

### Лекция 3.2 Состав и компоновка основных сооружений ГЭС

Гидроэлектростанции являются составной частью электроэнергетических систем, а во многих случаях и водохозяйственных систем. Они представляют собой комплекс сооружений и оборудования, при помощи которых осуществляются концентрация напора участка реки в удобных для строительства ГЭС створах, регулирование речного стока и преобразование механической энергии воды в электрическую.

Состав и компоновка сооружений ГЭС определяются схемой концентрации напора. Как уже отмечалось, существуют два принципиально разных способа концентрации напора: плотинный и деривационный. Рассмотрим здесь основные сооружения ГЭС на примере плотинного способа.

Основными сооружениями ГЭС, выполненными по плотинной схеме, являются плотины и здания ГЭС. При напоре ориентировочно до 30 м здание ГЭС размещается в одном створе с плотиной. Вместе с плотиной оно воспринимает напор реки. Такие ГЭС называются *русловыми*. При напоре, превышающем 30 м, здание ГЭС размещается, как правило, за плотиной в нижнем бьефе и не воспринимает напор, а станции носят название *приплотинных*. Для обоих типов ГЭС при комплексном назначении гидроузла в него включаются сооружения неэнергетических участников гидротехнического комплекса, а их компоновка в значительной степени зависит от типа плотины и величины напора. На рис. 3.2.1 показаны характерные схемы компоновки

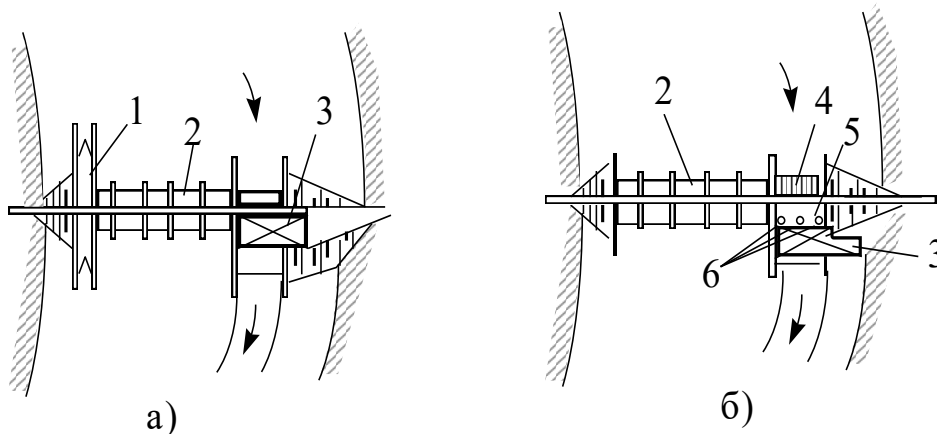


Рис. 3.2.1 Схемы компоновки сооружений русловой со шлюзом (а) и приплотинной без шлюза (б) ГЭС: 1 - шлюз; 2 - бетонная плотина; 3 - здание ГЭС; 4 - водоприемник; 5 - глухая бетонная плотина; 6 - турбинные трубопроводы

сооружений русловой и приплотинной ГЭС с бетонными плотинами. Для ГЭС с бетонными плотинами обычно водоприемник, турбинные водоводы

(трубопроводы) и водосбросы в отличие от ГЭС с грунтовыми плотинами устраиваются совмещенными с плотиной.

### Плотины и водохранилища ГЭС

Естественный режим речного стока отличается крайней неравномерностью. На равнинных реках, например, в период весеннего паводка (1,5-3 мес.) проходит до 60-70 % годового стока. В то же время энергопотребление у ГЭС существенно при этом не меняется. Использование речного стока гидроэлектростанцией в течение суток осуществляется также неравномерно. Так, если в течение суток график нагрузки ГЭС отличается крайней неравномерностью, то приточность на протяженном участке равнинных рек за это время почти неизменна. Кроме того, необходимый для работы ГЭС напор обычно распределен вдоль определенного участка реки, а сооружения ГЭС располагаются в конкретном створе реки. Таким образом, постоянно существуют противоречия между естественным временным и территориальным распределением стока и режимом его потребления ГЭС.

Для устранения указанных противоречий необходимо перераспределить естественный сток и во времени, и по территории. Такое перераспределение достигается с помощью водохранилищ. В водохранилищах задерживается избыточный естественный приток, когда он превышает спрос потребителей, и расходуется, когда этот спрос больше притока. Кроме того, необходимый напор при этом концентрируется непосредственно в створе ГЭС. Конечная цель регулирования речного стока водохранилищами заключается в увеличении гарантированной мощности ГЭС и количества вырабатываемой ею электроэнергии за счёт снижения влияния неоптимального для ГЭС гидрологического режима реки за регулируемый период.

