

Тема 3. Устройство и функционирование современной ГЭС.

Общие положения.

Гидроэлектрические станции — это высокоэффективные источники электроэнергии. В большинстве случаев гидроэлектростанции представляют собой объекты комплексного назначения, обеспечивающие нужды электроэнергетики и других отраслей народного хозяйства: мелиорации земель, водного транспорта, водоснабжения, рыбного хозяйства и пр.

Гидроэлектрическая станция — это комплекс сооружений и оборудования, посредством которых энергия водотока преобразуется в электрическую энергию. ГЭС состоит из гидротехнических сооружений, обеспечивающих необходимую концентрацию потока воды и создание сосредоточенного напора, и энергетического оборудования, преобразующего энергию движущейся под напором воды в электрическую энергию.

По напору ГЭС делятся на высоконапорные (более 80 м), средненапорные (от 25 до 80 м) и низконапорные (до 25 м).

Принято называть совокупность гидротехнических сооружений, энергетическое и механическое оборудование гидроэнергетической установкой (ГЭУ).

Различают следующие основные типы гидроэнергетических установок:

- гидроэлектростанции (ГЭС);
- насосные станции (НС);
- гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС);
- приливные электростанции (ПЭС).

Как уже отмечалось, ГЭС — это предприятие, на котором гидравлическая энергия водотока преобразуется в электрическую.

Основными сооружениями ГЭС на равнинной реке являются *плотина*, создающая водохранилище и сосредоточенный перепад уровней, т.е. напор, и *здание*. ГЭС, в котором размещаются гидравлические турбины, генераторы, электрическое и механическое оборудование. В случае необходимости

строятся водосбросные и судоходные сооружения, рыбопропускные сооружения и т.п.

Общий вид ГЭС приплотинного типа представлен на рис. 3.1

Вода под действием силы тяжести по водоводам движется из верхнего бьефа в нижний, вращая рабочее колесо турбины. Гидравлическая турбина соединена валом с ротором электрического генератора. Турбина и генератор вместе образуют гидрогенератор. В турбине гидравлическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения на валу агрегата, а генератор преобразует эту энергию в электрическую. Возможно создание на реках каскадов ГЭС.

Гидроэлектростанции как источник электрической энергии имеют существенные преимущества перед тепловыми и атомными электростанциями. Они лучше приспособлены для автоматизации и требуют меньшего количества эксплуатационного персонала. Показательные следующие средние значения удельной численности персонала станций различного вида на 1 млн кВт установленной мощности: для ГЭС — 300, для ТЭС — 1400, для АЭС — 1800 чел. Но это только на самой станции, а еще нужно добавить трудозатраты на добычу и транспортировку топлива, в итоге требуемая удельная численность персонала на 1 млн кВт для ТЭС (АЭС) в среднем составляет 2500 чел.

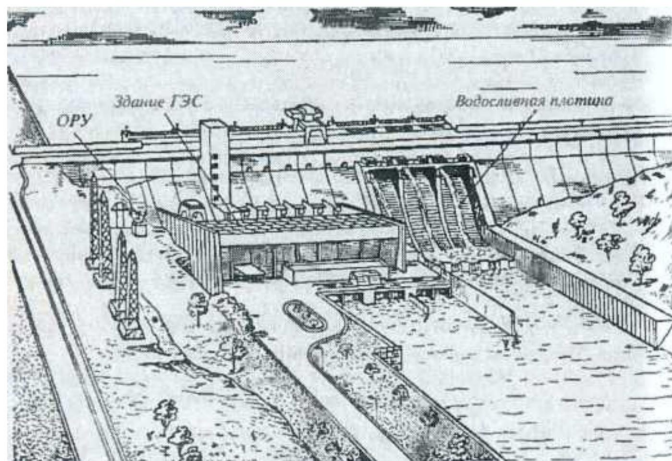


Рис. 3.1. Общий вид ГЭС приплотинного типа

Малые ГЭС. В настоящее время в мире и России большой интерес вызывает возможность создания малых ГЭС (мощностью до 30 МВт). Они могут создаваться в короткие сроки с использованием унифицированных гидроагрегатов и строительных конструкций с высоким уровнем автоматизации систем управления. Экономическая эффективность их использования существенно возрастает при комплексном использовании малых водохранилищ (восстановления объема водохранилища, рыбоводство, водозаборы для систем орошения и водоснабжения и т.п.).

