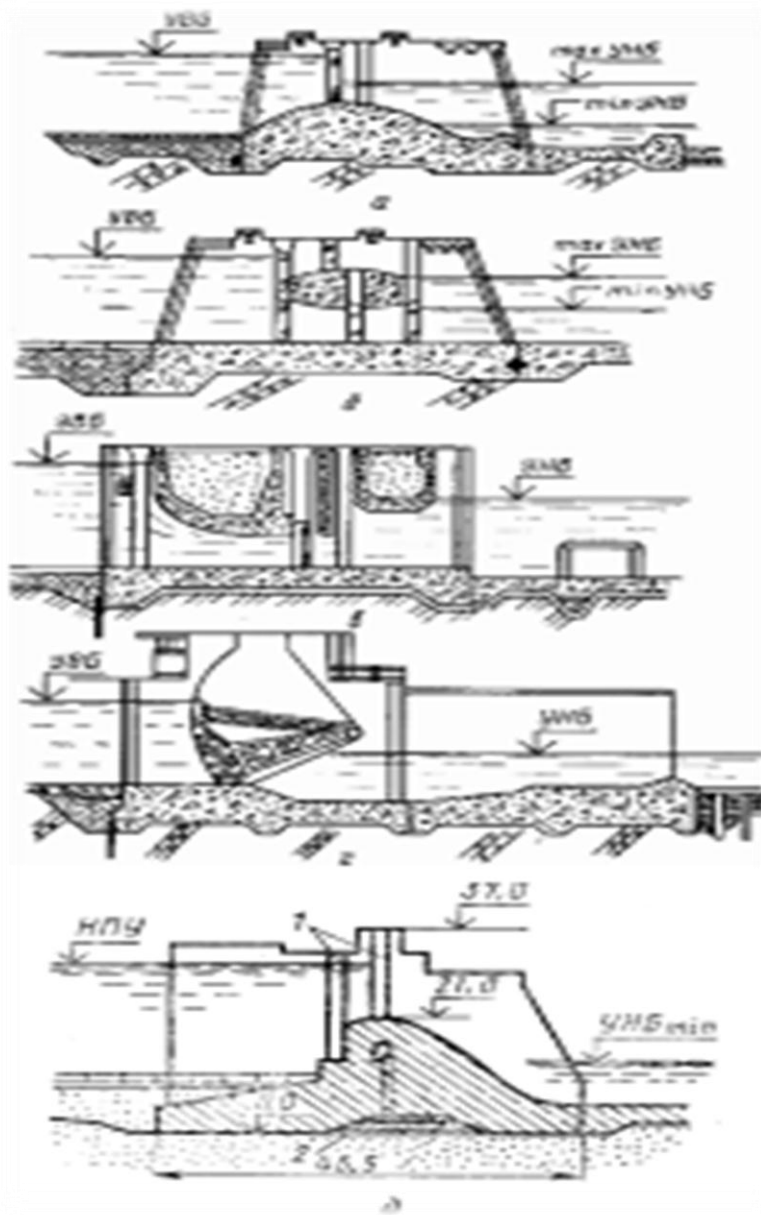
1) зарегулирование верховьев реки и притоков, дающих наибольшие выносы;

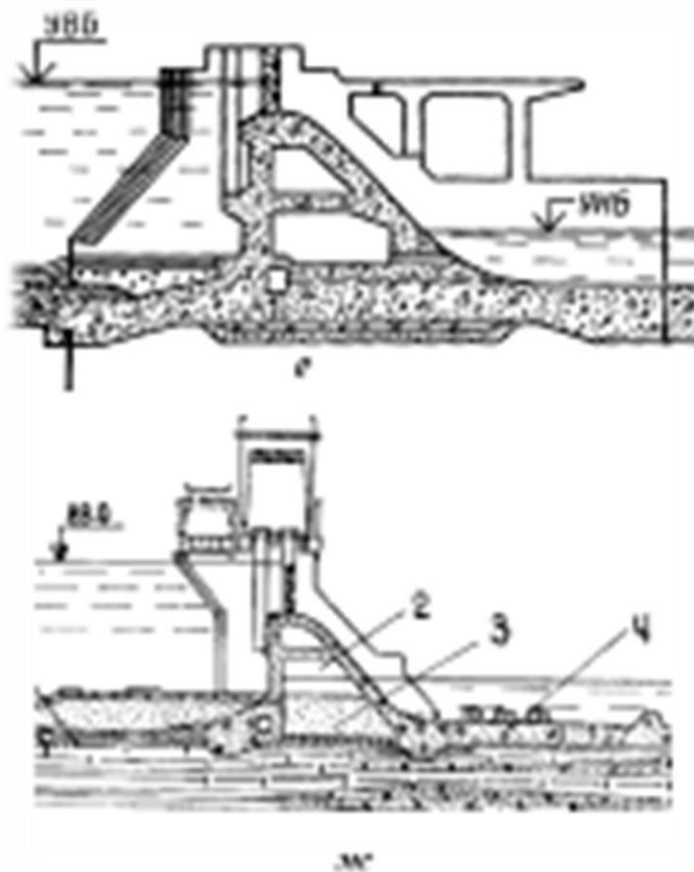
2) задержание наносов выше водохранилища специальной запрудой, которая может быть выполнена простейшим способом (каменная наброска, ряжи и пр.); когда этот наносособиратель занесен, то выше строится новая плотина и т. д.

## 2. БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ НА НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

Бетонные плотины на нескальных основаниях следует проектировать, как правило, в качестве водосбросных. Для глухих участков напорного фронта следует принимать земляную насыпную плотину или плотину из укатанного бетона. Основные типы бетонных водосбросных плотин на нескальных основаниях приведены на рис. 2.1.





*Рис. 2.1. Основные типы низко- (а-г) и высоко пороговых (д-ж) водо- сбросных бетонных плотин на нескальных основаниях: а – распластанного профиля с водосливом; б – двухъярусная с донными и поверхностными отверстиями; в – с донными отверстиями; г – с плоским порогом (типа «барраж»); д – высоко пороговая сплошного профиля; е, ж – высоко пороговые пустотелые, соответственно с массивной и тонкой анкерной фундаментной плитой, пригруженной песком с гравием*

Класс бетонных плотин на нескальных основаниях следует устанавливать согласно табл.1.1 (глава 1 настоящего пособия).

Плотины могут быть с высоким (рис. 2.1, а-г) или низким водосливным порогом (рис. 2.1, д-ж). Водосбросные плотины с низким порогом обычно размещают в русловой части створа низконапорных гидроузлов, а плотины с высоким порогом – на пойме или в русле средненапорных гидроузлов. Пойменное расположение низко- и высокопороговых водосбросных плотин реализовано на многих гидроузлах, построенных на Волге и Каме.

Двухъярусные плотины (рис. 2.1, б) с поверхностным и донным водосбросами выполняют, когда надо улучшить гидравлические условия работы НБ и пропустить строительные расходы. Иногда применяют водосбросы лишь с донными отверстиями (рис. 2.1, в).

Выбор типа водосбросной плотины определяется 3 факторами: напором и возможностью форсировки УВБ; топографическими и геологическими условиями створа гидроузла и компоновкой его основных ГТС; условиями строительства и схемой пропуска строительных расходов реки. Водосбросные плотины на нескальных основаниях имеют более распластанный профиль, чем на скальных основаниях, так как сопротивление сдвигу грунтов в основании этих плотин в 1,5-4 раза ниже сопротивления сдвигу по их скальным основаниям, а допускаемые напряжения на нескальные основания намного ниже этих напряжений на скальные основания. Поэтому, как правило, экономически целесообразными на нескальных основаниях считаются бетонные водосбросные плотины высотой до 40 м.

В связи с расширением в последние годы строительства плотин из особо тощего укатанного бетона на полускальных и нескальных основаниях этот тип плотины также следует рассматривать при проектировании.

## **2.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ВОДОСЛИВА ПЛОТИНЫ**

### **2.2.1. НАЧАЛЬНЫЙ БЕЗВАКУУМНЫЙ ПРОФИЛЬ ВОДОСЛИВА**

При проектировании профиля водосливной бетонной плотины на нескальном основании придерживаются следующей последовательности:

1) определяют начальный (гидравлический) безвакуумный профиль и выбирают тип его сопряжения с дном НБ (гладкое или с низким уступом);

2) корректируют гребень этого профиля с учетом горизонтальной вставки для размещения пазов затворов (рабочих, ремонтных и строительных);

3) проводят расчет этого профиля при сокращенном составе нагрузок на устойчивость при плоском сдвиге по основанию и прочность, проверив отсутствие растяжения в основании и если необходимо изменяют профиль;

4) для откорректированного профиля плотины определяют коэффициент расхода  $\tau$ , при котором проверяют пропускную способность водослива. На рис. 2.1, а, д-ж и рис. 2.2 показаны схемы водосливных плотин, получаемых по подобной схеме.

Профиль плотины назначают из условий устойчивости и прочности плотины и ее основания. При проектировании профиля учитываются также три главных условия:

- 1) гидравлические - перелив воды через гребень плотины;
- 2) конструктивные - расположение затворов на гребне;
- 3) строительные устройство временного порога для пропуска строительного расхода и шандорных заграждений, под защитой которых бетонируют плотину.

В высокопороговой водосливной плотине учет этих условий не должен сильно увеличивать теоретический профиль глухой плотины, установленный из условий ее устойчивости и прочности с учетом влияния нескального основания. В низкопороговой водосливной плотине, в которой большая часть гидростатического давления ВБ передается на стальные затворы и затем от затворов - на быки или гребень плотины, это приводит к уширению гребня плотины, причем ее профиль в основном определяется типом и размерами затворов и условиями сопряжения плотины с основанием.



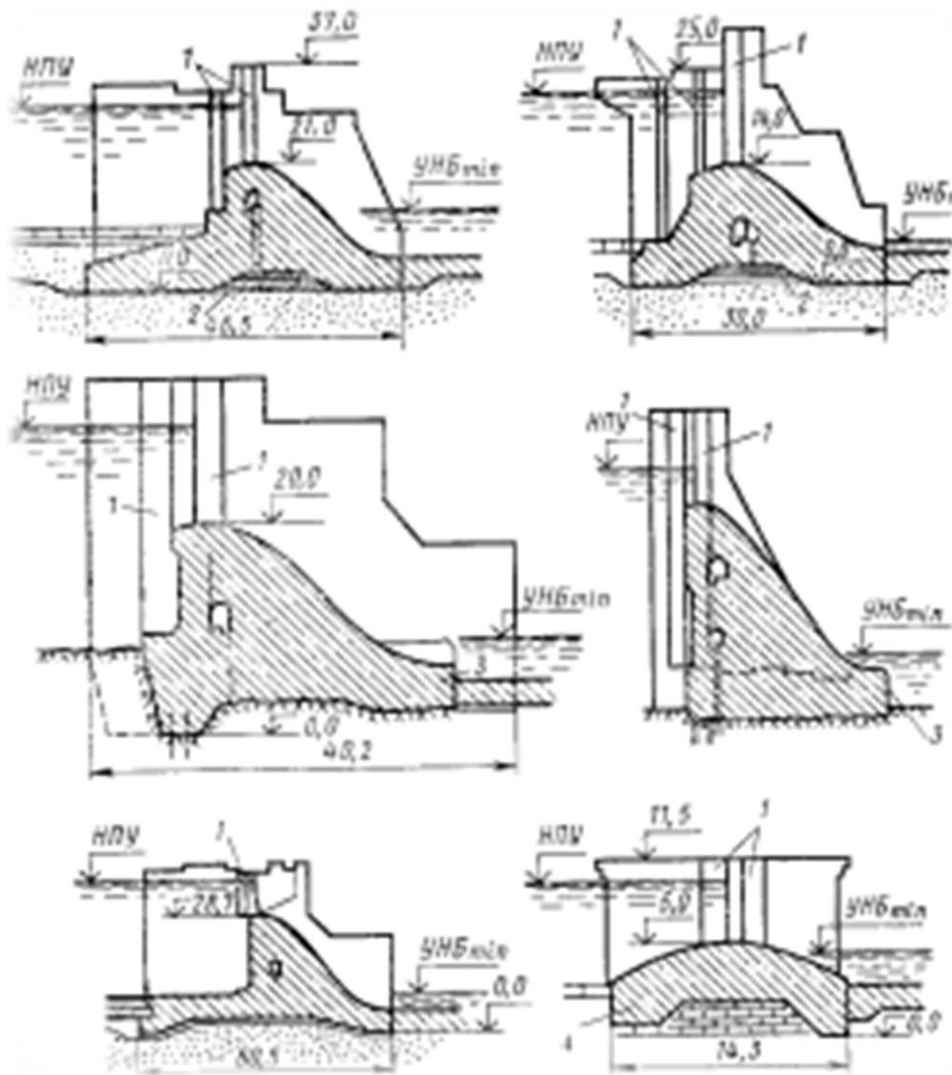


Рис. 2.2. Схемы водосливных плотин на нескальном основании:

1 – пазы затворов; 2 – дренаж; 3 – низкий уступ; 4 – низкопороговый водослив

Высокопороговые плотины обычно имеют безвакуумные профили плотин, когда под струей на поверхности водослива имеется положительное давление, близкое к атмосферному, что предотвращает кавитацию и разрушение бетона. Поэтому вакуумные профили применяют очень редко.

Сопряжение водосливной поверхности этих плотин с поверхностью дна нескального русла в НБ обычно осуществляется гладким сопряжением (рис. 2.3, а) или иногда с помощью низкого уступа 2, носок 1 которого располагается ниже уровня НБ (рис. 2.3, б).

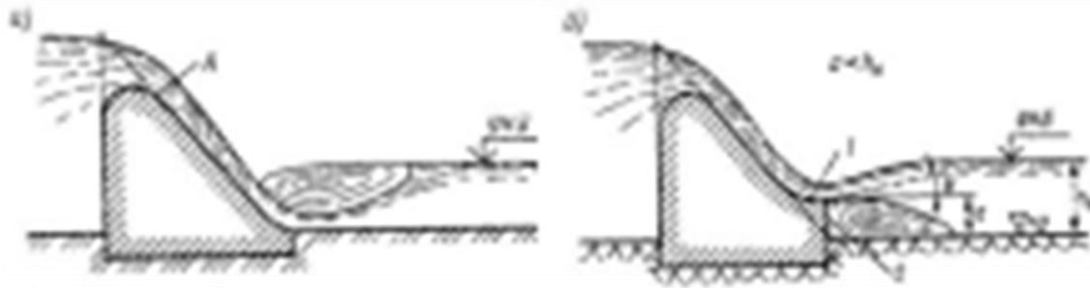
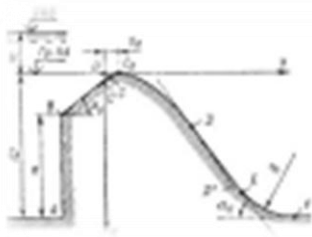


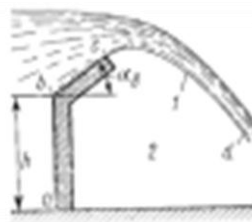
Рис. 2.3. Сопряжения водосливной поверхности плотины с дном НБ:  
а - гладкое; б - с низким уступом

Водосливную плотину с низким уступом следует принимать только тогда, когда во время ледохода в НБ через специальный ледосбросной фронт приходится сбрасывать большие массы льда. В других случаях такая плотина становится нерациональной, так как за носком возникает невыгодный режим придонных скоростей и при низком уступе трудно бороться со сбойностью течения воды в НБ, где возникает сильное волнение, распространяющееся на большое расстояние в НБ, усложняя судоходство.