Плотина является главнейшим сооружением гидроузла и предназначена для создания напора на ГЭС, водохранилища и регулирования стока. Все плотины делятся на две основные группы, отличающиеся друг от друга используемым материалом: 1) плотины *бетонные* и *железобетонные*, 2) плотины *грунтовые* (земляные, каменно-набросные и каменно-земляные). Бетонные и железобетонные плотины по конструктивным признакам делятся на *гравитационные*, *арочные* и *контрфорсные*. Схемы конструкций некоторых разновидностей плотин показаны на рисунках 3.2.2 – 3.2.5. Максимальная высота плотин колеблется от 100 м (для земляных плотин) до 300 м (для гравитационных плотин). Бетонные плотины по возможности пропуска воды могут быть *глухими*, то есть не допускающими перелива воды через свой гребень, и *водосливными*. Последние выполняются с поверхностными (водосливными) или заглубленными (донными) отверстиями для пропуска воды. Для глухих плотин, часто используемых в горных ущельях, сброс излишней

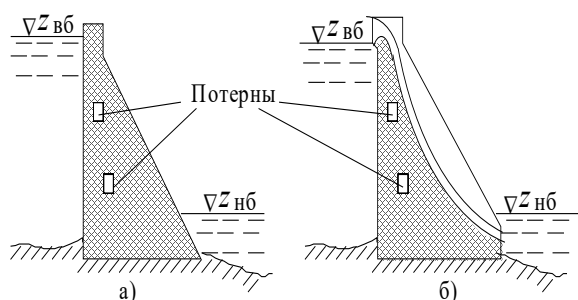


Рис. 3.2.2. Гравитационные плотины:  
а - глухая; б - водосливная

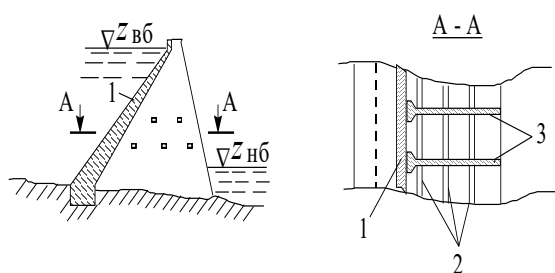


Рис. 3.2.4. Контрфорсная плотина:  
1 - железобетонная плита; 2 - балки жесткости; 3 - контрфорсы

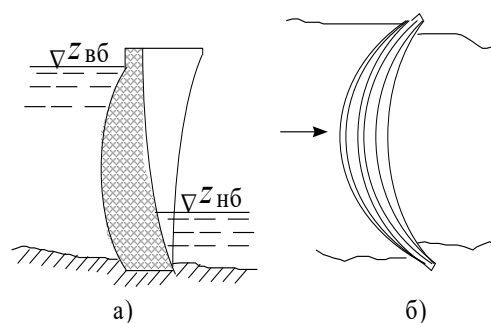


Рис. 3.2.3. Арочная плотина:  
а - вид сбоку; б - вид сверху

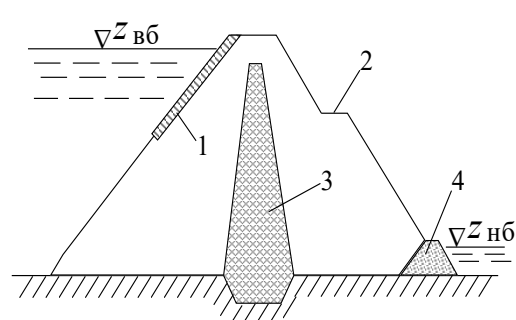


Рис. 3.2.5. Земляная плотина с ядром:  
1 - бетонная плита; 2 - берма; 3 - ядро; 4 - дренажная призма

воды осуществляется в обход плотины по поверхностному или туннельному водосбросу.

## Здания ГЭС

Конструкцию и компоновку здания ГЭС определяют природные условия, схема концентрации напора, величина напора, тип и параметры гидроагрегатов, трансформаторов и вспомогательного оборудования. Тип и конструкция здания должны быть экономически и технически обоснованы и в то же время должны обеспечивать надежную работу оборудования и удобные условия эксплуатации.

Характерную компоновку и расположение основного оборудования станции рассмотрим на примере здания приплотинной ГЭС (рис. 3.2.6).

Основными элементами компоновки здания являются: машинный зал 1, генератор 2, спиральная камера с турбиной 3, отсасывающая труба 4, турбинный трубопровод 5, водоприемник 6, решетка 7, плоский (щитовой) затвор 8, подъемный механизм затвора 9, провода на подстанцию 10, мостовой кран 11. Вода поступает в водоприемник и затем по трубопроводу направляется в турбинную камеру. Проходя через рабочее колесо турбины, вращает его и через отсасывающую трубу выходит в нижний бьеф. Рабочее колесо соединено валом с ротором генератора. При вращении рабочего колеса тур-

бины ротор также вращается. Генератор при этом выдает в нагрузку электроэнергию.