Насосная станция предназначена для перекачки воды с низких леток на высокие и транспортировки воды в удаленные пункты. На насосной станции устанавливаются насосные агрегаты, состоящие из насоса и двигателя. Насосная станция является потребителем электроэнергии.

Они используются для водоснабжения тепловых и атомных станций, коммунально-бытового и промышленного водоснабжения, в ирригационных системах, судоходных каналах и т.п.

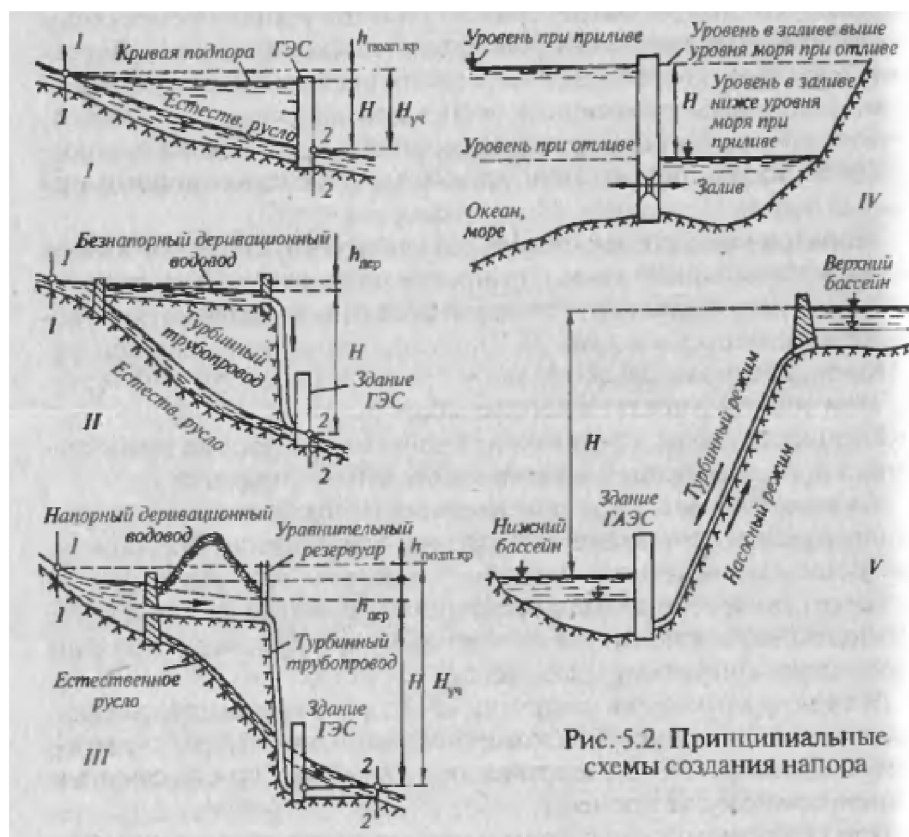


Рис. 5.2. Принципиальные схемы создания напора

Гидроаккумулирующая электростанция предназначена для перераспределения во времени энергии и мощности в энергосистеме. В часы

пониженных нагрузок ГАЭС работает как насосная станция. За счет потребляемой энергии она перекачивает воду из нижнего бьефа в верхний и создает запасы гидроэнергии за счет повышения уровня верхнего бьефа.

В часы максимальной нагрузки ГАЭС работает как гидроэлектростанция. Вода из верхнего бьефа пропускается через турбины в нижний бьеф и ГАЭС вырабатывает и выдает электроэнергию в энергосистему. В процессе работы ГАЭС потребляет дешевую электроэнергию, а выдает более дорогую в период пика нагрузки (за счет разности тарифов). Заполняя провалы нагрузки в энергосистеме, позволяет работать агрегатам атомных и тепловых станций в наиболее экономичном и безопасном режиме, резко снижая при этом удельный расход топлива на производство 1 кВт · ч электроэнергии в энергосистеме.