Начальный (гидравлический) безвакуумный профиль (профиль Кригера - Офицера) с вертикальной напорной гранью образован 5 участками (рис. 2.4): 1) вертикальным участком АВ высотой  $a$ ; 2) прямолинейным участком ВС, наклоненным к горизонту под углом  $\alpha$  в (обычно  $45^\circ$ ); 3) кри-волинейным участком CD, строящимся по координатам Кригера-Офицера; 4) прямолинейным участком DE низовой грани плотины, наклоненным к горизонту под углом  $\alpha_n$ , принятым из расчета устойчивости плотины на сдвиг по основанию (обычно заложение низовой грани 0,75-0,8); 5) дугой окружности EF с радиусом  $R=(0,2-0,5)(C \text{ в } +H)$ , сопрягающей дно НБ с участком ED. При построении профиля надо иметь отметки дна ВБ и НБ, гребня плотины. Значения  $a$ ,  $\alpha$  в,  $\alpha_n$  принимают по треугольному профилю и учитывают влияние  $a$ ,  $\alpha$  в,  $\alpha_n$  на коэффициент расхода водослива  $m$ .



*Рис. 2.4. Безвакуумный водослив с напорной гранью*



*Рис. 2.5. Водослив с тонкой вертикальной стенкой:*

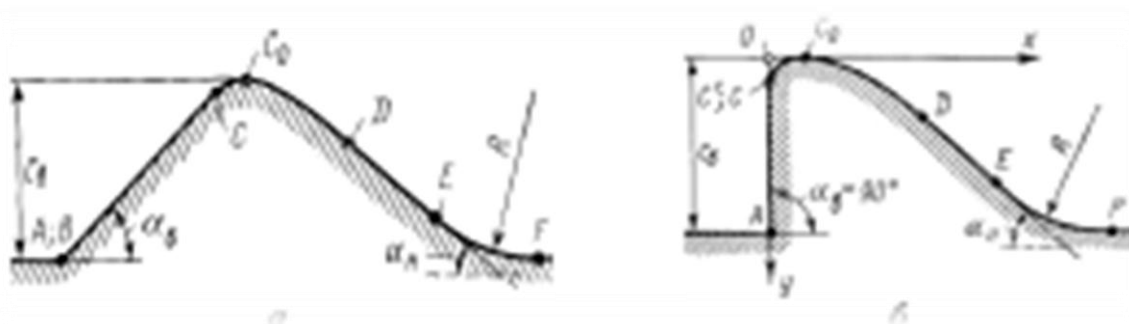
*1- низ струи; 2 - атмосферное давление*

Основным элементом профиля Кригера - Офицерова является кривая CD (рис. 2.4), которую проводят так, чтобы она вплотную располагалась к кривой cd, представляющей собой нижнее очертание струи при переливе воды через тонкую стенку abc (рис. 2.5), совпадающую с очертанием ABC рассматриваемого профиля.

Отклонение кривой CD влево от кривой cd приводит к образованию вакуума на поверхности водослива, что недопустимо, отклонение же кривой CD вправо от кривой cd приводит к снижению коэффициента расхода водослива (в этом случае давление под струей на поверхности водослива будет увеличиваться), что нежелательно. Так как от напора на гребне водослива  $H$  зависит нижнее очертание струи cd, то очертание кривой CD зависит и от  $H$ , которое при эксплуатации плотины изменяется. Поэтому для построения кривой CD принимают определенный профилирующий напор  $H_{\text{проф}}$ , по которому строят профиль водослива.

Значение  $H_{\text{проф}}$  принимают равным максимальному напору на водосливе  $H_{\text{макс}}$ , который возникает при форсировке НПУ (кратковременном повышении НПУ при пропуске пика паводка или при ФПУ). При  $H \leq H_{\text{проф}} = H_{\text{макс}}$  на водосливной поверхности CDE (см. рис. 2.4) вакуум не возникает. Кривую C'CC $\cup$ DD' следует проводить по полученным точкам так, чтобы ось Oу была касательной к кривой в точке C'. Далее проводят прямые BC и DE соответственно под углами  $\alpha$  и  $\beta$  к горизонту так, чтобы эти прямые были касательными к кривой C'CC $\cup$ DD' соответственно в точках C и D. После этого участки C'C и DD' кривой, лежащие внутри намеченного профиля, убирают и проводят

вертикаль АВ и дугу EF (см. рис. 2.4). Радиус R не влияет на коэффициент расхода  $m$ , его можно принять для бетонных плотин на нескальном основании при больших напорах  $H$  равным:  $R=(0,5-1,0)(H \text{ проф} + Z_{\text{max}})$ , где  $H \text{ проф}$  - профилирующий напор на водосливу, равный максимальному  $H_{\text{макс}}$  (при ФПУ);  $Z_{\text{max}}$  - наибольшая разность уровней ВБ и НБ. Начальный профиль водослива с наклонной напорной гранью (рис. 2.6, а) можно рассматривать как частный случай водослива на рис. 2.5 ( $a=0$ ).



*Рис. 2.6. Безвакуумный водослив нормального очертания с наклонной (а) и вертикальной (б) напорными гранями*

Подобный распластаный профиль водослива обычно получается в низкопороговых плотинах на слабых нескальных основаниях (глинах и жирных суглинках) с низкой прочностью на сдвиг и модулем деформации и в высокопороговых водосливных плотинах симметричного профиля из особо тощего укатанного бетона. При хорошем нескальном основании (плотные пески, суглинки) напорную грань плотины обычно принимают вертикальной. Другие случаи безвакуумного профиля возможны, когда длина участка DE (рис. 2.4 и 2.6, а) обращается в нуль, причем кривые  $C_0D$  и  $EF$  смыкаются (участок DE отсутствует), и когда  $\alpha_A = 90^\circ$  (см. рис. 2.6, б).

### **3. ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ**

Местными материалами, не требующими дальних перевозок и пригодными для постройки плотин, являются различные рыхлые грунты (песок, супесь, суглинок, глина) и каменные материалы (гравий, галька, камень). Плотины и дамбы, возводимые из этих материалов, отличаются простотой конструкции и относительной дешевизной их возведения.

В зависимости от основного применяемого материала плотины из местных материалов, согласно СНиП 2.06.05-84 «Плотины из грунтовых материалов», делятся на плотины из местных материалов (грунтовые плотины):

- 1) плотины земляные (насыпные и намывные);
- 2) плотины из каменной наброски и из сухой кладки камня;
- 3) плотины из земли и камня или каменно-земляные.

#### **3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Земляные плотины являются древнейшим типом плотин. В России эти плотины известны издавна, строились они для образования прудов и приведения в движение мельниц, а с 17 - 18 вв. - для обслуживания заводов, рудников.

Искусство постройки земляных плотин в России достигло высокого уровня еще в 18 в., когда были построены плотины значительной высоты, смелые по форме и размерам (Змеиногорская плотина высотой 18 м). В настоящее время земляные плотины имеют самое широкое распространение во всех странах. Развитие механики грунтов и гидравлики грунтовых вод, инженерной геологии, широкое применение механизации земляных работ позволяют в настоящее время осуществлять плотины значительной высоты.

#### **3.2 ТИПЫ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН**

Поперечное сечение земляной плотины представляет собой обычно трапецию (рисунок 6) или близкую к ней фигуру с ломаным очертанием боковых сторон, называемых откосами. В зависимости от применяемых

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

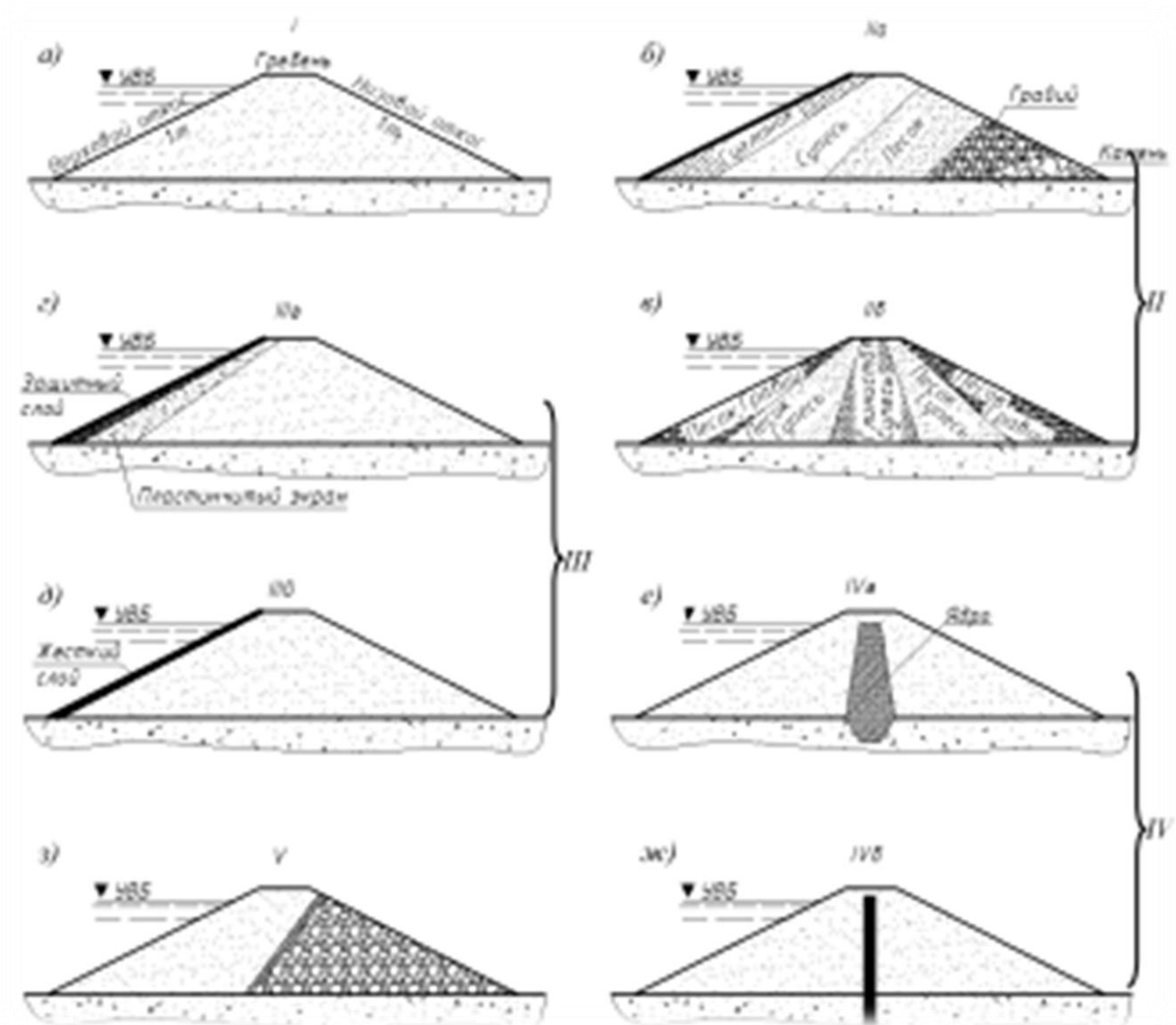


Рисунок 3.1. - Основные типы земляных плотин

I - плотины из одного, более или менее однородного, вполне удовлетворительного материала, например, из песка, супеси, суглинка (рисунок 3а);

II - плотины из нескольких и разных грунтов: из суглинка и супеси, или из глины, супеси и песка и т. п., располагаемых в известном порядке; тип IIа - с водонепроницаемым грунтом на верховой, напорной стороне (рисунок 3 б) и IIб - с водонепроницаемым грунтом в центральной части

(рисунок 3.1.в). Тип II применяется в тех случаях, когда в распоряжении строителей не имеется одного вполне удовлетворительного материала в достаточном количестве;

III - плотины с водонепроницаемым покрытием - экраном; тип IIIа - с пластичным экраном, представляющим собой слой глины, суглинка или торфа (рисунок 6г); тип IIIб - с жестким экраном - из бетона и железобетона, дерева, металла (рисунок 3.1.д); применяются в тех случаях, когда основной материал плотины сильно водопроницаем;

IV - плотины с водонепроницаемой внутренней преградой; тип IVа - с ядром (рисунок 3 е), выполняемым из пластичного материала (глина, жирный суглинок); тип IVб - с жесткой диафрагмой, выполняемой из бетона, железобетона, металла, дерева и т. п. (рисунок 3.1. ж); этот тип применяется в тех же условиях наличия грунта, что и тип III;

V - плотины каменно-земляные - из земли и камня, в которых, однако, преобладает земля, и лишь меньшая, низовая часть выполнена из камня (рисунок 3.1 з).

Эта классификация предполагает надежное водонепроницаемое основание. Но земляные плотины можно строить практически почти на любых основаниях, кроме разве сильно разжиженных илистых грунтов или глубоких торфяников, или пород, характеризующихся крайней неравномерностью механических свойств. Это обстоятельство является одним из крупнейших преимуществ земляных плотин. Однако в случае водопроницаемого основания, простирающегося на ту или иную глубину до водоупора, необходимо надежное сопряжение водонепроницаемых частей плотины с водонепроницаемыми слоями основания или во всяком случае принятие мер по защите от вредных явлений фильтрации в основании. В соответствии с этим описанные выше типы плотин получают дополнительные отличия.

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

В плотинах, строящихся на водопроницаемых грунтах (песчано-гравийная смесь, галечник, крупнозернистые пески, трещиноватые полускальные породы), предусматривают дополнительные противофильтрационные устройства в основании.

При наличии нескального основания, если водонепроницаемый грунт (глина, скала и т. п.) расположен на приемлемой глубине, плотину сопрягают с водоупором зубом (глиняным, бетонным) или шпунтовой стенкой, идущими соответственно от экрана, ядра или диафрагмы плотины (рисунок 3.2.в, г, д, е). При глубоком залегании водонепроницаемого пласта или его отсутствии устраивается понур, являющийся продолжением экрана или другой водонепроницаемой части плотины (рисунок 3.2.ж) и удлиняющий пути фильтрации в основании. Вместо понура при устройстве в теле плотины ядра или диафрагмы под последними опускается «висячий» зуб или шпунтовая стенка (рисунок 3.2.з). Плотины с зубом глубиной до 3-3,5 м (рисунок 3.2.д) применяют в тех случаях, когда водопроницаемый слой грунта в основании имеет небольшую мощность. Этот слой грунта прорезают зубом, заглубляя его в водоупор не менее чем на 0,5 м. Ширину зуба понизу задают с учетом удобства производства работ по подготовке траншеи с устойчивыми откосами.

Плотины с диафрагмой (рисунок 3.2.е) применяют при небольшой и средней мощности водопроницаемого основания. В последнем случае диафрагмы можно выполнять висячими, т. е. не доходящими до водоупора. Диафрагмы могут быть жесткими и гибкими. Глубину заложения и размеры диафрагм устанавливают фильтрационными и статическими расчетами.