Решетка 7 предназначена для очистки воды от различных предметов,

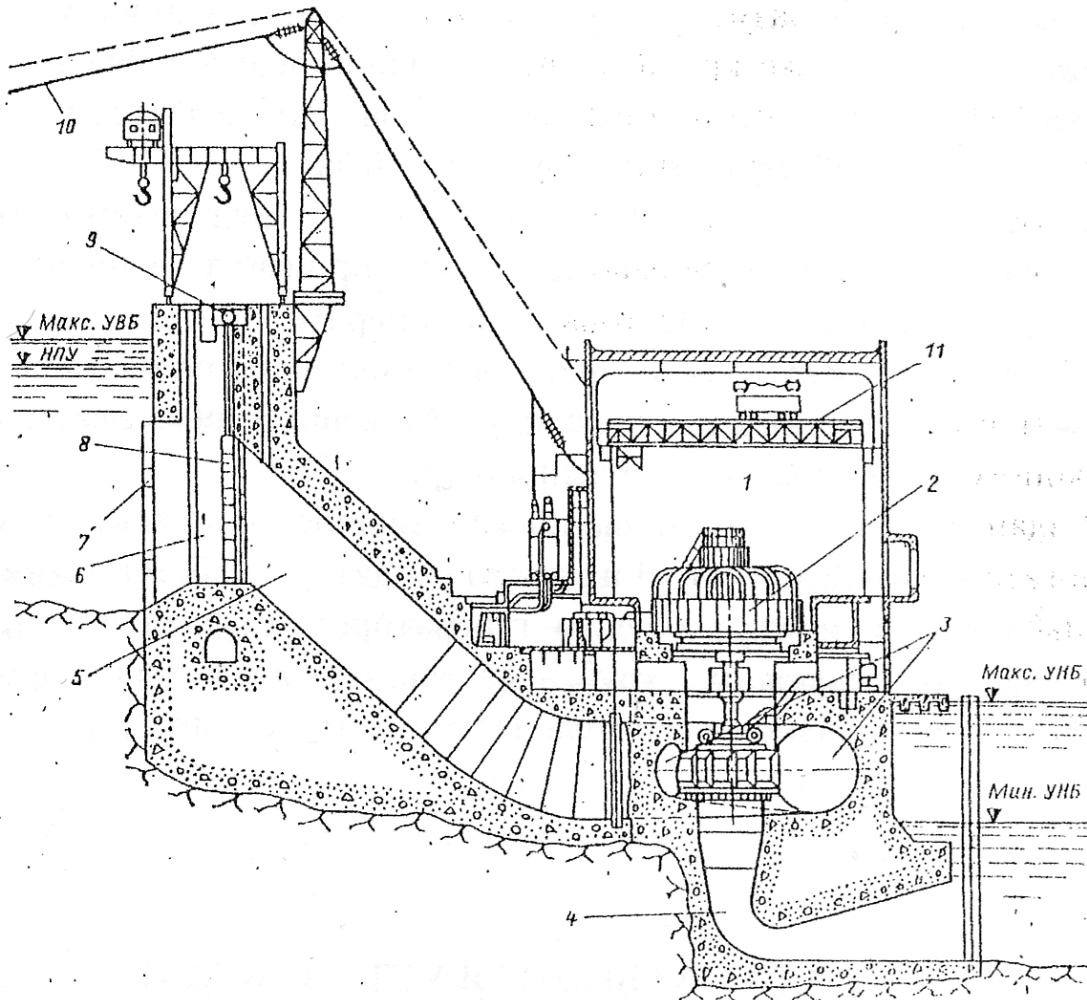


Рис. 3.2.6. Здание приплотинной ГЭС

способных повредить турбину. Место перед решеткой регулярно очищается. Затвор 8 позволяет перекрывать турбинный трубопровод при ремонте турбины и наполнении водохранилища. Обычно на ГЭС устанавливается не менее двух-трех одинаковых гидроагрегатов.

Общим элементом для всех типов зданий ГЭС является монтажная площадка, которая размещается обычно в конце здания у берега и обслуживается теми же кранами, что и машинный зал (на рис. 3.2.6 не показана). На уровне пола монтажной площадки делается подъездной путь для доставки оборудования в машинный зал.

Кроме того, в здание ГЭС размещается ряд вспомогательных помещений: оперативно-производственные, производственные, административно-хозяйственные, бытовые. К оперативно-производственным помещениям от-

носят помещения электрических распределительных устройств генераторного напряжения, собственных нужд переменного и постоянного тока, пульта управления и др.

В здании ГЭС размещается также большое количество различных вспомогательных устройств. В их число входят: устройства технического водоснабжения и пожаротушения генераторов, осушения спиральных камер и отсасывающих труб, масляного хозяйства, дренажные устройства, контрольно-измерительная аппаратура и др.

### Классификация гидротурбин

*Гидравлической турбиной* называется двигатель, преобразующий механическую энергию движущейся воды в механическую энергию вращения рабочего колеса двигателя.

Для потока жидкости удельная энергия потока на входе в рабочее колесо гидротурбины  $H_{g1}$ , м, равна

$$H_{g1} = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g}, \quad (3.2.1)$$

а на выходе рабочего колеса

$$H_{g2} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (3.2.2)$$

3

Здесь  $z_1$  и  $z_2$  - высоты расположения входа и выхода рабочего колеса турбины относительно плоскости сравнения;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  - давления и скорости потока жидкости на его входе и выходе соответственно. Величина удельной энергии, отданной потоком рабочему колесу турбины гидроагрегата (напор, используемый в агрегате),  $H_{agr}$  равна разности удельных энергий потока до и после рабочего колеса:

$$H_{agr} = H_{g1} - H_{g2} = (z_1 - z_2) + (p_1 - p_2)/\rho g + (v_1^2 - v_2^2)/2g. \quad (3.2.3)$$

В (3.2.23) слагаемое  $(z_1 - z_2)$  характеризует так называемую удельную энергию положения потока, слагаемое  $(p_1 - p_2)/\rho g$  - удельную энергию давления, слагаемое  $(v_1^2 - v_2^2)/2g$  - удельную кинетическую энергию. Удельные энергии положения и давления составляют вместе удельную потенциальную энергию, отданную потоком жидкости в агрегате. В зависимости от того, какие из трех слагаемых выражения (3.2.3) доминируют при работе турбины, различают *активные* и *реактивные* классы турбин.