Работа ГАЭС показана на рис. 3.2, схема V.

Приливные электростанции сооружаются на побережье морей и океанов со значительными приливно-отливными колебаниями уровня воды. Для этого естественный залив отделяется от моря плотиной и зданием ПЭС. При приливе уровень моря будет выше уровня воды в отделенном от него заливе, а при отливе, наоборот, ниже уровня воды в заливе (см. рис. 3.2, схема IV). Перепады этих уровней создают напор, который используется при работе гидротурбин ПЭС.

В некоторых морских заливах приливы достигают 10 – 12 м, а наибольшие приливы наблюдаются в заливе Фанди (Канада) и достигают 19,6 м.

Технические ресурсы приливной энергии России оцениваются в 200 – 250 млрд кВт·ч в год и в основном сосредоточены у побережья Охотского, Берингова и Белого морей.

Схемы создания напора и основное оборудование ГЭС

Наиболее эффективное использование энергии водотока возможно при концентрации перепадов уровней воды на относительно коротком участке. Для использования падения уровней рек, распределенных по значительной

длине водотока, прибегают к искусственному сосредоточению перепада, что может быть осуществлено различными способами.

Различают три основные схемы:

- плотинная, при которой напор создается плотиной;
- деривационная, где напор создается преимущественно с помощью деривации (отведения, отклонения), выполняемой в виде канала, туннеля или трубопровода;
- комбинированная, в которой напор создается плотиной и деривацией.

Плотинная схема (см. рис. 3,2, схема I) предусматривает создание подпора уровня водотока путем сооружения плотины. Образующееся при этом водохранилище может использоваться в качестве регулирующей емкости, позволяющей периодически накапливать запасы воды и более полно использовать энергию водотока.

В гидроузлах, осуществленных по плотинной схеме создания напора различают русловые и приплотинные здания станций.

ГЭС с русловым зданием характеризуется тем, что ее здание входит в состав водоподпорных сооружений и воспринимает давление воды со стороны верхнего бьефа. Конструкция здания в этом случае должна удовлетворять всем требованиям устойчивости и прочности, предъявляемым к плотинам. Размеры здания, в частности его высота, определяются напором, поэтому ГЭС с русловыми зданиями строятся при сравнительно небольших напорах — до 30 – 40 м.

ГЭС с приплотинным зданием характеризуется тем, что ее здание располагается за плотиной (см. рис. 3.1) и не воспринимает давления воды. На крупных современных гидроэлектростанциях такого типа напор достигает до 300 м.

Деривационная схема (см. рис. 3.2, схемы II и III) позволяет получить сосредоточенный перепад путем отвода воды из естественного русла по искусственному водоводу, имеющему меньший продольный уклон.