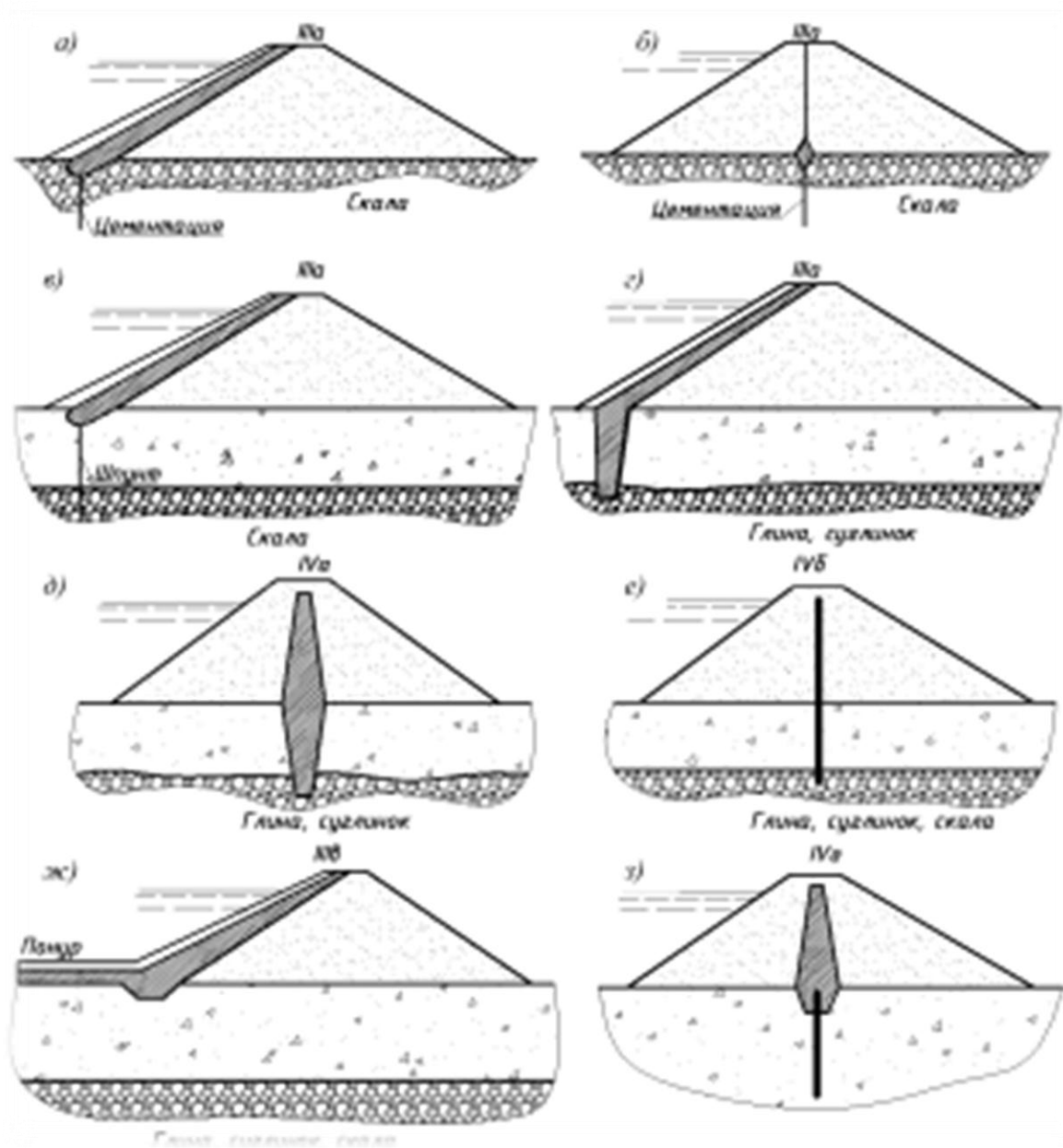


Рисунок 3.2. - Типы сопряжений плотин с основанием

Плотины с экраном и понуром (рисунок 3.2 ж). Горизонтальный понур является продолжением наклонного экрана, и выполняют его из таких же грунтов, что и экран. Длину понура определяют фильтрационными расчетами по допустимым расходам и скоростям фильтрационного потока при выходе его в нижний бьеф, однако её принимают равной не более пяти-шести напоров на плотину.

### 3.3 ДЕЛЕНИЕ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ПО СПОСОБАМ ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ

По способам постройки плотины делятся на следующие типы:

а) плотины насыпные, возводимые путем сухой отсыпки грунта и последующего его уплотнения (укатки);

б) плотины намывные, строительство которых производится при помощи гидромеханизации, или гидравлическим способом, когда грунт разрабатывается в карьерах, доставляется к месту постройки и, главное, укладывается (намывается) в тело плотины при помощи воды;

в) плотины полунамывные, при возведении которых грунт разрабатывается в карьерах, доставляется к плотине и отсыпается в боковые части (внешние призмы) ее тем же методом, что и в насыпных плотинах, но укладка грунта во внутреннюю часть (ядро плотины) совершается при помощи воды путем отмыва глинистых фракций из отсыпанного грунта; в настоящее время этот тип плотин применяется редко.

В плотинах намывных и полунамывных, выполняемых из неоднородного грунта, последний сортируется при помощи воды по крупности так, что профиль плотины близок к типу IIа или IIб, причем в последнем случае крупность частиц грунта к откосам плотины постепенно увеличивается.

В полунамывных плотинах тип IIб видоизменяется тем, что по откосам плотина оказывается прикрытой насыпным грунтом, содержащим довольно большое количество мелких частиц.

При намыве плотины из однородного грунта (песка) такого фракционирования частиц грунта не получается, и плотина выполняется по типу I, III, IVб или V.

Кроме указанных основных способов строительства плотин в последнее время применялись еще в отдельных случаях:

а) способ сухой отсыпки плотин без последующей укатки;

б) мокрый способ, при котором сухой лёссовый или моренный грунт отсыпается на участки тела плотины, огражденные валиками и залитые водой на глубину 0,5-0,7 м;

в) способ направленных взрывов, когда плотина образуется путем массового выброса грунта с берегов после взрыва заложенных в него зарядов взрывчатого вещества.

### 3.4 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ

Материал тела земляной плотины, вообще говоря, всегда в той или иной мере проницаем для воды. Поэтому в теле плотины создается поток воды, фильтрующейся из верхнего бьефа в нижний.

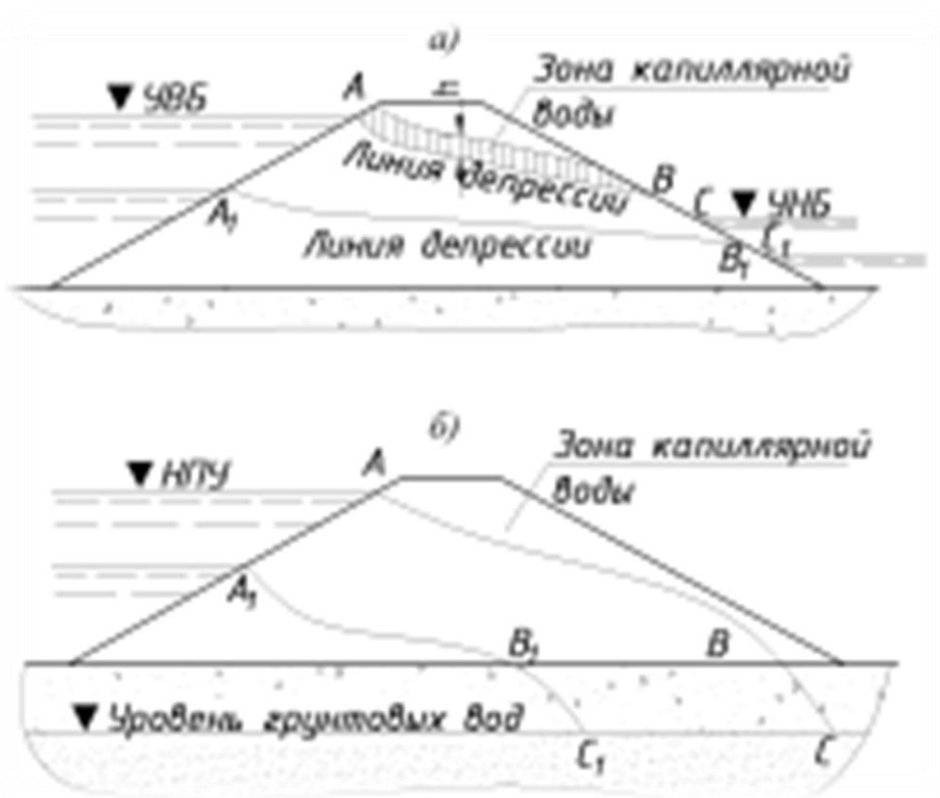


Рисунок 3.3. - Схема фильтрации и насыщения плотины водой

Свободная поверхность этого фильтрационного потока (рисунок 3.3), постепенно понижающаяся к нижнему бьефу, называется поверхностью насыщения, или депрессионной поверхностью, а линия

пересечения ее с вертикальной плоскостью, проводимой поперек оси плотины, называется линией насыщения или депрессии, или депрессионной линией.

Ниже депрессионной поверхности (линии) грунт плотины насыщен водой, взвешивается ею; выше депрессионной линии находится зона капиллярного поднятия воды, высота которой зависит от свойства капиллярности грунта: в песчаных грунтах она достигает 5-15 см, в суглинистых и глинистых - 0,5-1,5 м и более.

Выше капиллярной зоны грунт обладает небольшой влажностью, так называемой естественной влажностью, зависящей от климатических условий (влажность воздуха, количество осадков, температура и пр.) и состава самого грунта. Границы описанных зон изменяют свое положение в зависимости от колебаний горизонта воды в верхнем и нижнем бьефах.

Например, при сработке водохранилища линия депрессии АВ или АВС (рисунок 3.3.) понижается до линии А 1 В 1 или А 1 В 1 С 1 . Положение депрессионной линии зависит также от высоты уровня нижнего бьефа, а при проницаемом основании и отсутствии воды в нижнем бьефе - и от уровня грунтовых вод (рисунок 3.3.б).

Линия депрессии устанавливается в положениях, указанных на рисунке 8, лишь с течением времени, при длительном стоянии определенных горизонтов верхнего и нижнего бьефов (стационарный режим); в остальное время она занимает промежуточные положения.

Фильтрация, воздействие воды верхнего и нижнего бьефов, климатические условия создают сложный режим земляного тела плотины.

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

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

При температурах ниже  $0^{\circ}$  откосы плотины выше горизонта воды и гребень её могут промерзнуть, а суглинистые и глинистые грунты их при этом будут пучиться, а при оттаивании оползать и образовывать трещины; трещины могут появляться в тех же грунтах и при высыхании откосов в жаркое время года. Поперечные трещины опасны ввиду возможности развития по ним разрушительной фильтрации.

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

Таким образом, водопроницаемость грунта и фильтрация воды в теле земляной плотины играют весьма важную роль. Статистика показывает, что около 45% аварий и разрушений земляных плотин произошло вследствие недостаточности мер по борьбе с фильтрацией воды; около 15% аварий являются результатом оползания откосов, вызванного большей частью также действием фильтрационных вод.

### **3.5 ДРЕНАЖ ПЛОТИН**

В целях уменьшения водонасыщенной зоны в плотинах и повышения устойчивости откосов, получения более обжатых и экономичных профилей плотин применяется дренаж плотин, т.е. введение в тело плотин зон или полостей, заполненных крупнозернистым материалом (гравием, щебнем, камнем) с ничтожным сопротивлением фильтрации, а иногда даже труб, перехватывающих фильтрационный поток. Дренаж приводит к снижению депрессионной кривой.

Существуют следующие основные виды дренажа:

- дренажная призма (рисунок 3.4.а). Дренажная призма выполняется, как правило, трапецеидального сечения. Берма (верх призмы) - шириной от 2 до 3 м. Заложение внутреннего откоса  $m_1 = 1,0-1,5$ , наружного  $m_2 = 1,5-2,5$ . Высота должна быть на 0,5-1 м выше выхода депрессионной кривой на внутренний откос призмы, в первом приближении на 1-1,5 м выше расчетного уровня воды в нижнем бьефе (рисунок 3.5.); дренажный тьюфяк (рисунок 3.4.б). Толщина каменной отсыпки определяется по расчетами, но должна быть не менее глубины промерзания плюс 0,2 м;

трубчатый дренаж (рисунок 3.4.в). Трубчатый дренаж выполняется из труб диаметром не менее 0,2 м или каменной отсыпки в железобетонном или бетонном лотке, окруженном обратными фильтрами (рисунок 3.6.). Трубчатый дренаж располагается от нижнего бьефа на расстоянии  $l$  д, принимаемом от  $1/6$  до  $1/4$  ширины плотины по основанию. Возможны также комбинированные типы. В зависимости от наличия или отсутствия дренажа земляные плотины делятся на дренированные и недренированные.

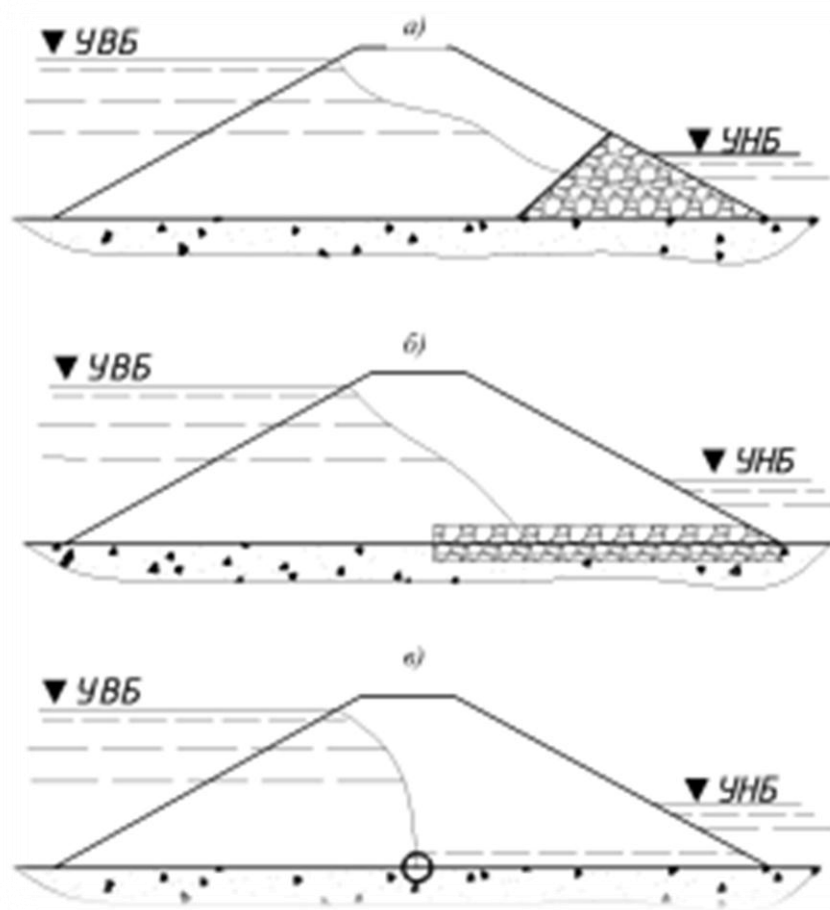


Рисунок 3.4. - Схемы дренажа плотин:  
 а - дренажная призма; б - дренажный тюфяк; в - трубчатый дренаж

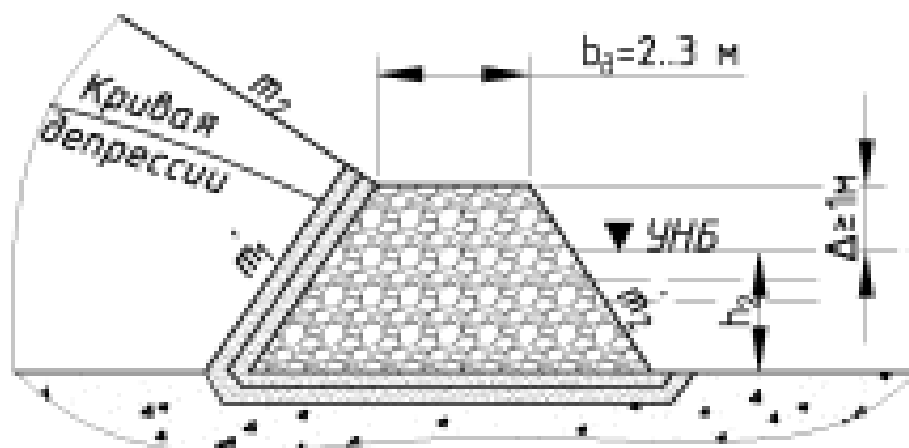


Рисунок 3.5.- Конструкция дренажной призмы

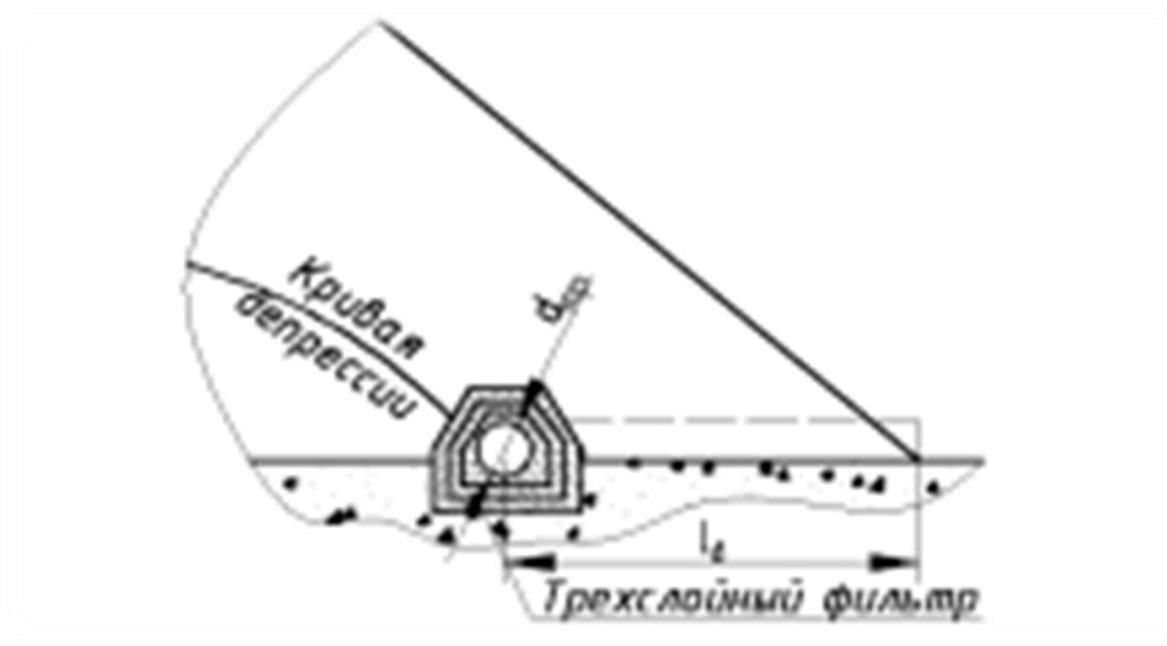


Рисунок 3.6. - Конструкция трубчатого дренажа

### 3.6 ПРОПУСК ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ

Пропуск воды через земляную плотину нежелателен, а перелив через ее гребень без специальных устройств вообще недопустим, так как ведет к быстрому ее разрушению. Поэтому земляные плотины устраиваются, как правило, глухими. Водоспуски в теле земляной плотины устраиваются при соблюдении ряда предосторожностей.