В активных турбинах используется только кинетическая энергия потока жидкости. В таких турбинах  $z_1 = z_2$ ,  $p_1 = p_2$ . Для достижения высокого КПД практически весь напор на ГЭС преобразуется перед рабочим колесом в скоростной напор потока. Непосредственно перед рабочим колесом турбины по-

ток воды достигает максимально возможной скорости. В класс активных турбин входят *ковшовые, наклонно-струйные турбины и турбины двойного действия*. На ГЭС основное распространение получили ковшовые турбины.

В реактивных турбинах хотя бы частично используется и потенциальная энергия потока. Для них  $(z_1 - z_2) + (p_1 - p_2)/\rho g > 0$ . Процесс преобразования энергии на рабочем колесе происходит с избытком давления. В рабочем колесе реактивной турбины используется и кинетическая энергия потока. Класс реактивных турбин в зависимости от конструкции рабочего колеса делится на следующие системы: *радиально-осевые, пропеллерные, поворотнo-лопастные и диагональные*.

### Активные гидротурбины

В качестве представителя класса активных гидротурбин рассмотрим здесь наиболее распространенную ковшовую турбину с основными элементами конструкции (рис.3.2.4). Главными составными частями ковшовой турбины являются рабочее колесо, сопло и игла с регулирующим механизмом.

Вода из верхнего бьефа подводится трубопроводом к рабочему колесу,

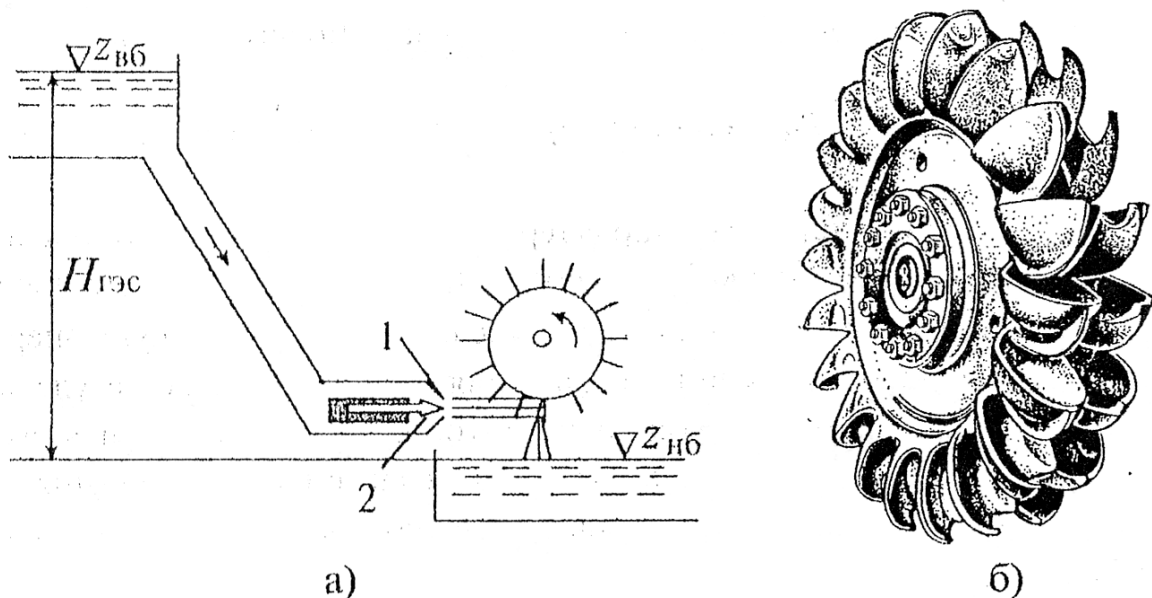


Рис. 3.2.4. Ковшовая турбина:

а – схема установки турбины; б – общий вид рабочего колеса

выполненному в виде диска и закрепленному на валу турбины. Колесо вращается в воздухе. По окружности колеса равномерно расположены ковшеобразные лопасти (ковши). Чтобы максимально преобразовать кинетическую энергию воды в механическую энергию вращения рабочего колеса, ковши выполняют эллиптической формы. На эллиптических частях ковша вода меняет свое направление на  $180^\circ$  и сходит с них с очень малой скоростью.