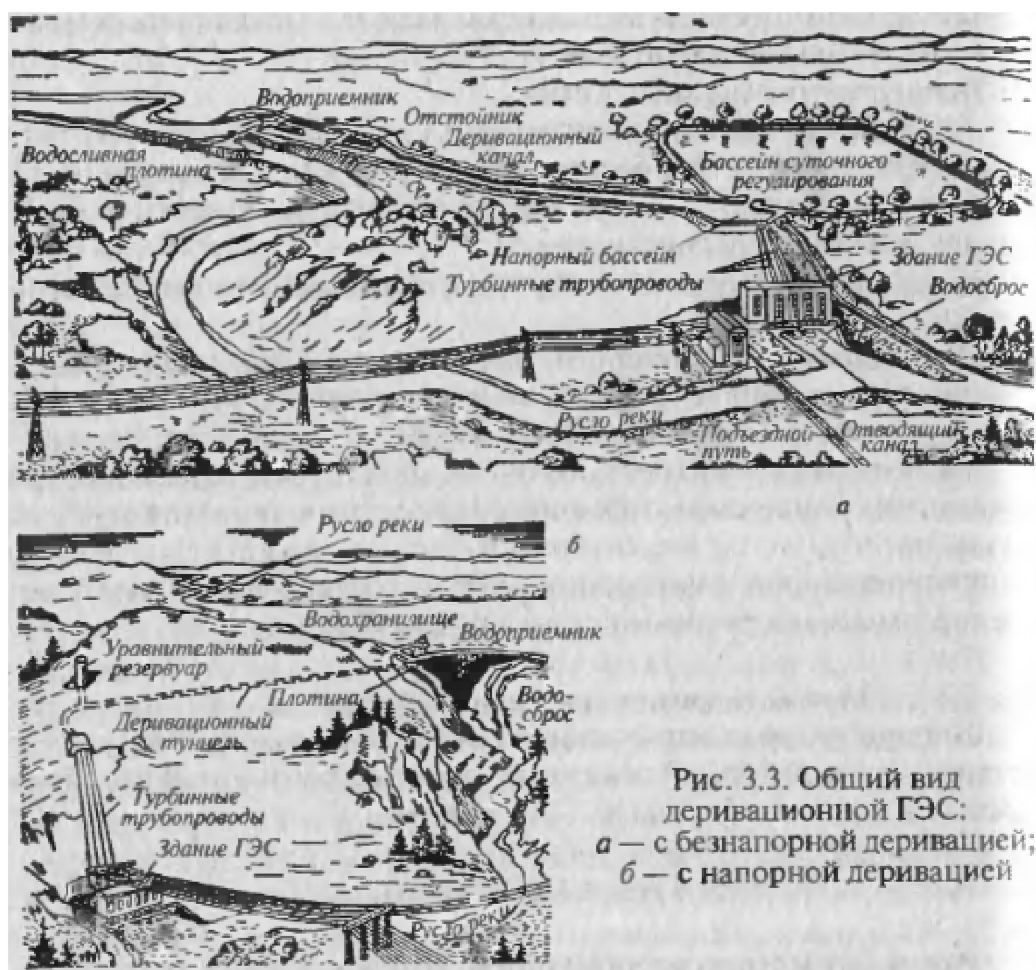
Благодаря этому уровень воды в конце водовода оказывается выше уровня воды в реке; эта разность уровней является напором гидроэлектростанции. В зависимости от типа искусственных водоводов (деривации) различают ГЭС с напорной и с безнапорной деривацией. При безнапорной деривации отвод воды из реки осуществляется безнапорными водоводами, например открытым каналом (рис. 3.3, а). Для забора воды в деривационный канал в русле реки возводится невысокая плотина, создающая водохранилище. Вода в канал поступает через водоприемник. Плотина, водоприемник, а в ряде случаев и другие сооружения (водосброс, отстойник и др.) образуют так называемый головной узел деривационной гидроэлектростанции. Деривационный канал заканчивается напорным бассейном, из которого вода по трубопроводам подается к турбинам в здание станции. Прошедшая через турбины вода отводится обратно в русло реки по отводящему каналу. Напорный бассейн, трубопроводы, здание станции и другие сооружения, примыкающие к ним, образуют станционный узел, который в зависимости от длины деривации может находиться на значительном удалении от головного узла.

На рис. 3.3, б показан общий вид ГЭС с напорной деривацией в виде напорного туннеля. В ряде случаев для защиты деривационных напорных водоводов от перегрузок избыточным внутренним давлением может потребоваться строительство специального сооружения – уравнительного резервуара.

Создание или увеличение сосредоточенного перепада уровней воды можно осуществить также посредством отводящего деривационного водовода, продольный уклон которого меньше уклона естественного русла. В этом случае здание ГЭС располагается в глубокой выемке или под землей в удалении от нижнего сечения используемого участка водотока.

Сооружение деривационных ГЭС оказывается целесообразным в горных условиях при больших уклонах рек и относительно малых расходах воды; тогда при небольшой протяженности и малой высоте сечения

деривационного водовода можно получить большой напор (до 1000 м и более) и соответственно большую мощность.



Комбинированная схема (см. рис. 3.2, схема III) предусматривает создание напора посредством использования напора как плотины, так и деривационных сооружений.

На всех гидроэлектростанциях, осуществленных по любой из указанных выше схем, механическая энергия движущихся масс воды преобразуется в электрическую с помощью гидротурбин и гидрогенераторов, размещенных вместе с многочисленным вспомогательным оборудованием в зданиях станции.