### 3.7 ВЫБОР ТИПА ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ. РОЛЬ ИМЕЮЩИХСЯ ДЛЯ ПЛОТИНЫ МАТЕРИАЛОВ

Многочисленные типы земляных плотин в основном определяются наличием того или иного местного материала. Наиболее простым, дешевым и удобным в производственном отношении является ил плотины из однородного материала (тип I, рисунок 3.1.а). Однако он требует нужного количества доброкачественного материала, удовлетворяющего требованиям водонепроницаемости, прочности и экономичности. Однородные плотины строятся из суглинков, супесей, песков, песчано-гравелистых и даже галечных грунтов. Чем выше плотина, тем обычно



труднее получить хороший грунт в нужном количестве. Тогда переходят к плотинам типа II (рисунок 3.1.) с, ограниченным количеством достаточно водонепроницаемого грунта, выполняя из него или внутреннюю центральную часть, обсыпая ее пористым грунтом (тип IIб, рисунок 3.1.в), или напорную часть, располагая в остальной прочие грунты (тип IIа, рисунок 3.1.б). Следует учитывать, что при строительстве гидроузла, в который входит земляная плотина, в распоряжении строителей имеются, прежде всего, грунты из выемок под водослив и под другие сооружения узла (шлюз, гидростанцию, подходные каналы и пр.), которые желательно использовать в полезную насыпь, т.е. в земляные сооружения узла - плотину, дамбы, перемычки и пр. В общем балансе грунты полезных выемок могут играть большую роль, а специальные карьеры для земляной плотины иногда даже меньшую.

Этим обстоятельством объясняется факт распространения высоких плотин из разных грунтов, именно типа II б (рисунок 3.1.в) с центральной водонепроницаемой частью, обсыпанной разными грунтами в порядке возрастания крупности зерен их и пористости к откосам. Тип IIа (рисунок 3.1.б) менее распространен, хотя он более целесообразен в фильтрационном отношении, но верховой откос в таких глубинах должен быть более пологим, чем в типе IIб (рисунок 3.1.в). При крайне ограниченном количестве хорошего водонепроницаемого грунта переходят к типам плотин III и IV (рисунок 3.1.г, д, е, ж), которые можно выполнять вообще из всяких грунтов; причем если имеется пластичный водонепроницаемый грунт, то осуществляют тип IIIа или IVа (пластичный экран или ядро), а если и его нет, то IIIб или IVб (жесткий экран или диафрагма). Что касается типа V, то он целесообразен, когда из полезных выемок гидроузла получается много камня, не используемого для других сооружений. Наброска этого камня в низовую часть плотины создает весьма рациональный тип плотины. Геологические условия определяют, прежде всего, материал для плотины, но, кроме того, они могут влиять на выбор типа плотины сами по себе. Если водонепроницаемый связный грунт лежит близко от поверхности,

целесообразны все типы плотины без жестких экранов или диафрагм; последние лучше сопрягаются со скальным основанием, однако есть случаи применения диафрагм и при глинистых основаниях с установкой диафрагмы на надежный шпунт.

При глубоком залегании водонепроницаемого грунта можно применять плотины с понурами, если нецелесообразно смыкаться с водонепроницаемой слишком глубоко залегающей толщей, а в противном случае - плотины с экранами и диафрагмами, сопрягающимися глубокими зубьями с водонепроницаемыми основаниями.

Климатические условия в известной мере также влияют на выбор типа плотины. Суровые зимние условия заставляют применять мощный защитный слой по откосам, приближая однородную плотину к типу плотины с центральной водонепроницаемой частью (тип IIб, рисунок 3.1.в). В этих условиях вообще предпочтительнее плотины из несвязных или малосвязных грунтов с диафрагмами или жесткими экранами, тем более, что в северных местностях сезон для постройки земляных плотин очень короток, плотины же из несвязных и малосвязных грунтов можно строить и при небольших морозах. Обилие атмосферных осадков делает невозможной укатку глинистых грунтов в период дождей, поэтому при подобных условиях надо стремиться к уменьшению объема глинистых грунтов в плотине или полному их исключению, т.е. с этой точки зрения целесообразнее плотины типа III и IV (рисунок 3), причем даже лучше IIIб и IVб с жесткими диафрагмами и экранами.

Производственно-экономические условия. Наличие того или иного оборудования для постройки плотины (экскаваторы, скреперы, вид транспорта, катки и пр.) определяет темпы возведения земляной плотины, которые в современных условиях для больших плотин характеризуются суточной производительностью земляных работ по насыпи плотин до 30 000 м<sup>3</sup>. Сроки возведения зависят от имеющейся механизации для работ и типа плотины: проще всего выполнять однородную плотину и затем плотину с экраном, плотины с ядрами, диафрагмами, плотины из

нескольких грунтов сложнее, так как темпы возведения отдельных частей между собой связаны, и чаще всего наличие «многодельности» тормозит работу.

Большую роль играют общий план работ по гидроузлу, часть которого составляет земляная плотина, очередность их, а также экономические показатели плотины: стоимость ее, сроки возведения, условия эксплуатации. Окончательный выбор типа плотины может быть сделан после суммарного учета влияния всех перечисленных выше факторов.

## 4. КРЕПЛЕНИЕ НИЖНЕГО БЬЕФА ВОДОСЛИВНЫХ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

### 4.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРЕПЛЕНИЯ НБ

Креплением НБ называют специальные конструктивные элементы водосбросных сооружений (плотин, открытых и закрытых водосбросов и др.), которые предохраняют дно водотока от его разрушения в зоне гашения избыточной кинетической энергии потока и обеспечивают безопасное сопряжение бьефов с помощью гасителей энергии потока. При их проектировании решаются следующие задачи: расчет параметров гидравлического режима сопряжения бьефов, прогноз параметров взаимодействия потока с отдельными частями крепления НБ для оценки их устойчивости и прочности, прогноз общих и местных деформаций (размывов) речного дна в НБ. Гидравлические режимы сопряжения бьефов. На практике применяют следующие основные схемы гашения избыточной энергии потока: одной из форм гидравлического прыжка (рис. 4.1, а, б); отбросом или свободным падением потока, энергия которого гасится в толще НБ или воронке размыва (рис. 4.1, в, г); соударением струй в водной среде; гасителями на водосливной грани плотин и водосбросов (рис. 4.1, д) и комбинацией 2- 3 этих схем гашения.

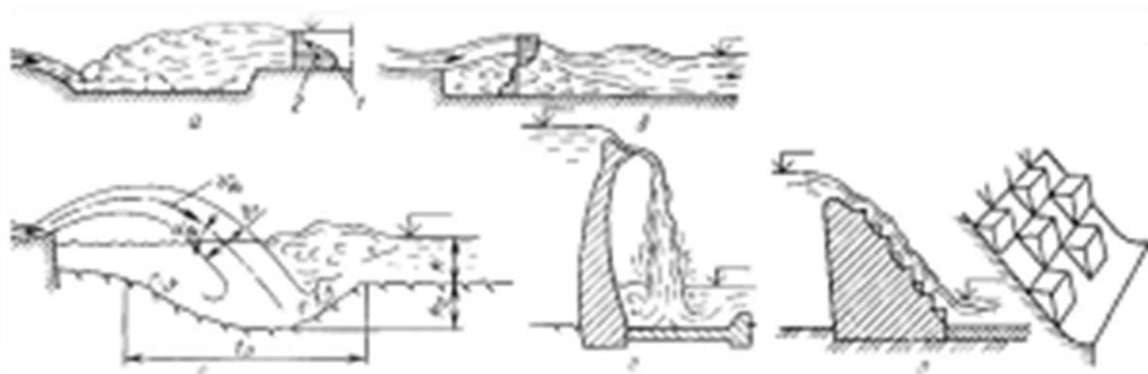


Рис. 4.1. Схемы гашения избыточной энергии потока

а - донным гидравлическим прыжком; б - одной из форм поверхностного гидравлического прыжка; в, г - отбросом струи; д - на водосливе с пирсами в шахматном порядке; 1, 2 - эюры скоростей (без и с гасителем)

Каждой из этих схем соответствует свой режим сопряжения бьефов. При гашении одной из форм гидравлического прыжка возможны два режима, различающиеся расположением транзитной части потока: донный - при устойчивом нахождении транзитной струи у дна и поверхностный, когда транзитная струя располагается на поверхности потока или вблизи нее.

Крепления НБ, плавно сопрягающие водосливные плотины с дном НБ, в зависимости от пропускаемого расхода и параметров до и после участка сопряжения работают при четырех режимах: трех донных (соответственно с отогнанным, предельным или затопленным прыжком) и поверхностным. При устройстве носка-уступа водослива в зависимости от его высоты, уровня НБ, сбрасываемого расхода и параметров потока до и после участка сопряжения в НБ возможны донные и поверхностные режимы. Их последовательная смена проходит через четыре «критических режима».

К наиболее распространенным схемам гашения относится сопряжение бьефов при донном режиме. Его недостатки: значительные донные скорости, медленно затухающие по длине, приводящие к размывам; вращение в вальце прыжка плавающих тел (включая лед), могущих повредить поверхности сооружения. Применение поверхностного режима сопряжения позволяет заметно облегчить крепление НБ и создать благоприятные условия для сброса льда. Этот режим рационален тогда, когда он может быть создан без большого заглубления отметок крепления и подошвы плотины. К недостаткам этого режима, сильно ограничивающим его применение, относятся: неустойчивость границ существования его различных форм, невозможность его создания при малой высоте носка-уступа, неизбежность сильных колебаний уровня НБ и необходимость в больших глубинах НБ.

Если глубина НБ значительно меньше второй сопряженной глубины (или меньше глубины, определяющей нижнюю границу поверхностного режима) и одновременно концевая часть водосбросного сооружения располагается на скальном основании с высокой

устойчивостью против размыва, целесообразно применять схему сопряжения с отбросом струи с носка-трамплина (см. рис. 4.1, в, г).

Улучшение режима сопряжения бьефов с благоприятным перераспределением скоростей достигается специальными мерами: применением гасителей энергии и расщепителей потока, пирсов-гасителей, искусственной шероховатости на водосливных гранях и устройств для соударений струй внутри транзитной части водосброса; увеличением ширины сечения потока и уменьшением удельных расходов в начале участка сопряжения и др. Для выбора схемы сопряжения бьефов можно использовать рис. 4.2, на котором даны области применения главных схем сопряжения бьефов в зависимости от мощности сбрасываемого потока  $N$  (МВт) и относительной ширины (коэффициента) створа  $L/h$ , где  $L$  и  $h$  - длина плотины по гребню и ее высота. Мощность  $N = 0,0098QH \rho$ , где  $Q$  - расчетный расход водосброса, м<sup>3</sup>/с;  $H \rho$  - перепад между УВБ и УНБ при пропуске расчетного паводка, м.

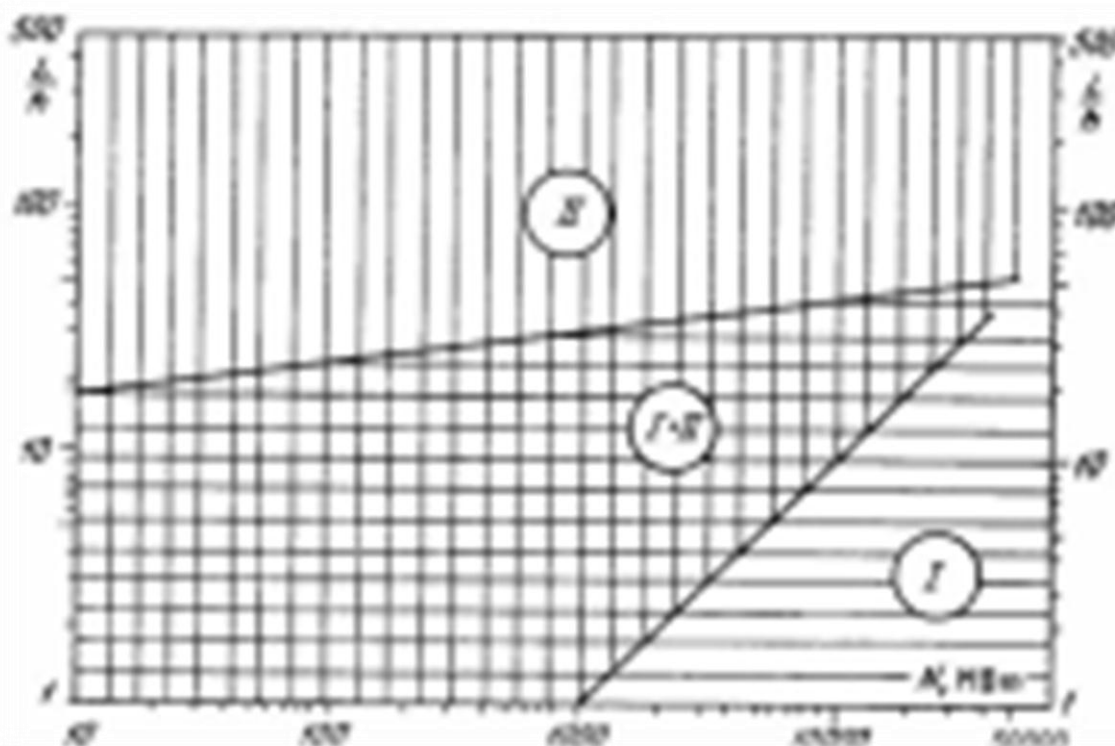


Рис. 4.2. Области применения основных схем сопряжения бьефов:  
 I - гашение отбросом струи в НБ; II - гашение в колодце одной из форм прыжка

Особенности плановой картины движения потока в НБ. Как правило, движение сбрасываемого потока в НБ сопровождается его резким расширением в плане. Параметры этого расширения обусловлены очертанием берегов и расположением водосбросного сооружения относительно русла реки. Резкое расширение сопровождается отрывом потока от стенок сооружения и возникновением водоворотных зон (рис. 4.3), что приводит к разделению потока на транзитную часть, в которой перемещается основная масса воды, и не транзитную - водовороты. Движение транзитной части возможно в двух формах: в виде плавно расширяющегося в плане потока, соответствующего его режиму, в виде «сбойного» течения, характеризуемого изменением направления почти не расширяющегося потока. Границы транзитной части и параметры водоворотов устанавливают гидравлическим расчетом. Возникновение сбйности ухудшает условия сопряжения бьефов и создает плохую картину течения потока. Различают две формы сбйных течений (рис. 4.3, б): в виде резкого изменения направления потока после выхода его в широкий НБ ( $b/B \leq 0,8$ ) и в виде сжатия потока, вызываемого боковым натеканием воды из окружающих водоворотов.