Формирование струи, придание ей необходимой скорости и преобразование энергии подводимой трубопроводом воды в кинетическую производится с помощью сопла 1, в котором помещается игла 2 для регулирования расхода и мощности турбины. При перемещении иглы изменяется выходное сечение струи и тем самым ее расход. Скорость перемещения иглы ограничена из-за опасности возникновения гидравлического удара. Для исключения появления гидравлического удара закрытие иглы идет медленно, в течение 20-40 с. В случае необходимости быстрого снижения мощности используется отклонитель струи, который за 2-3 с отводит струю от лопаток.

У ковшовых турбин лопасти рабочего колеса испытывают переменную нагрузку. В связи с этим возникают усталостные явления в металле, приводящие к расслаблению крепления. В настоящее время стали применять цельнолитые и сварнолитые рабочие колеса с повышенной надежностью.

Конструктивно ковшовые турбины могут различаться по расположению вала (вертикальные и горизонтальные), по числу сопел и рабочих колес на одном валу.

Ковшовые турбины, диаметр рабочего колеса которых достигает 7,5 м, используются в диапазоне напоров 300-2000 м и имеют мощность до 200 МВт. КПД таких турбин составляет 88-91 % .

### Реактивные гидротурбины

Реактивные гидротурбины получили на ГЭС наибольшее распространение вследствие ряда достоинств. Они имеют высокий КПД, обладают относительно большим числом оборотов, могут использоваться для широкой шкалы напоров и мощностей, их конструкция хорошо komponуется со зданием ГЭС.

Конструкция реактивной гидротурбины (рис. 3.2.5) включает в себя:

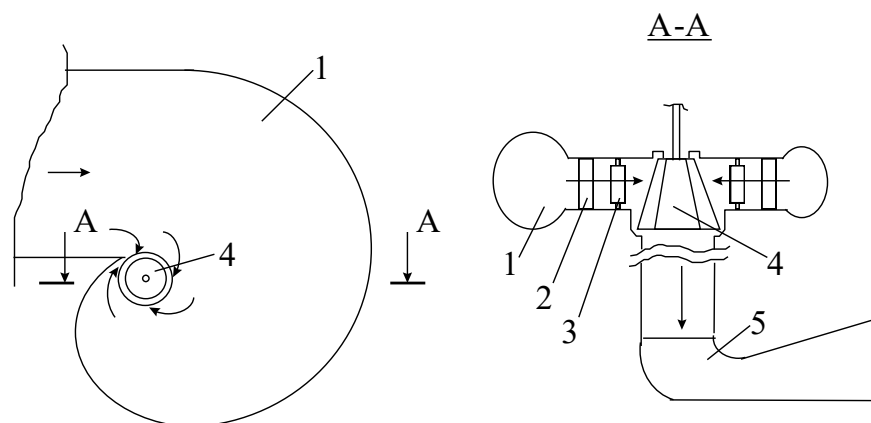


Рис. 3.2.5. Схема реактивной гидротурбины

турбинную (спиральную) камеру 1, статор 2, направляющий аппарат 3, рабо-

чье колесо 4 и отсасывающую трубу 5. Характерные особенности каждой из систем реактивных турбин заключаются, в основном, в особенностях конструкции их рабочих колес.

Турбинная камера. Вода из верхнего бьефа поступает в турбинную камеру по трубопроводу. В ней происходит формирование осесимметричного потока воды, который затем проходит через направляющий аппарат турбины. При такой форме потока обеспечивается его равномерное распределение по окружности рабочего колеса и более эффективный отбор мощности. Вода, поступающая на рабочее колесо с любого направления, имеет равную скорость и начальную вихревую закрутку. Чаще всего турбинная камера выполняется в виде спирали и имеет название спиральной камеры. При напорах менее 40 м спирали выполняются бетонными таврового сечения. При более высоких напорах – металлическими (сварными или литыми) круглого сечения.

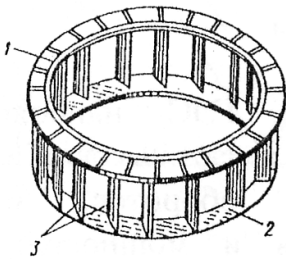


Рис. 3.2.6. Статор турбины:  
1, 2 - верхнее и нижнее кольца статора; 3 - колонны

Статор турбины (рис. 3.2.6) служит для передачи нагрузки от вращающихся частей агрегата, осевого усилия воды и конструкций здания электростанции над спиралью на фундамент ГЭС. Обычно статор выполняется в виде двух колец специальной формы, между которыми установлены металлические колонны. Число колонн, их расположение и форма определяются условиями необходимой прочности и обтекания.

Направляющий аппарат служит для подвода воды к рабочему колесу,

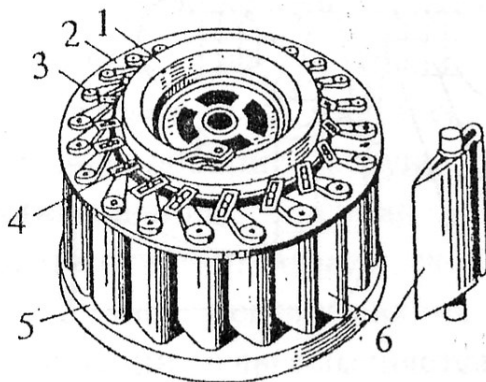


Рис. 3.2.7. Направляющий аппарат: 1 - регулирующее кольцо; 2, 5 - верхнее и нижнее кольца направляющего аппарата; 3 - рычаги; 4 - серьги; 6 - лопатки