Напоры гидроэлектрических станций

Напоры гидроэлектрических станций определяются в соответствии с типами ГЭС. Разность отметок верхнего и нижнего бьефов называется статическим напором, м

$$H_{\text{ст}} = \nabla \text{ВБ} - \nabla \text{НБ}$$

Разность удельных энергий потока в сечении 1 – 1 верхнего бьефа до входа в энергетические водоводы и в сечении 2 – 2, расположенном в нижнем бьефе за отсасывающими трубами гидротурбин, называется напором брутто, м (рис. 3.4).

$$H_{\text{бр}} = H_{\text{ст}} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$$

Разность напора брутто и гидравлических потерь в подводящем и отводящем водоводах $h_{\text{пот}}$ (по длине и местные) называется напором нетто, м:

$$H_{\text{н}} = H_{\text{ст}} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - h_{\text{пот}}$$

Поскольку разность кинетических энергий обычно невелика, в большинстве случаев для практических расчетов напор, используемый турбинами ГЭС, м, принимается равным

$$H = H_{\text{ст}} - h_{\text{пот}}$$

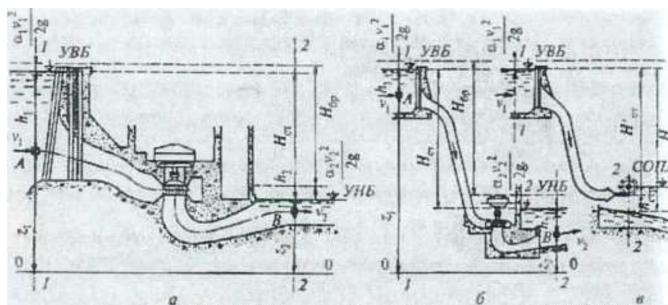


Рис. 3.4. Схемы определения напоров ГЭС: а — русловая ГЭС; б — деривационная ГЭС; в — ГЭС с ковшовыми турбинами

Потери напора $h_{\text{пот}}$ обычно составляют 2 – 5% $H_{\text{ст}}$.

При использовании на ГЭС активных ковшовых гидротурбин с выпуском воды из сопла в атмосферу имеется еще дополнительная потеря

напора $h_{стр}$ (см. рис. 3,4, в), равная разности отметок оси струи и уровня нижнего бьефа. Напор турбин в этом случае определится выражением