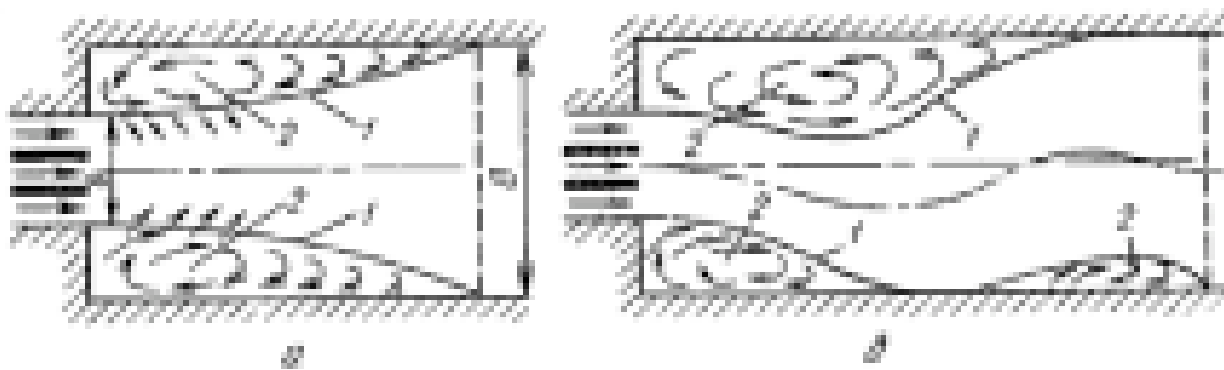


Рис. 4.3. Возможные схемы течения потока в симметричном НБ при симметричном сбросе паводка через все отверстия водосбросной плотины: а - симметричное растекание транзитного потока; б - сбйное течение; 1 – границы транзитного потока; 2 – водоворотная зона

## 4.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КРЕПЛЕНИИ НБ ВОДОСБРОСНЫХ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

В НБ при пропуске воды через плотину имеем высокоскоростной поток, который имеет большую размывающую способность. В случае даже низкопороговой плотины на нескальном основании, не защищенном креплением, сразу за плотинной может образоваться глубокая воронка размыва глубиной, достигающей  $(2-3)H$ , где  $H$  - напор на плотине. При высокопороговой плотине глубина размыва дна русла бывает еще больше, что может вызвать подмыв и разрушение плотины. Поэтому русло НБ сразу за плотинной покрывают специальным бетонным креплением часто с его углублением. Чтобы снизить стоимость работ по креплению русла за плотинной, в пределах НБ устраивают различные гасители энергии, которые снижают кинетическую энергию потока и его размывающую способность.

При проектировании крепления НБ водосбросных плотин на нескальном основании используют разные методы расчета и лабораторные гидравлические исследования, позволяющие установить оптимальные формы и размеры крепления НБ. При проектировании крепления НБ необходимо учитывать влияние следующих условий сброса воды в НБ.

*1. Условия сброса воды в НБ.* Сброс паводка в НБ производят при определенных правилах открытия затворов, перекрывающих водосливные и донные отверстия водосбросной бетонной плотины, что должно предотвратить образование в НБ сбойных течений и водоворотных зон. Условия сопряжения бьефов сильно зависят от уровня НБ, который зависит также от расходов воды, пропускаемой не только через водосбросную плотину, но и через водосбросы и турбины здания ГЭС и дополнительные водосбросные сооружения гидроузла. Поэтому водосливной фронт плотины рассчитывают на основной расчетный паводковый расход  $Q$  расч, а НБ за плотинной рассчитывают на этот расход, но с учетом повышения уровня НБ при сбросе остальной меньшей части паводка через отдельно расположенные здание ГЭС и дополнительные водосбросы.



2. *Пространственные условия движения воды в НБ.* НБ имеет большую ширину, чем водосливной фронт плотины. В связи с этим в НБ возникают пространственные условия движения воды: растекание потока в плане или его сбойность. При сбойности возникает местный рост удельного расхода воды, что сильно повышает размывающую способность потока. Пространственные условия приводят к появлению в НБ косых волн и косых гидравлических прыжков, которые нельзя рассчитать заранее.

3. *Деформация русла НБ.* В ряде случаев оказывается экономически рационально не устраивать ковш в конце крепления. Предполагается, что окончательную форму русла получит за счет размыва его потоком при начальной эксплуатации плотины. При таком проектировании крепления НБ следует достоверно прогнозировать деформации (размывы) русла во времени, что очень трудно. Сейчас перечисленные факторы не могут быть полностью учтены расчетами и поэтому при проектировании крепления НБ получают предварительное решение, которое для сооружения I класса необходимо проверить исследованием гидравлической модели плотины. В отношении размыва грунта в НБ различают:

1) опасный местный размыв дна НБ за плотиной, когда воронка размыва достаточно глубока и близко расположена к плотине, в связи с чем последняя может оказаться подмытой и разрушиться;

2) безопасный местный размыв за плотиной, когда воронка размыва после ее стабилизации приобретает размеры, при которых можно не опасаться разрушения плотины. В практике проектирования плотин часто идут на небольшой безопасный размыв в НБ.

#### **4.3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПЛЕНИЯ НБ**

В водосбросных бетонных плотинах на нескальном основании, как правило, устраивают гладкое сопряжение водослива с дном НБ (донный режим сопряжения бьефов). В НБ этих плотин устраивают крепление дна русла на определенную длину. Это крепление обычно состоит из двух частей:

1) водобоя в виде железобетонной плите примерно такой длины, что бы в пределах ее мог поместиться затопленный гидравлический прыжок;

2) рисбермы, располагаемой за водобоем в пределах послепрыжкового участка и выполняемой из бетонных плит, каменной наброски и др. В конце рисбермы часто сооружают концевое устройство – ковш (рис. 4.4).

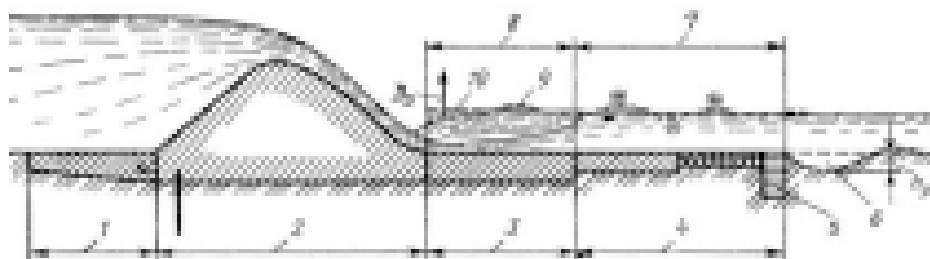


Рис. 4.4. Главные элементы водосливной плотины и крепления НБ:

1 - понур; 2 - плотина; 3 - водобой; 4 - рисберма; 5 - концевое устройство рисбермы; 6 - воронка размыва; 7 - послепрыжковый участок; 8 затопленный прыжок; 9 - эпюра гидродинамического давления на водобой и рисберму; 10 - эпюра противодействия снизу водобоя;  $D 0$  - дефицит давления

Как было отмечено, водобой и рисберма (рис. 4.4) отличаются друг от друга конструктивно, но иногда крепление НБ подразделяют на водобой и рисберму условно, когда между ними нет конструктивного различия.

В низкороговых водосбросных плотинах устраивают донные отверстия с порогом, расположенным на уровне дна русла. В этих плотинах остается только его фундамент, который конструктивно объединяют с водобоем и получают бетонную плиту, называемую флютбетом (рис. 4.5).

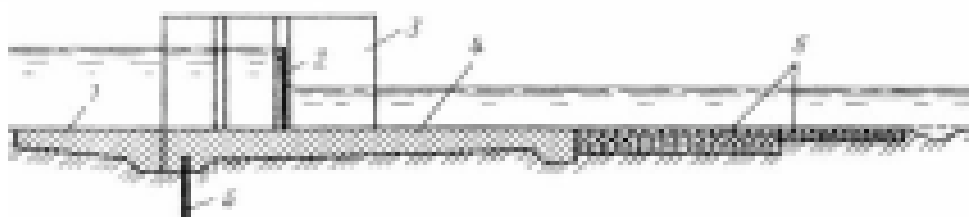


Рис. 4.5. Главные элементы водосбросной плотины в виде флютбета: 1 – понур; 2 – затвор; 3 – бык; 4 – флютбет; 5 – рисберма; 6 – шпунт

В водосбросной плотине (см. рис. 4.4) за концом рисбермы обычно образуется воронка размыва глубиной  $h_p = f(L)$ , причем с уменьшением длины крепления  $L$  значение  $h_p$  возрастает (рис. 4.6). Теоретически при  $L \rightarrow \infty$  получим  $h_p = 0$ . Пренебрегая  $h_p$ , можно ввести понятие предельной длины крепления  $L_{пред}$ . Опыт строительства водосбросных плотин показывает, что устройство крепления длиной  $L < L_{пред}$  обычно дает заметный экономический эффект, так как тогда можно сооружать концевое устройство на глубину, немного большую глубины воронки размыва, отвечающей длине  $L$ . Таким образом, оптимальную длину крепления  $L$  определяют технико-экономическим сравнением стоимости креплений разной длины с учетом того, что короткие крепления требуют глубоких концевых устройств.

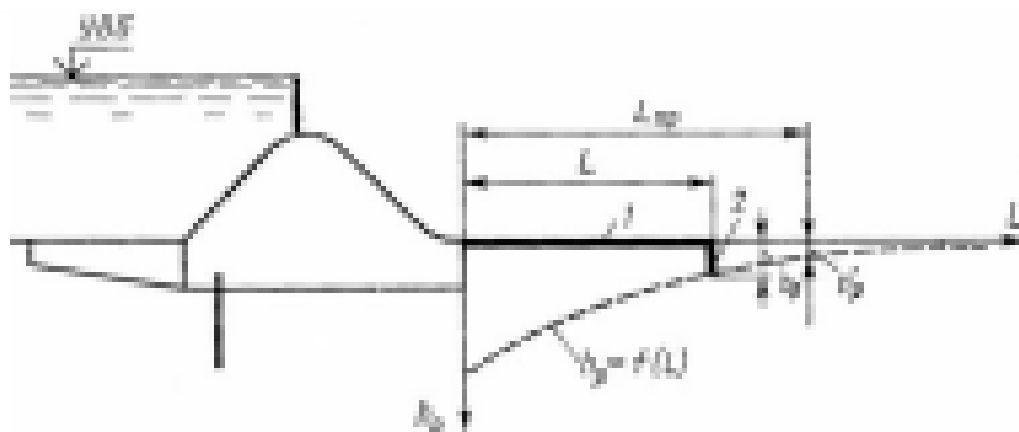


Рис. 4.6. Зависимость глубины воронки размыва  $h_p$  от длины крепления  $L$ : 1- крепление НБ (водобой и рисберма); 2- концевое устройство рисбермы

Таким образом, крепление НБ следует рассматривать как устройство, позволяющее удалить воронку размыва от плотины и снизить ее глубину.

#### 4.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕПЛЕНИЯ НБ

Кроме предотвращения размывов в НБ крепление должно также отвечать следующим требованиям: 1) не разрушаться потоком воды; 2) не разрушаться льдом; 3) не нарушать режим движения воды в НБ так, чтобы при этом возникали затруднения в период судоходства. Главным требованием является первое из трех указанных. Второе требование часто

не учитывают, поскольку лед редко сбрасывают в НБ. В части третьего требования отметим, что режим потока в НБ рассматривают с учетом не только крепления, но в основном с учетом влияния на него компоновки гидроузла. При проектировании крепления НБ решают две задачи: 1) гидравлическую - определение геометрии главных элементов крепления и нагрузок от потока воды на эти элементы; 2) конструктивная - разработка конструкции крепления, обеспечивающей его устойчивость и прочность.

В креплении НБ используют два типа гасителей энергии воды: простые гасители, поддающиеся гидравлическому расчету (водобойные стенки и колодцы), и специальные гасители, не поддающиеся расчету. При сопряжении бьефов рассматривают два типа сопряжения потока с НБ: с помощью отогнанного и затопленного гидравлического прыжка.

Крепление НБ при затопленном прыжке получается более экономичным. При появлении отогнанного прыжка за открытым пролетом плотины отметка уровня воды на водобое за этим пролетом резко снижается по сравнению с отметкой уровня воды за соседними закрытыми пролетами (где нет отогнанного прыжка) и по сравнению с отметкой УНБ на рисберме. Из-за этого местного снижения уровня воды водобойная плита за открытым пролетом начинает испытывать в этом месте большое противодавление, поэтому ее толщина по расчету на всплывание оказывается значительной. Кроме того, длина крепления при отогнанном прыжке получается большой. Поэтому крепление НБ проектируют так, чтобы получить затопленный гидравлический прыжок при всех вариантах открытия и закрытия затворов водосбросных отверстий (правил маневрирования затворами). При донном режиме сопряжения бьефов в качестве основных принимают согласно СНиП 2.06.06-85 следующие типы гасителей энергии:

- 1) сплошная водобойная стенка;
- 2) водобойный колодец;
- 3) водобойная стенка с расположенным ниже водобойным колодцем;
- 4) прорезная водобойная стенка;
- 5) гаситель в виде нескольких рядов шашек или пирсов;
- 6) комбинированные из разных типов этих гасителей.

Допускается применение других типов гасителей при технико-экономическом обосновании.

## 4.5. ГАСИТЕЛИ ЭНЕРГИИ ПРОСТОГО ТИПА

Водобойные железобетонные колодцы и стенки устраивают сразу за плотиной для получения затопленного гидравлического прыжка при сопряжении падающей струи с НБ. При их проектировании следует избегать острых углов, так как они легко разрушаются потоком. Если поток несет крупные камни, то они могут заполнить водобойный колодец, вследствие чего гидравлический режим работы колодца нарушится.

1. *Водобойный колодец* может иметь разную конструкцию (рис. 4.7). Устраивая уступ  $ab$ , наклонным для уменьшения износа его бетона приходится увеличивать глубину колодца  $d$ , сохраняя эффект гашения потока.