регулирования расхода в соответствии с необходимой для генератора мощностью, закрытия доступа воды к рабочему колесу турбины при ее остановке и создания определенного направления (закрутки) потока. Конструкция направляющего аппарата (рис 3.2.7) состоит, в основном, из двух опорных колец и подвижных лопаток обтекаемой формы, размещенных между этими кольцами. Лопатки с помощью регулирующего кольца могут одновременно поворачиваться вокруг собственных осей на определенный угол, образуя одинаковые



просветы величиной  $a_0$ , называемые открытием направляющего аппарата. Число подвижных лопаток зависит от размеров турбины и колеблется от 12 до 32.

Рабочее колесо. На рабочем колесе происходит непосредственное преобразование энергии движущейся воды в механическую энергию вращения колеса. Для реактивных турбин характерны следующие признаки: 1) рабочее колесо располагается полностью в воде. Поток воды отдает энергию одновременно всем лопастям рабочего колеса; 2) перед рабочим колесом только часть энергии воды находится в кинетической форме. Остальная же часть энергии - в потенциальной форме, соответствующей, в основном, разности давлений до и после колеса. Избыточное давление и разность уровней потока на входе и выходе из рабочего колеса приводят к увеличению его относительной скорости и тем самым к созданию реактивного давления потока на лопасти турбины. Изменение направления потока за счет кривизны лопастей приводит к возникновению активного давления потока; 3) действие потока на лопасти рабочего колеса складывается из реактивного воздействия, возникающего из-за увеличения относительной скорости, и активного давления, возникающего из-за изменения направления потока.

Рассмотрим конструктивные особенности рабочих колес реактивных турбин различных систем.

Для конструкции радиально-осевых турбин (РО) (рис. 3.2.8) характерно то, что вода при входе на рабочее колесо движется в радиальной плоскости, а после рабочего колеса - в осевом направлении. Рабочее колесо состоит из 9-21 лопастей сложной пространственной формы, неподвижно соединенных с верхним и нижним ободами. Радиально-осевые турбины используются при напорах от 30 до 600 м.

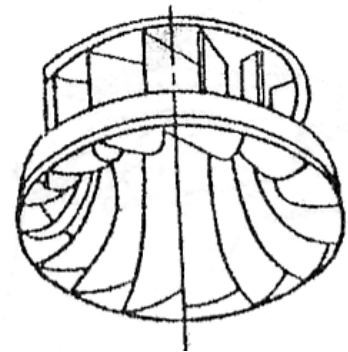


Рис. 3.2.8. Рабочее колесо радиально-осевой турбины

Рабочие колеса осевых турбин (пропеллерные (Пр), поворотнo-лопастные (ПЛ), двухперовые (рис. 3.2.9) располагаются в камере ниже направляющего аппарата. На лопасти поток поступает только в осевом направлении, из-за чего данные турбины получили название осевых. Рабочее колесо состоит из втулки с обтекателем и рабочих лопастей. Форма их похожа на форму гребного винта. Отличия осевых турбин заключаются, в основном, в отличии формы лопастей. В поворотнo-лопастных турбинах, кроме того, с целью поддержания высоких значений КПД в широком диапазоне изменения мощности нагрузки лопасти

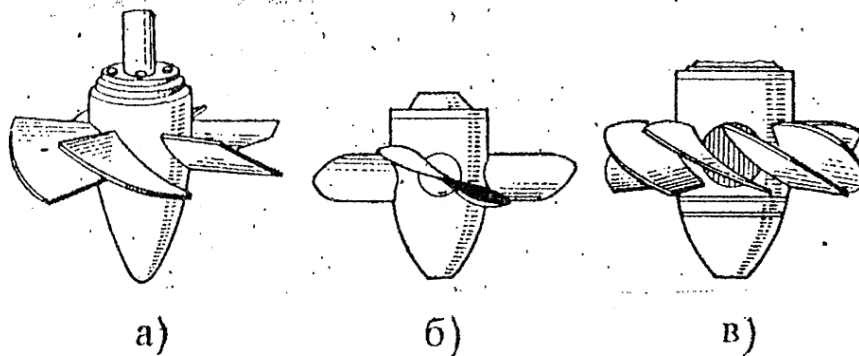


Рис. 3.2.9. Рабочие колеса осевых турбин: а - пропеллерной; б - поворотной-лопастной; в - двухперовой

в процессе работы могут с помощью специальных механизмов поворачиваться вокруг своих осей. Осевые турбины применяются при напорах до 80 м.

Диагональные турбины разработаны сравнительно недавно. Их КПД на 1,5-2 % выше, чем у осевых. Рабочее колесо (рис. 3.2.10) состоит из конусообразного корпуса с консольно прикрепленными к нему поворотными лопастями. Угол наклона оси поворота лопастей к вертикали находится в пределах

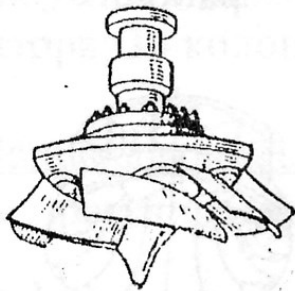


Рис. 3.2.10. Рабочее колесо диагональной турбины

от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  и с увеличением напора уменьшается. Внутри корпуса рабочего колеса располагается механизм разворота лопастей. Вследствие наклонного расположения осей поворотных лопастей к оси турбины ее проточный тракт получается как бы спрямленным по сравнению с обычной вертикальной машиной. Диагональные турбины применяются при напорах от 40 до 220 м.