$$H = H_{ст} - h_{стр} - h_{пот}$$

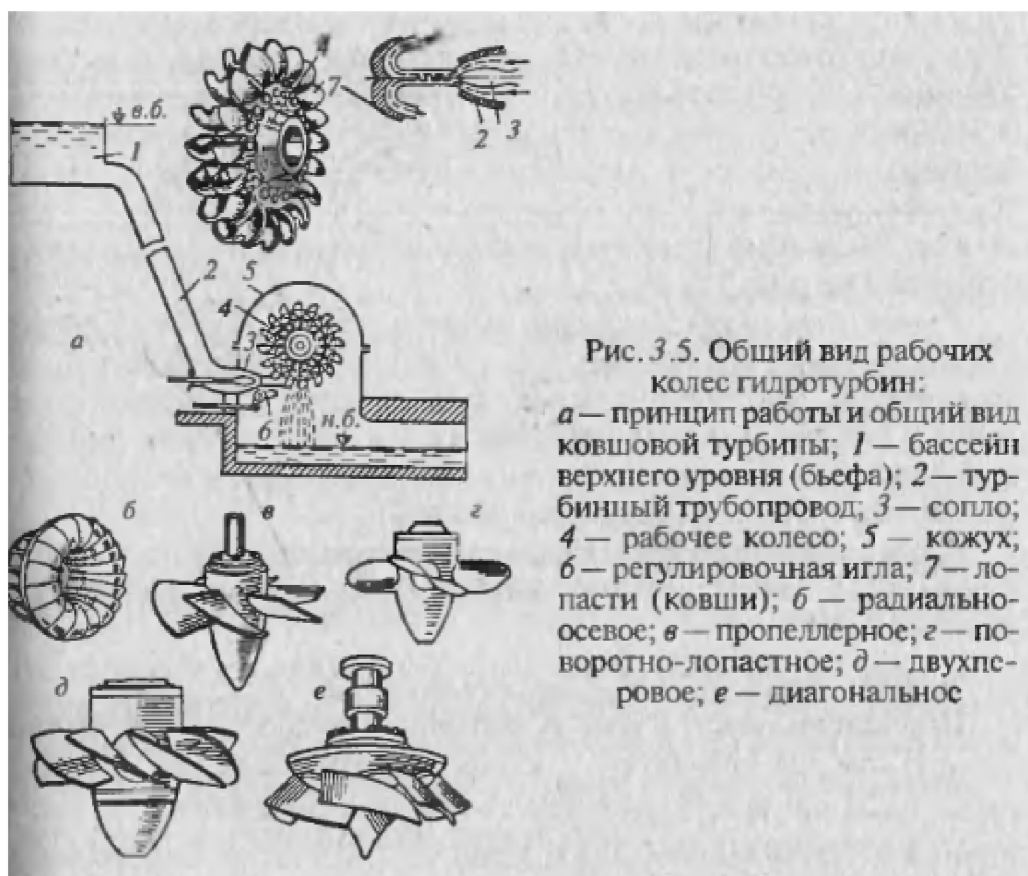
Гидротурбины

Основным энергетическим оборудованием ГЭС являются гидротурбины и генераторы.

Гидравлической турбиной называется машина, преобразующая энергию движения воды в механическую энергию вращения ее рабочего колеса. Гидротурбины разделяют на два класса: активные и реактивные. Турбина называется активной, если используется только кинетическая энергия потока, и реактивной, если используется и потенциальная энергия при реактивном эффекте.

Наиболее распространенными активными гидротурбинами являются ковшовые (рис. 3.5, а).

В ковшовой активной турбине потенциальная энергия гидростатического давления в суживающейся насадке — сопле — полностью превращается в кинетическую энергию движения воды. Рабочее колесо турбины выполнено в виде диска, по окружности которого расположены ковшеобразные лопасти 7 (рис. 3,5, а)



Вода, огибая поверхности лопастей, меняет направление движения. При этом возникают центробежные силы, действующие на поверхности лопастей, и энергия движения воды преобразуется в энергию вращения колеса турбины.

Если скорость движения воды, вытекающей из турбины, равна нулю, то вся кинетическая энергия воды, не считая потерь, превращается в механическую энергию турбины.

Внутри сопла расположена регулирующая игла *б* (рис. 3,5, *а*) перемещением которой меняется выходное сечение сопла, а следовательно, и расход воды.

В реактивной гидравлической турбине на лопастях рабочего колеса преобразуется как кинетическая, так и потенциальная энергия воды в механическую энергию турбины. Вода, поступающая на рабочее колесо турбины, обладает избыточным давлением, которое по мере протекания воды по проточному тракту рабочего колеса уменьшается. При этом вода оказывает реактивное давление на лопасти турбины и слагающая

потенциальной энергии воды Превращается в механическую энергию рабочего колеса турбины.

За счет кривизны лопастей изменяется направление потока воды, при котором, как и в активной турбине, кинетическая энергия воды в результате действия центробежных сил превращается в механическую энергию турбины. Рабочее колесо реактивной турбины в отличие от активной полностью находится в воде, т.е. поток воды поступает одновременно на все лопасти рабочего колеса. Различные конструкции рабочих колес реактивных турбин показаны на рис. 3.5, б—е,

У радиально-осевых турбин лопасти рабочего колеса имеют сложную кривизну, поэтому вода, поступающая с направляющего аппарата, постепенно меняет направление с радиального на осевое. Такие турбины используют в широком диапазоне напоров от 30 до 600 м. В настоящее время созданы уникальные радиально-осевые турбины мощностью 700 МВт.

Пропеллерные турбины обладают простой конструкцией и высоким КПД, однако у них с изменением нагрузки КПД резко уменьшается.

У поворотных лопастных гидротурбин в отличие от пропеллерных лопасти рабочего колеса поворачиваются при изменении режима работы для поддержания высокого значения КПД.