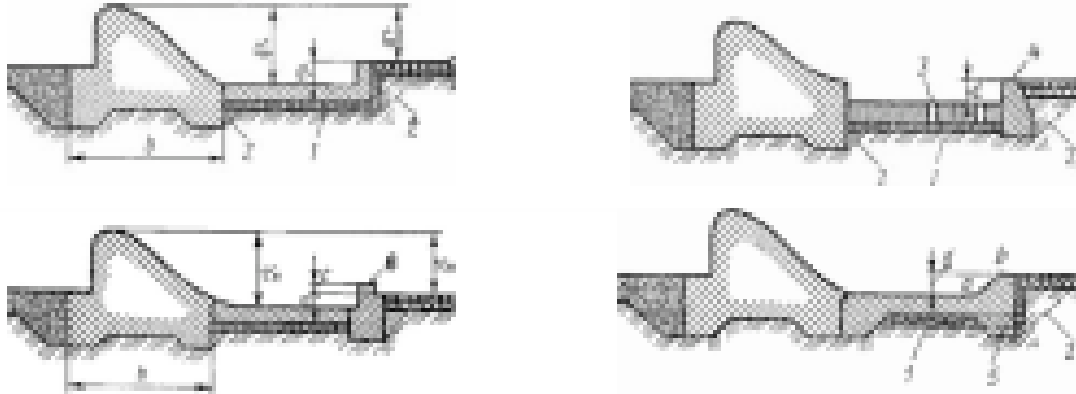


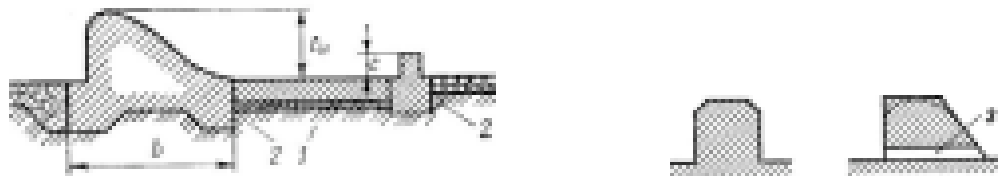
Рис. 4.7. Варианты конструкции водобойного колодца:

1 - дренаж; 2 – откос выемки; 3 - дренажное отверстие; 4 - подпорная стенка; 5 - отвод воды из дренажа; 6 - комбинированный водобойный колодец

Устройство колодца приводит к заглублению глубины низового и верхового зуба плотины, т.е. к росту ее высоты ( $C' H > C H$ ) и объема бетона плотины. Таким образом, удешевив за счет устройства колодца крепление НБ, получим удорожание тела плотины, т.е. эта задача решается экономически.

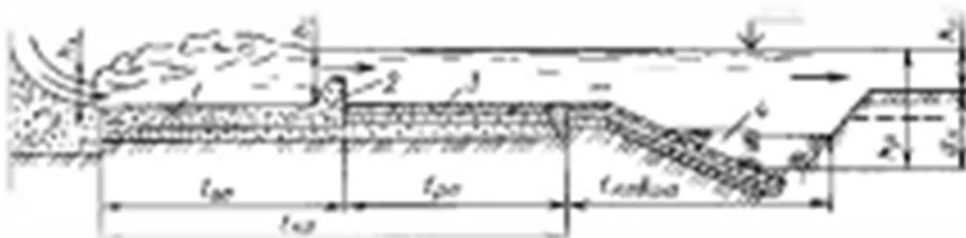
2. *Водобойная стенка*. В этом случае (рис. 3.8; 3.9) высота плотины в НБ не увеличивается. Недостатки водобойной стенки: а) в

НБ за стенкой может появиться отогнанный прыжок и потребуются устраивать вторую стенку меньшей высоты, а может быть третью; б) длина крепления за стенкой будет несколько больше, чем за водобойным уступом; в) стенка может затруднить пропуск строительного расхода реки.



*Рис. 4.8. Конструкция и форма водобойной стенки:*

*1 – дренаж; 2 – откос выемки; 3 – отверстия для выпуска воды из колодца*



*Рис. 4.9. Крепление НБ - гладкий водобой со стенкой и рисберма с ковшом*

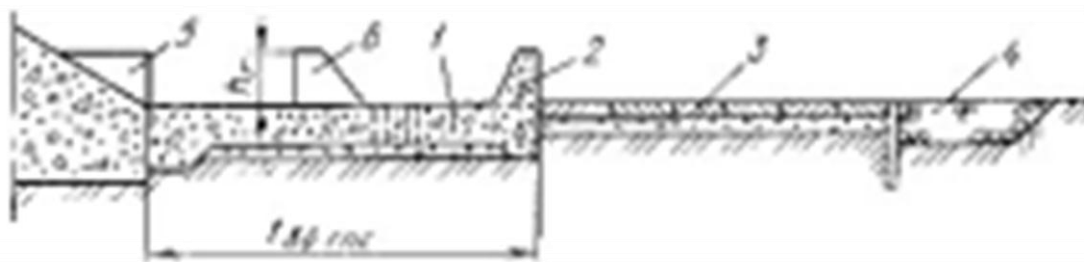
*1 - водобой; 2 - водобойная стенка; 3 - рисберма; 4 - концевая часть рисбермы*

3. *Комбинированный водобойный колодец* (рис. 4.7, б). Высоту водобойной стенки с назначают такой, чтобы за ней получилось минимально допустимое затопление прыжка, глубину  $d$  назначают из условия, чтобы при глубине водобойного колодца  $(c+d)$  сразу за плотиной получить минимально допустимое затопление прыжка. При этом не обязательно ставить вторую стенку, т.е. не повышается высота плотины. Применяют другие комбинации колодцев и стенок (стенка, а за ней колодец).

#### **4.6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГАСИТЕЛИ ЭНЕРГИИ**

Выбор типа гасителей, их расположение на водобое необходимо определять на основании технико-экономического сравнения вариантов с учетом допустимых глубин на водобое, условий возникновения кавитации

и сбойности течения, а также размывающей способности потока ниже гасителей. Конструкция гасителя наряду с гашением энергии должна обеспечивать устойчивость потока и исключать опасность возникновения сбойных течений. В НБ малопролетных (шириной пролета до 15 м) водосливных плотин целесообразно применение специальных противосбойных гасителей. Специальные гасители устраивают обычно в пределах водобоя в виде железобетонных преград (выступов) разной формы и размера (рис. 4.10).



*Рис. 4.10. Крепление НБ - водобой с гасителями и стенкой и рисбермой:*

*1 – водобой; 2 – водобойная стенка; 3 – рисберма; 4 – концевое устройство рисбермы; 5 – расщепитель потока; 6 – гаситель энергии*

Поток, обтекая эти преграды, расщепляется на отдельные струи, которые соударяются и кинетическая энергия потока снижается. При проектировании этих гасителей следует учитывать следующие 3 важных фактора.

1. На рис. 4.11 показаны два различных гидравлических прыжка: обычный прыжок (рис. 4.11, а) - его пределах нет гасителя в виде бетонного выступа, и прыжок, в пределах которого имеется этот выступ 1 (рис. 4.11, б). На рис. 4.11, б гаситель испытывает со стороны потока горизонтальное давление, направленное в сторону НБ; в свою очередь, поток со стороны гасителя испытывает реакцию  $R$ . Именно наличием этой реакции прыжок по этой схеме отличается от прыжка на рис. 4.11, а.

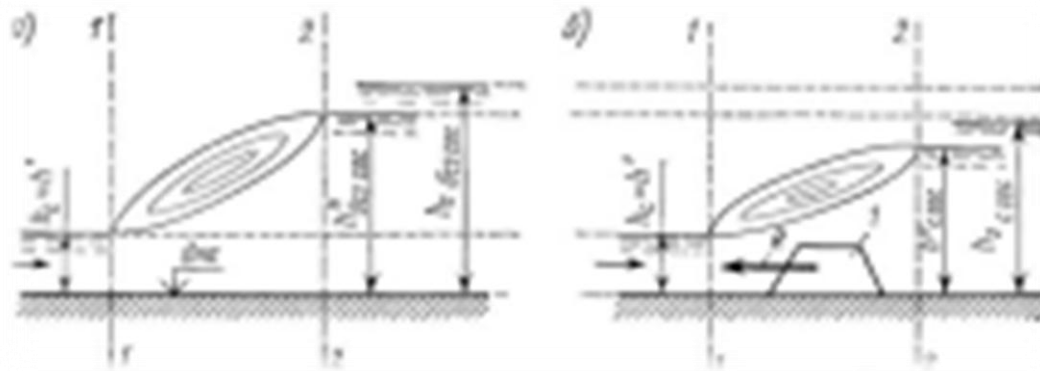


Рис. 4.11. Сопряжение бьефов (при  $h_c = const$ ) без и со специальными гасителями: а – без гасителей; б – с гасителями; 1 – специальный гаситель

Выражая уравнением гидравлики количество движения сечений 1-1 и 2-

2, найдем при заданной первой сопряженной глубине  $h_c = h'$  (одинаковой для рис. 4.11, а, б), отвечающие этой глубине вторые сопряженные глубины: а)  $h''_{без\ гас}$  - для схемы без гасителя; б)  $h''_{гас}$  - для схемы с гасителем. Сопоставляя найденные глубины  $h''_{без\ гас}$  и  $h''_{гас}$ , видим, что гаситель энергии 1 резко снижает вторую сопряженную глубину  $h''$  (за счет реакции  $R$ ). Обозначим через  $h_{2\ гас}$  и  $h_{2\ без\ гас}$  затопляющие глубины или глубины НБ, при которых имеем затопленный прыжок с заданной степенью затопления:  $A_1 = (1,02-1,1) = h_{2\ гас} / h''$ . Гаситель, снижая вторую сопряженную глубину, уменьшает на столько же затопляющую глубину (отношение  $h_{2\ гас} / h_{2\ без\ гас} \approx 0,7-0,8$ ). Принимая гасители и уменьшая за счет их реактивного действия затопляющую глубину, можно поднять отметку поверхности дна, на котором имеется гаситель, сохранив нужную степень затопления прыжка.

2. При обтекании гасителей в потоке образуются водовороты, повышающие пульсацию скоростей, резко возрастают турбулентные касательные напряжения, что сильно повышает гашение энергии потока в НБ.

3. Гасители энергии снижают волнение свободной поверхности в НБ, уменьшают сбойность течения и способствуют интенсивному растеканию потока в плане, т.е. уменьшают удельные расходы в НБ. Согласно Д. И. Кумину, различают тройную роль гасителей:



1) реактивную, выражающуюся в снижении затопляющей глубины и поднятии поверхности водобоя, т.е. в уменьшении высоты плотины;

2) диссипативную, выражающуюся в гашении избыточной кинетической энергии на небольшом расстоянии от плотины. Благодаря этому можно укоротить длину крепления НБ, сохраняя глубину воронки размыва за ним, или, сохраняя длину крепления НБ, уменьшить глубину воронки размыва за креплением или глубину концевое устройства;

3) регулирующую, выражающуюся в успокоении потока в НБ и снижении удельных расходов воды в русле НБ. Сейчас рациональную форму и размеры специальных гасителей можно установить путем лабораторных испытаний конкретного водосброса. Общим недостатком специальных гасителей является то, что на их гра-нях при скоростях потока свыше 15-17 м/с возникают вакуум и кавитация и постепенно они разрушаются вследствие кавитационной эрозии бетона. В настоящее время в качестве специальных гасителей наиболее часто применяют: а) пирсы и шашки; б) зубья; в) растекатели; г) носки расщепители; встречаются и другие их комбинации.

1. *Пирсы и шашки* представляют собой ряд железобетонных выступов с формой, показанной на рис. 4.12. Если высота выступов больше их длины и ширины, то их называют пирсами, в противном случае - шашками.

Пирсы и шашки в плане располагают в шахматном порядке: пирсы - на водобое, их первый ряд располагают на расстоянии  $(1-1,5)h_c$  от сжатого сечения струи, шашки применяют в качестве искусственной шероховатости и располагают за прыжком на рисберме. Принимают следующие размеры пирсов (рис. 4.12):  $c=(0,75-1,0)h_c$ ;  $b=(0,5-1,0)c$ ;  $a=(2-3)c$ , где  $h_c$  - глубина сжатого сечения струи у подошвы плотины.

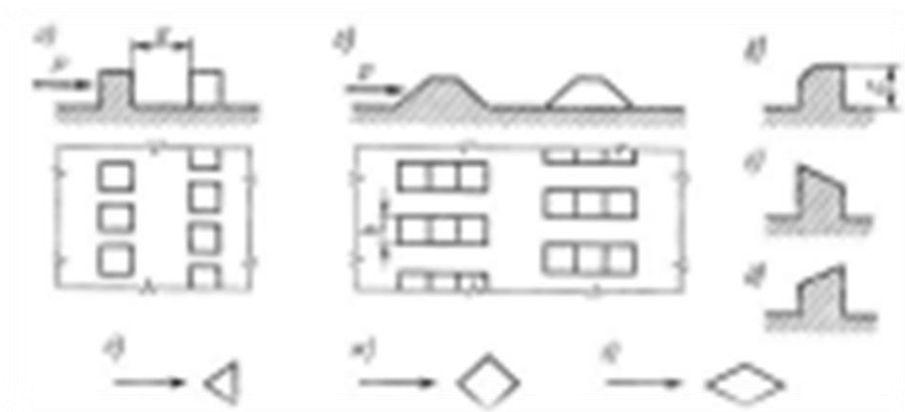


Рис. 4.12. Типы пирсов и шашек:

а, б - разрез и план; в - д - вертикальные сечения; е - з - планы

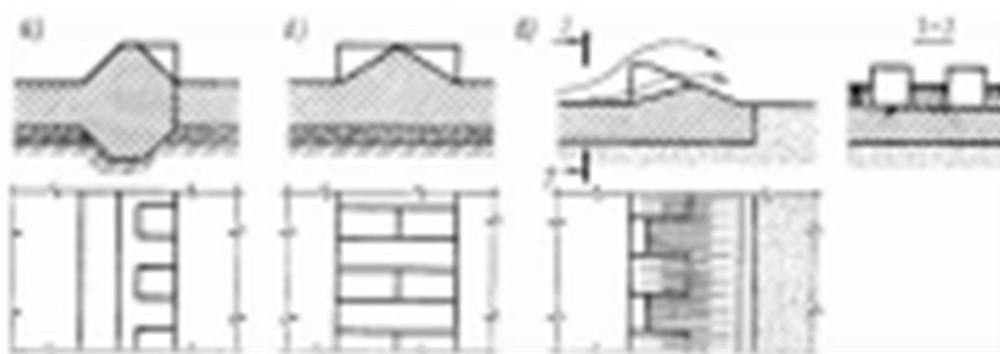


Рис. 4.13. Примеры зубчатых порогов

2. Зубья из железобетона имеют разную форму (рис. 4.13, а, б). На рис. 4.13, в показан зубчатый порог Ребока, которым заканчивают крепление НБ. Поток расщепляется зубьями на ряд струй, и из-за разной высоты зубьев образуются два яруса струй (стрелки на рис. 4.13, в). Под струями возникает движение воды, при котором ее размывающая способность падает.

3. Носок-расщепитель Д. И. Кумина. Лабораторные исследования показали, что пирсы 1 дают часто фонтанирование струи, что ухудшает условия сопряжения бьефов за гасителями (см. рис. 4.13, а). От фонтанирования можно избавиться, если устроить носок-расщепитель 2 (рис. 4.14, б).

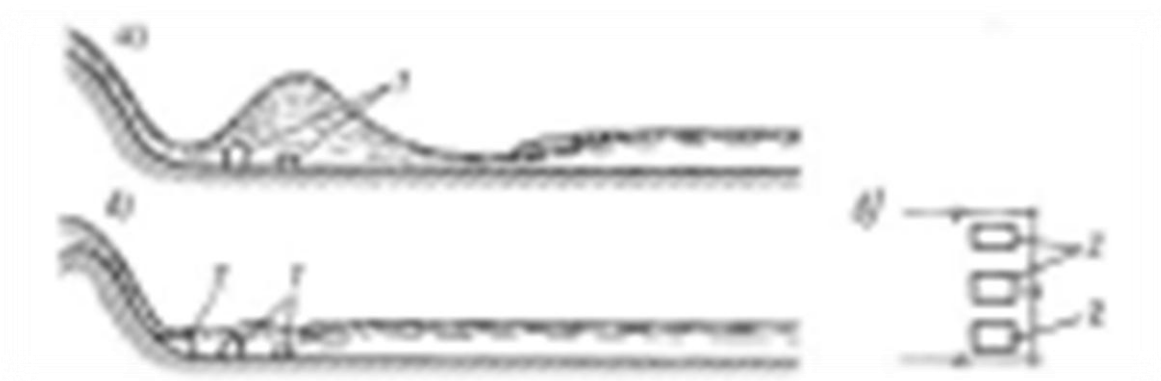


Рис. 4.14. Пирсы:

*а – без носка-расщепителя; б – с носком-расщепителем; в – план*

4. *Растекатели* (рис. 4.15; 4.16, д, ж) препятствуют сбойности потока и уменьшают удельные расходы. Их устанавливают в начале водобоя, в зоне сжатого сечения под углом  $\alpha=0-15^\circ$  к оси потока.