Отсасывающая труба предназначена для отвода воды из рабочего колеса турбины в нижний бьеф, а также для повышения КПД гидротурбины за счёт более полного использования энергии водного потока. Для турбин кинетическая энергия потока за рабочим колесом составляет от 1,5 до 50 % ее входной величины. При отсутствии отсасывающей трубы эта энергия теряется и общий КПД турбины, особенно быстроходной, мал.

Найдем напор на агрегате  $H_{\text{агр}}$ , т.е. удельную энергию потока воды, отданную агрегату, при наличии отсасывающей трубы (рис. 3.2.11). Гидродинамический напор на входе и выходе агрегата с учетом уравнения Бернулли можно представить

$$H_{\text{вх}} = z_{\text{вх}} + \frac{p_{\text{вх}}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\text{вх}}^2}{2g} = z_{\text{вб}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} + 0, \quad (3.2.4)$$

$$H_{\text{вых}} = z_{\text{вых}} + \frac{p_{\text{вых}}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{\text{вых}}^2}{2g} = z_{\text{нб}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} + \frac{v_0^2}{2g}. \quad (3.2.5)$$

Здесь  $v_0$  - скорость потока на выходе из отсасывающей трубы; индексы "вх" и "вых" указывают на соответствие параметров потока воды входу и выходу агрегата.

С учетом (3.2.4) и (3.2.5) напор на агрегате

$$H_{\text{агр}} = H_{\text{вх}} - H_{\text{вых}} = z_{\text{вб}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} - z_{\text{нб}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} - \frac{v_0^2}{2g} = H_{\text{гэс}} - \frac{v_0^2}{2g}. \quad (3.2.6)$$

Из (3.2.6) следует, что при наличии отводящей трубы отданная потоком энергия не зависит от положения агрегата. Данное свойство очень существенно при проектировании компоновки ГЭС.

Для уменьшения потерь напора в (3.2.6) вследствие потери кинетической энергии выходящего из трубы потока (характеризуется в (3.2.6) членом  $v_0^2/2g$ ) отсасывающую трубу выполняют в виде расходящегося рупора. В соответствии с первым основным уравнением гидродинамики

$$v_0 = v_{\text{вых}} \cdot \omega_{\text{вых}} / \omega_0, \quad (3.2.7)$$

где  $\omega_{\text{вых}}$  и  $\omega_0$  - площади сечений трубы

на выходе агрегата и выходе отсасывающей трубы соответственно. Для расширяющейся отсасывающей трубы  $\omega_0 \geq \omega_{\text{вых}}$ ,  $v_0 \leq v_{\text{вых}}$  и в соответствии с (3.2.6) напор на агрегате больше, чем с трубой равного сечения.

Обычно для ГЭС с разницей уровней верхнего и нижнего бьефов до 25 м  $v_0 \leq 2-5$  м/с и  $v_0^2/2g \approx 0,2-0,8$  м. Поскольку величина  $v_0^2/2g$  существенно меньше разности  $z_{\text{вб}} - z_{\text{нб}}$ , то в расчетах полагают

$$H_{\text{агр}} \cong H_{\text{гэс}} \cong z_{\text{вб}} - z_{\text{нб}}. \quad (3.2.8)$$

Как уже отмечалось выше, напор на агрегате с отсасывающей трубой не зависит от положения агрегата. Однако уровень его поднятия ограничен явлением *кавитации*, которое заключается в закипании воды в области пониженных давлений (0,06-0,24 м водного столба) и последующей конденсацией паров в области более высокого давления с возникновением гидравлического удара.

Величина давления в трубе под агрегатом находится из (3.2.5):

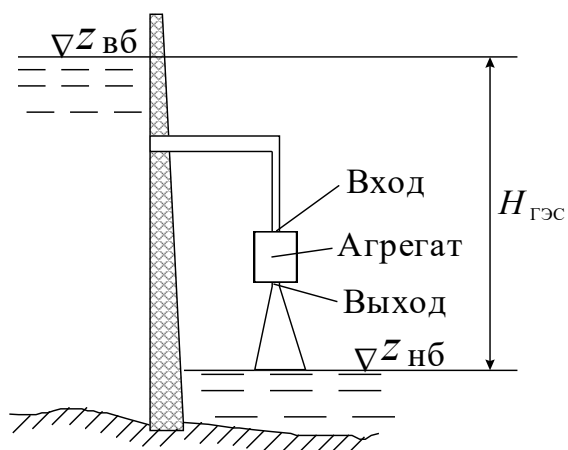


Рис. 2.22. Схема ГЭС для расчета эффективности отсасывающей трубы

$$\frac{p_{\text{ВЫХ}}}{\rho \cdot g} = \frac{p_{\text{АТМ}}}{\rho \cdot g} - (z_{\text{ВЫХ}} - z_{\text{НБ}}) - \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2 - v_0^2}{2g} = B - H_s - \sigma \cdot H_{\text{ГЭС}}. \quad (3.2.9)$$

Здесь  $B \equiv p_{\text{АТМ}}/(\rho \cdot g)$  – атмосферное давление в метрах водного столба;  $H_s \equiv z_{\text{ВЫХ}} - z_{\text{НБ}}$  – высота отсасывания;  $\sigma \cdot H_{\text{ГЭС}} \equiv (v_{\text{ВЫХ}}^2 - v_0^2)/2g$  – динамическое разрежение,  $\sigma$  – коэффициент кавитации.