Высота растекателей примерно равна сжатой глубине потока. Длина стенок равна  $(2,5-3)b$ , где  $b$  - шаг стенок в свету. Угол  $\alpha$  для крайних и средних пролетов разный. При такой верной расстановке стенок исчезают водовороты у берегов и сжимается с боков струя, выходящая из отверстий

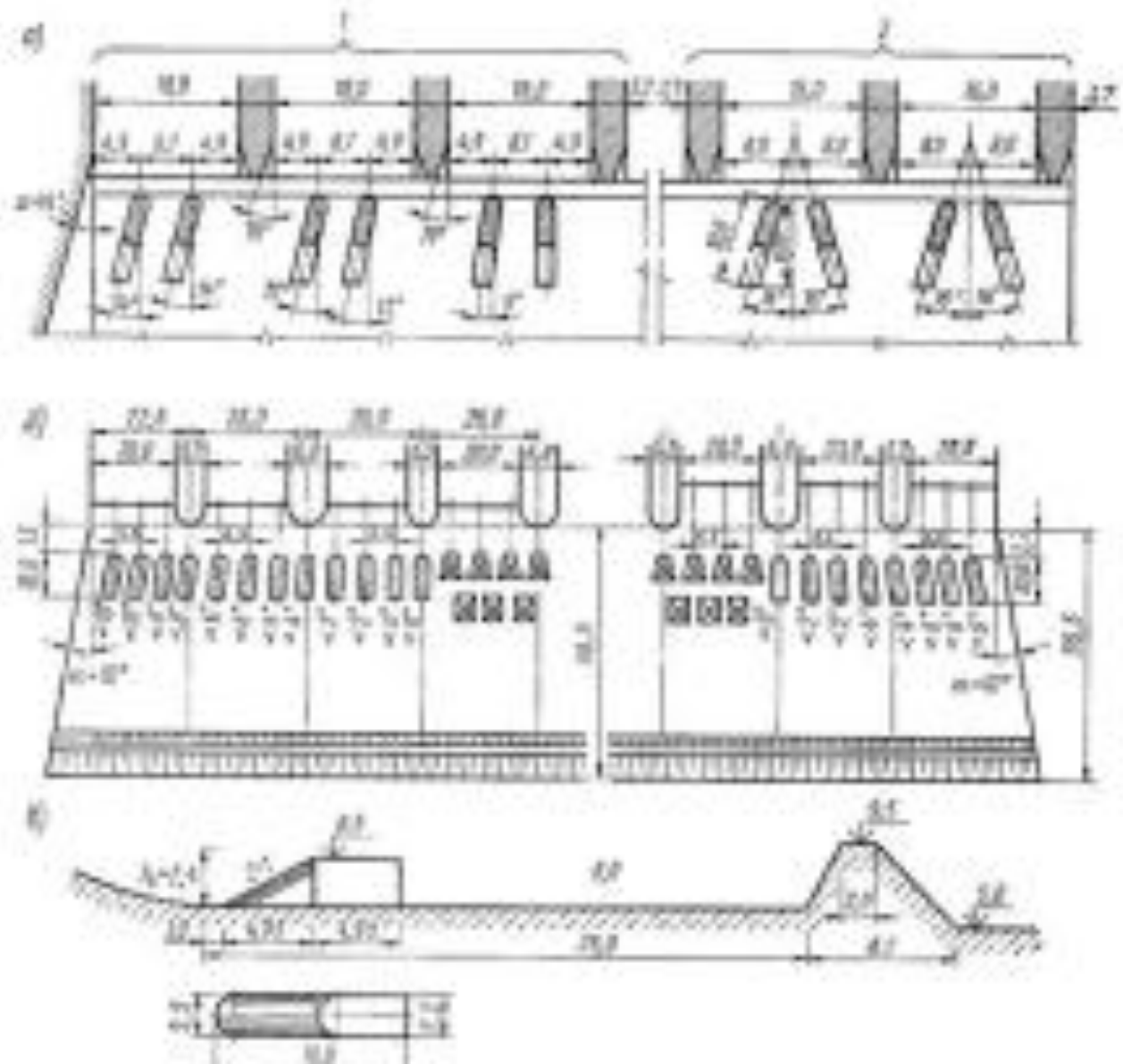


Рис. 4.15. Пример расстановки растекателей в плане (а, б), их продольный разрез и план (в); 1, 2 - правобережные и средние пролеты

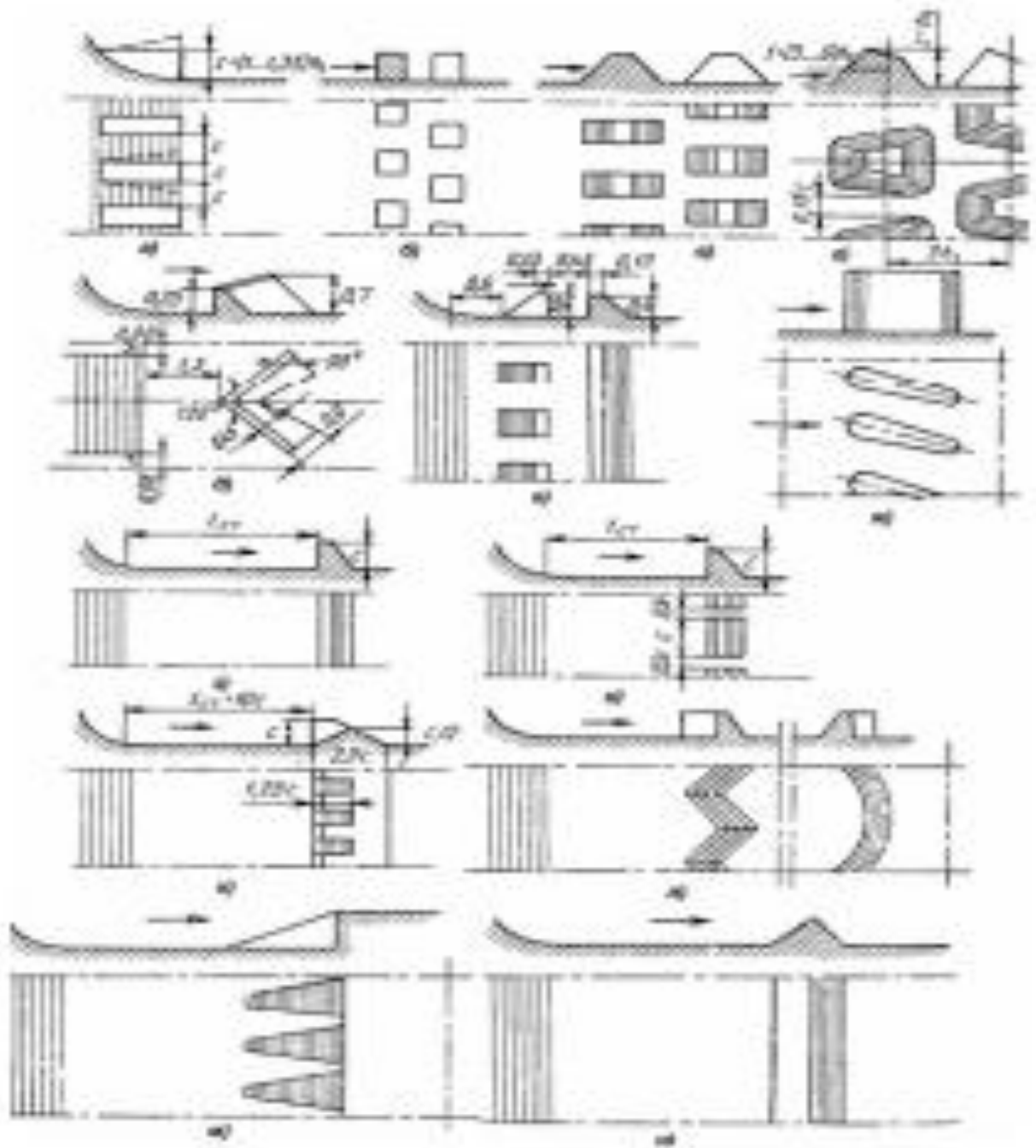


Рис. 4.16. Расщепители, гасители, шашки, пирсы, растекатели, пороги:

а - расщепители; б - шашки; в - пирсы; г - гаситель Гидропроекта; д - гаситель-растекатель Кумина; е - гаситель Образовского; ж - растекатели; з - сплошная водобойная стенка:  $c = 0,12h_{кр}$  (8Т 0 h кр + 2) 1/2 ; и - прорезная стенка; к - зубчатый порог Ребока:  $c = (0,15-0,2)q(p) 1/2$ , где  $p$  - разность отметок входного порога и дна водобоя; л - зигзагообразный и криволинейный пороги; м - порог с клиновидными прорезями; н - порог Шоклича. На позициях д, е размеры даны в долях от  $h_{кр}$

Расщепители потока улучшают работу гасителей, уменьшают удельные расходы струи в месте падения ее на основание, увеличивают эффективную глубину потока на водобое (рис. 4.16, а).

Обычно их устанавливают параллельно потоку и симметрично относительно его оси. При сходящихся и расходящихся боковых стенках водосброса расщепители можно устраивать веерообразно. На рис. 3.17 даны сочетания носка-расщепителя с пирсами, их размеры - в % от критической глубины потока,  $h_{кр} = (\alpha q^2 / g)^{1/3}$ , полученные Д. И. Куминым в опытах.

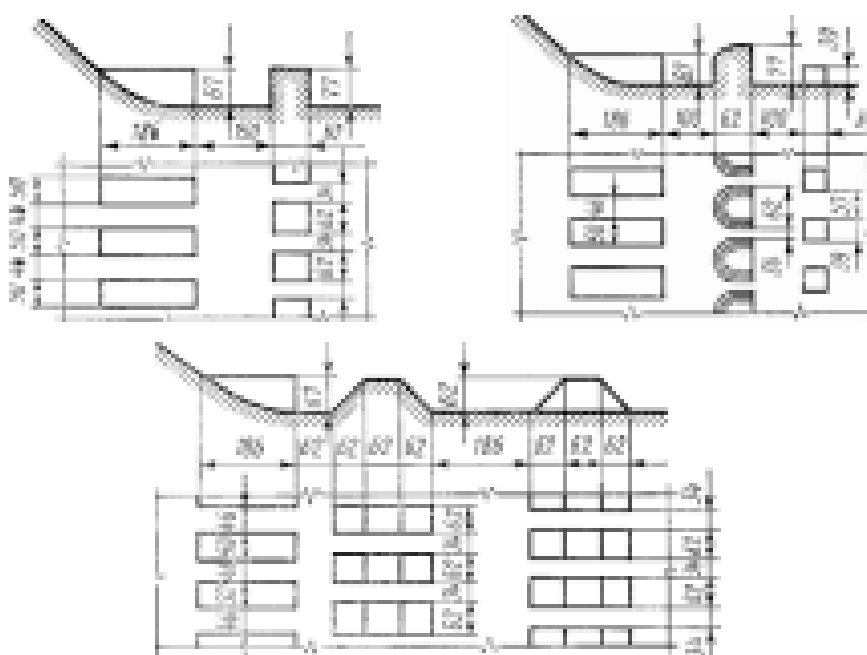


Рис. 4.17. Рациональные сочетания носка-расщепителя с пирсами

Вертикальные, ступенчатые, наклонные или зубчатые стенки, располагаемые в конце водобойной плиты и отдельных случаях на рисберме, называются концевыми порогами (см. рис. 4.16, з-н). Они предназначены для образования путем отклонения донных струй за водобоем длинных плоских вальцов, взаимодействующих с транзитным потоком и вызывающих дополнительное гашение энергии, предохранения незащищенного дна реки за рисбермой от размыва, выравнивания удельных расходов по ее ширине. Кроме гасителей для обеспечения равномерного распределения потока по ширине водобоя или изменения его направления применяют растекатели (см. рис. 4.16, д, ж), которые

ставят под углом до  $15^\circ$  к оси потока. Общие недостатки всех растекателей, гасителей и расщепителей: быстрый износ углов из-за повреждений их плавающими предметами (льдинами, бревнами, наносами), кавитационная эрозия ребер и плоскостей. При скоростях потока на водобое более 15-17 м/с на многих гасителях возникает кавитация, что приводит к их эрозии и разрушению. В этих условиях переходят на специальные безэрозионные конструкции гасителей и расщепители с хорошо обтекаемыми формами.

## **5. МЕРОПРИЯТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Создание подпертого бьефа и особенно водохранилища влечет за собой ряд и полезных и неблагоприятных последствий.

*Полезные последствия устройства водохранилищ.* Полезными последствиями являются:

1) увеличение длины судоходных путей благодаря возможности плавания судов по подпертым притокам, ранее бывшим несудоходными, создание подходов к населенным пунктам, ранее далеко отстоявшим от воды;

2) улучшение условий водоснабжения населенных мест из реки вследствие уменьшения высоты подкачки воды и др.;

3) улучшение условий ведения сельского хозяйства на прилегающих к водохранилищу землях (подъем уровня грунтовых вод, полезный в засушливых районах, облегчение условий орошения, обводнения и пр.);

4) развитие рыбного хозяйства в верхнем бьефе, который отличается, как правило, высокой кормностью;

5) благоприятное влияние на климатические условия в южных засушливых районах, позволяющее в некоторой мере преобразовать природу этих районов.

*Затопление земель и сооружений.* Затопление земель, неизбежное при значительном повышении уровня воды в реке, является отрицательным фактором большого значения при выборе места постройки плотины и ее высоты, так как оно вызывает потерю сельскохозяйственных угодий, полезных ископаемых, выключение из работы промышленных предприятий, транспортных сооружений, перенос населенных пунктов и пр.

В связи с затоплениями проводятся следующие мероприятия:

1) плановое переселение жителей затопляемых территорий на новые места, предоставление им средств для освоения новых земель и постройки новых жилищ и даже новых населенных пунктов взамен затопляемых;



2) перенос или переустройство затопляемых транспортных сооружений – железнодорожных линий, шоссе, путевых построек и линий связи и электропередач;

3) перенос и переустройство промышленных предприятий в зоне затопления;

4) переустройство сооружений, расположенных на самой реке – мостов, если окажется недостаточным возвышение их над подпертой водой (в отношении судоходства и сплава), а также набережных и различных портовых сооружений;

5) переустройство водосточных устройств, коллекторов канализации, каналов для прокладки подземных кабелей и других элементов подземного хозяйства городов, если они подвергаются затоплению в результате подпора;

6) восстановление затопляемых лесов, если последние имели защитное значение (в степных засушливых районах);

7) защита находящихся на берегах ценных объектов от разрушения вследствие волнения, развивающегося на крупных водохранилищах, или вследствие оползаний и обвалов берегов, возникающих в связи с изменениями уровня воды в водохранилище.

В связи с затоплением в некоторых случаях вместо переноса населенных пунктов, сооружений и т. п. оказывается целесообразным выполнение инженерной защиты затопляемых объектов с оставлением их на месте.

Инженерная защита заключается обычно в ограждении объекта незатопляемыми земляными валами и в организации дренажа и откачки просачивающихся или стекающих по земной поверхности в огражденную зону вод.

Выбор мероприятий, (т. е. решение о переносе населенного пункта, предприятия, сооружения или о его защите от затопления) производится после технико-экономического сравнения вариантов мероприятий.

Надо различать затопление постоянное при нормальном подпорном уровне водохранилища и ежегодных обычных паводках, и временное, которое может иметь место только при проходе редко повторяющихся

паводков и при временном повышении нормального подпорного уровня. Временное затопление в отдельных случаях допускается без переустройства затрагиваемых объектов и переноса населенных пунктов (например, если оно повторяется не чаще 1 раза в 20 лет при длительности до 1—2 недель).

***Подъем грунтовых вод и подтопление земель.*** Уровень грунтовых вод в пойме реки и вообще в прибрежной зоне обычно связан с уровнем воды в реке. Поэтому установление нового повышенного уровня в подпертом бьефе плотины вызывает подъем грунтовых вод (*рис. 5*). Это влечет за собой следующие неблагоприятные последствия, называемые подтоплением.