Понятие о коэффициенте кавитации было предложено Д. Томмом в 1924 г. По сути дела, коэффициент кавитации является коэффициентом пропорциональности между напором на ГЭС и разностью скоростных напоров на входе и выходе отсасывающей трубы. Данная пропорциональность объясняется тем, что, как известно из гидравлики, квадрат скорости истечения из трубы пропорционален напору потока жидкости в трубе:

$$v^2 = k \cdot 2g \cdot H, \quad (3.2.10)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности для данной конструкции трубы и определенного режима истечения жидкости.

С учетом (3.2.7) и (3.2.10)

$$\begin{aligned} \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2 - v_0^2}{2g} &= \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2/v_0^2 - 1}{2g} \cdot v_0^2 = \frac{\omega_0^2/\omega_{\text{ВЫХ}}^2 - 1}{2g} \cdot k \cdot 2g \cdot H_{\text{ГЭС}} = \\ &= k(\omega_0^2/\omega_{\text{ВЫХ}}^2 - 1) \cdot H_{\text{ГЭС}} = \sigma \cdot H_{\text{ГЭС}}, \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

где  $\sigma = k(\omega_0^2/\omega_{\text{ВЫХ}}^2 - 1)$  является величиной постоянной для конкретной проточной части ГЭС и определенного режима работы гидроагрегата. Коэффициент кавитации определяется экспериментально при испытаниях моделей турбин.

Для того, чтобы не возникало явление кавитации, необходимо, чтобы давление на выходе агрегата было больше давления насыщенных паров воды  $p_{\text{ПАР}}$ . С учетом (3.2.9) для безкавитационного режима работы агрегата допустимая высота отсасывания  $H_s$  должна определяться из условия:

$$H_s \leq B - p_{\text{ПАР}}/\rho g - \sigma \cdot H_{\text{ГЭС}}. \quad (3.2.12)$$

При температуре воды  $25^\circ \text{C}$   $p_{\text{ПАР}} = 33 \text{ кПа} = 3300 \text{ Н/м}^2$  и, соответственно,  $p_{\text{ПАР}}/\rho g = 0,3 \text{ м}$ . Для нормального атмосферного давления  $p_{\text{АТМ}} = 101 \text{ кПа} = 101000 \text{ Н/м}^2$   $B = 10,3 \text{ м}$ . Тогда выражение (3.2.12) в данных климатических условиях можно представить в виде

$$H_s \leq 10 - \sigma \cdot H_{\text{ГЭС}}. \quad (3.2.13)$$

Эта формула широко используется при выборе допустимого значения высоты отсасывания.

Найдем аналогично напор на агрегате при отсутствии отсасывающей трубы, учитывая, что  $p_{\text{ВЫХ}} = p_{\text{АТМ}}$ , а  $z_{\text{ВЫХ}} = z_{\text{НБ}} + H_s$ :

$$\begin{aligned} H_{\text{агр}} = H_{\text{ВХ}} - H_{\text{ВЫХ}} &= z_{\text{ВБ}} + \frac{p_{\text{АТМ}}}{\rho \cdot g} - z_{\text{НБ}} - H_s - \frac{p_{\text{АТМ}}}{\rho \cdot g} - \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2}{2g} = \\ &= H_{\text{ГЭС}} - H_s - \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2}{2g}. \end{aligned} \quad (3.2.14)$$

Видно, что напор на агрегате без отсасывающей трубы меньше напора на агрегате с отсасывающей трубой на величину  $H_s + (v_{\text{ВЫХ}}^2 - v_0^2)/2g$ , т.е. на сумму величин поднятия агрегата над уровнем нижнего бьефа и динамического разрежения.

Для отсасывающей трубы применяется понятие КПД, которое определяется как отношение динамического разрежения, создаваемого отсасывающей трубой, к скоростному напору за рабочим колесом:

$$\eta_{\text{от}} = \left( \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2 - v_0^2}{2g} - h_{\text{П}} \right) / \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2}{2g}, \quad (3.2.15)$$

где  $h_{\text{П}}$  – гидравлические потери в отсасывающей трубе. Данный КПД характеризует увеличение используемого турбиной напора за счет эффекта динамического разрежения для расширяющейся трубы.

У крупных вертикальных турбин в целях уменьшения заглубления машинного здания применяют изогнутые отсасывающие трубы (рис. 3.2.5), которые состоят из конического расходящегося патрубка, кольца и горизонтального раструба.