1. Если уровень грунтовых вод установится на новой глубине, например (*рис. 5*)  $h_1' < h_1$ , неблагоприятной для развития культурных растений, то эти последние будут замещены водолюбивыми болотными травами, менее ценными.

В других местах грунтовые воды могут подойти так близко к поверхности земли, что образуется болото (например, при глубине  $h_2'$ ).

2. Новый уровень грунтовых вод может подняться выше подошвы фундаментов сооружений; в связи с изменением водных условий песчано-глинистого и глинистого грунта основания могут появиться не предусмотренные ранее деформации сооружений (осадки).

3. По той же причине (подъем грунтовых вод) могут быть затоплены грунтовыми водами и выведены из строя подвальные помещения зданий (*рис. 5*), подземное хозяйство городов, коммунальных и промышленных предприятий, шахт, рудников, карьеры полезных ископаемых и т. п.

4. Наконец санитарное состояние района может ухудшиться вследствие заболачивания земель и появления или усиления малярийных и других заболеваний.

Определение будущего положения подпертого уровня грунтовых вод является сложной гидрогеологической задачей, решаемой в большинстве случаев лишь приближенно, тем более, что уровень воды в самом водохранилище не является стабильным, а колеблется при сработке и наполнении его.

При ориентировочной оценке зоны подтопления иногда считают ее в пределах, где поверхность земли выше подпорного уровня на 3—4 м в населенных пунктах и на 1—2 м на культурных (возделываемых) землях.

В связи с подтоплением приходится проводить:

1) переселение и устройство на новых местах населения из зоны подтопления или же дренажные работы в этой зоне с оставлением там населения и его хозяйства, если последний вариант экономически представляется более целесообразным;

2) защиту предприятий от подтопления (дренаж с искусственной откачкой вод, реконструкцию сооружений) или перенос их на другое место, если это более целесообразно, чем защита;

3) дренаж особо ценных земель, если это оправдывается высокой эффективностью земель.

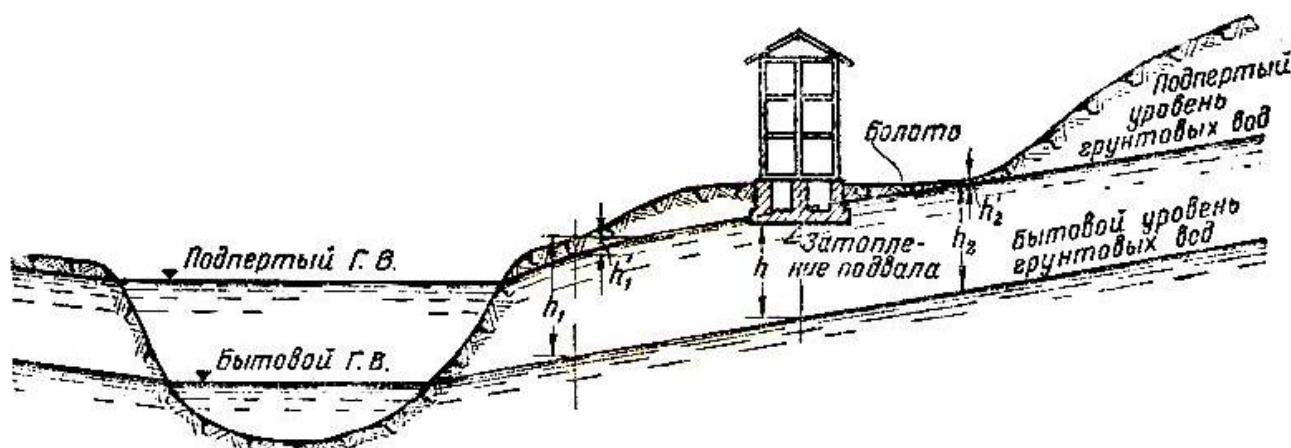


Рис. 5. Схема подъема уровня грунтовых вод и подтопления земель

## 5.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПОДПЕРТЫХ БЪЕФОВ

*Характеристики водохранилищ.* Характеристиками водохранилища являются:

- а) нормальный подпорный горизонт воды (НПГ);
- б) горизонт сработки или горизонт мертвого объема (ГМО);
- в) объем водохранилища полезный, мертвый и общий;
- г) площадь зеркала водохранилища.

Полезный объем водохранилища занимает верхнюю часть объема водохранилища (*рис. 5.1.*), используемую для регулирования стока, и определяется водохозяйственными расчетами или расчетами регулирования стока с учетом потерь воды на испарение с водной поверхности, фильтрацию и пр. Нижняя часть объема водохранилища, не используемая для указанных выше целей, называется мертвым объемом, ограничиваемым поверху горизонтом сработки, или горизонтом мертвого объема (ГМО) водохранилища. Полезный объем заключается между горизонтами нормальным подпорным и мертвого объема.

Отметка горизонта мертвого объема определяется условиями занесения этого объема наносами (исходя из расчетного срока службы водохранилища 50—100 лет и т. п.), условиями использования энергии воды, санитарными и другими соображениями.

Всякое водохранилище характеризуется обычно кривыми объемов его  $W$  и площадей зеркал  $\Omega$  (*рис. 5.1.*) в зависимости от отметки  $H$  горизонта воды в нем.

Характерным является отношение  $\frac{W}{\Omega}$  или отношение  $\frac{W_{пол}}{\Omega_{зат}}$ , где  $W_{пол}$  — полезный объем водохранилища, а  $\Omega_{зат}$  — площадь затоплений. Так для водохранилищ в горных условиях  $\frac{W_{пол}}{\Omega_{зат}}$  колеблется в пределах 8—15, для равнинных условий 2—5.

**Выбор места для водохранилища.** Район для устройства водохранилища определяется народно-хозяйственными требованиями, с учетом общей схемы использования реки, если она имеется. Теми же условиями определяется и отметка нормального подпорного горизонта (НПГ). Намеченное место водохранилища оценивается в отношении возможной фильтрации воды из водохранилища (что устанавливается гидрогеологами), благоприятности геологических, топографических и строительных условий для плотины и в отношении экономической эффективности. Следует выбирать такие места, где необходимая емкость получается при минимальной площади затоплений и подтоплений, что соответствует обычно долинам с крутыми склонами (высокое значение  $\frac{W_{пол}}{\Omega_{зат}}$ ).

Кроме величины площади затоплений и подтоплений важной является характеристика последних, получаемая после специального обследования. В этом отношении предпочтительны районы мало населенные, с неудобными землями, районы, в которых не подвергаются затоплению крупные населенные пункты, ценные предприятия, крупные сооружения и пр. Последнего можно иногда избежать правильным назначением подпорной отметки.

**Оценка затрат по водохранилищу.** В сумму затрат по водохранилищу входят:

а) стоимость переноса из зоны затопления и устройства на новом месте жилых и прочих зданий;

б) стоимость переноса и переустройства прочих затопляемых объектов (предприятий, дорог, линий связи и пр.);

в) расходы по землеустройству сельского населения на новых местах;

г) стоимость инженерной защиты не переносимых из зоны затопления объектов;

д) стоимость подготовки зоны к затоплению (лесоочистка, санитарные мероприятия, очистка тоневого участка и пр.);

е) расходы по обеспечению и организации водного транспорта в новых условиях;

ж) стоимость работ по борьбе с фильтрацией воды из водохранилища и с занесением его наносами, если такие работы производятся.

При определении затрат, указанных выше, исходят из принципа, что все нарушенные затоплением интересы земле- и водопользователей, хозяйственных организаций должны быть компенсированы и восстановлена, так сказать, продуктивность народного хозяйства, которая нарушена устройством водохранилища. Все затраты, связанные с улучшением переустраиваемых объектов (что иногда бывает неизбежно), не должны относиться на счет стоимости водохранилища.

**Выбор варианта водохранилища.** В экономическом отношении наилучшим будет тот вариант места водохранилища, НПГ, его сработки и

пр., в котором сумма стоимости постройки подпорного узла сооружений и затрат по водохранилищу, отнесенная к единице полезной емкости водохранилища ( $1 \text{ м}^3$ ) или к единице продукции, создаваемой гидроузлом (например  $1 \text{ квт}\cdot\text{ч}$ ), будет минимальной.

Но это только один из показателей эффективности, не решающий вопроса окончательно.

Необходимо еще учесть дополнительный полезный эффект, даваемый водохранилищем, например, возможность судоходства на подпертых притоках, ранее бывших несудоходными, улучшение водоснабжения из реки (уменьшение высоты перекачки воды), повышение грунтовых вод в засушливых районах, улучшение санитарных условий тех мест, которые были заболочены и маляриогенны, а водохранилищем затапливаются на значительную глубину, и т. п.

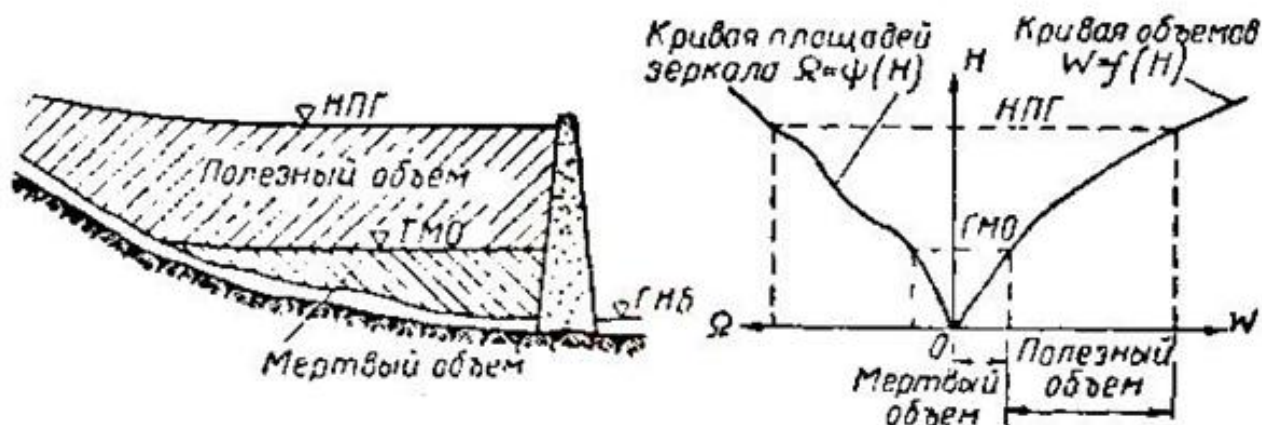


Рис. 5.1. Характеристики водохранилища

## 5.2. НИЖНИЙ БЬЕФ

Режим нижнего бьефа зависит от изменения гидрологических условий верхнего бьефа. Здесь могут быть рассмотрены два случая: 1) плотина и гидроузел не регулируют стока и 2) режим стока изменяется водохранилищем.

**Переформирование русла в нижнем бьефе.** При отсутствии регулирования стока режим расходов в нижнем бьефе сохраняется тот же, что и до устройства гидроузла. Но режим наносов, изменяемый, как правило, верхним бьефом, приводит к переформированиям русла реки

ниже плотины. В гидроузлах с малым напором можно различать два этапа. Первый этап – период занесения верхнего бьефа наносами, когда в нижний бьеф поток поступает освобожденным от наносов и с повышенной поэтому наносотранспортирующей способностью. В этот период русло в нижнем бьефе размывается на значительном протяжении, но особенно интенсивно вблизи плотины; при этом дно реки понижается на значительном протяжении (*рис. 5.2.,а*). Этот процесс, называемый иногда *ретрогрессией*, будет происходить до тех пор, пока не восстановится транзит наносов из верхнего бьефа, т. е. пока последний не будет полностью занесен ими.

Общее понижение русла, естественно, вызовет понижение уровня грунтовых вод в прилегающих районах, а с ним иссушение земель, ухудшение водоснабжения из колодцев и пр.

Мосты и прибрежные речные сооружения могут оказаться в опасности вследствие подмыва и обнажения фундаментов, турбины гидростанции могут оказаться заложенными слишком высоко над горизонтом нижнего бьефа и т. д.

Второй этап наступает, когда после полного занесения верхнего бьефа размыв достигает наибольшей величины (*рис. 5.2.,б*) и восстанавливается транзит наносов через плотину. В этот период прежний продольный профиль потока в нижнем бьефе постепенно восстанавливается, однако не полностью. Вблизи плотины и на расстоянии от нее понижение дна все же сохраняется. Последнее вызвано тем, что отверстие плотины обычно составляет лишь часть бытового сечения русла и поток выходит из отверстия со значительными скоростями, затухание которых и приближение к бытовым происходит лишь на известном расстоянии. Понижение дна по этой причине может достигать на горных реках величины нескольких метров: так, например: у Мало-Кабардинской плотины за 4 года после ее постройки горизонт воды нижнего бьефа упал на 2,62 м, в последующие 4 года наблюдений несколько поднялся и удерживался на 2,3 м ниже горизонта воды до постройки плотины.





Кромка ледяного покрова (т. е. конец полыньи) в течение зимы в зависимости от хода температур постепенно приближается к узлу, но никогда его не достигает. В полынье происходит образование глубинного льда, который может создать затруднения на нижерасположенном участке реки.

Наличие полыньи важно учитывать при установлении в проекте расчетных уровней воды в нижнем бьефе: зимние уровни должны назначаться не по «зимней» кривой расходов, а по «летней».

***Режим уровней и расходов в нижнем бьефе при регулировании стока водохранилищем.*** В этом случае следует проверять, как трансформируются расходы и горизонты нижнего бьефа, и не вызывает ли это нарушения интересов водопользователей нижнего бьефа.

Обычно устройство водохранилища ведет к понижению уровней воды в нижнем бьефе в период паводков, к снижению высоты наводнений. При периодических колебаниях расходов воды (например, при суточном регулировании гидростанций) в нижнем бьефе создается неустановившееся движение потока, при котором колебания уровней и расходов воды лишь постепенно затухают вниз по течению.

В этом случае представляет интерес процесс формирования глубин в нижнем бьефе в связи с колебаниями дна перекатов. При суточном регулировании глубины на перекатах, оказывается, соответствуют среднему суточному расходу вод

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Ляпичев. Гидротехнические сооружения. Учебное пособие. М.: 2008.
2. Иванов, В. М. Расчет и проектирование гидротехнических сооружений для гидроэлектростанций малой мощности и объектов водоснабжения и водоотведения: учебное пособие. АлтГТУ, 2008. – 101 с.
3. Гидротехнические сооружения : справ. проектировщика / под ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
4. Чугаев, Р. Р. Гидротехнические сооружения. Ч. 1. Глухие плотины / Р. Р. Чугаев. - М.: Агропромиздат, 1985. – 319 с.
5. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений: П 92-80 / Всесоюз. науч.исслед. ин-т гидротехники им. Б. Е. Веденеева. - Л.: ВНИИГ, 1981. - 105
6. Курсовое и дипломное проектирование по гидротехническим сооружениям / под. ред. В. С. Лапшенкова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 448 с.
7. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов / под. ред. П. С. Непорожного. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
8. Плотины из грунтовых материалов в районах крайнего Севера и вечной мерзлоты / Л. И. Кудояров, М. П. Павчич, В. Г. Радченко [и др.]. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1973. – 132 с.

---

**Акпаралиев Р.А**

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ГЭС**

**Курс лекций для студентов направления 640200."Электроэнергетика  
и электротехника" по профилю «Гидроэлектроэнергетика»  
всех форм обучения**

*Дизайнер Эркинбек у. Б.  
Корректор Эркинбек к. Ж.  
Редактор Турдукулова А.К.  
Тех.редактор Кочоров А.Д*

Подписано к печати 05.03.2015 г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офс. Печать офс. Объем 4,25 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 146. Цена 102,6с.

Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ "Текник" КГТУ им. И.Раззакова, т.:  
54-29-43

e-mail: [beknur@mail.ru](mailto:beknur@mail.ru)