Двухперовые турбины имеют спаренные рабочие лопасти, что позволяет повысить расход воды. Широкое применение их ограничено конструктивными сложностями. Сложная конструкция свойственна также диагональным турбинам, у которых рабочие лопасти поворачиваются относительно своих осей.

На электрических станциях турбина и генератор связаны общим валом. Частоты их вращения не могут выбираться произвольно. Они зависят от числа пар полюсов ротора генератора и частоты переменного тока, которая должна соответствовать стандартной. Кроме того, необходимо учитывать, что при небольших частотах вращения турбины получаются громоздкими и дорогими. Чтобы получить скорости агрегатов, близкие к оптимальным, при

больших напорах используют турбины с малыми значениями коэффициента быстроходности, а при небольших напорах – с большими значениями этого коэффициента.

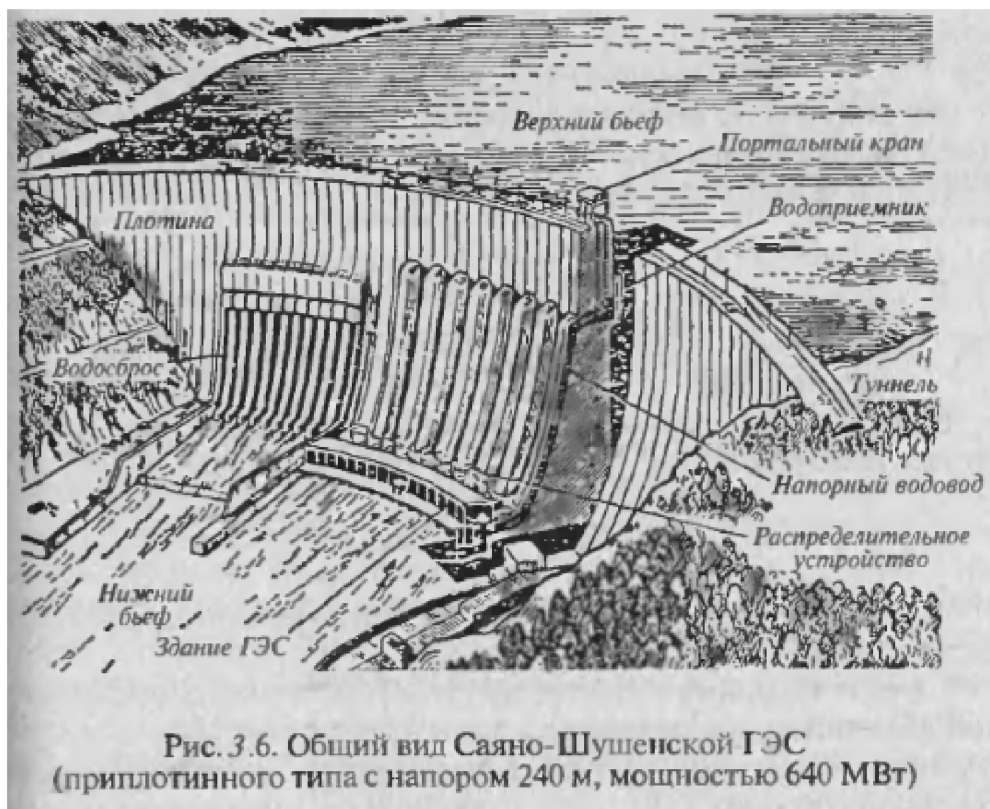
Разнообразие природных условий, в которых сооружаются ГЭС, определяет разнообразие конструктивного исполнения турбин. Мощности турбин изменяются от нескольких киловатт до 640 МВт, а частота вращения — от $16^{2/3}$ до 1500 мин⁻¹.

В последнее время стали применяться горизонтальные агрегаты (капсульные), в которых генератор заключен в герметичную капсулу, обтекаемую водой. КПД таких агрегатов выше (95 – 96 %) благодаря лучшим гидравлическим условиям обтекания.

При сооружении ГЭС обычно решают комплекс народнохозяйственных задач, в который помимо выработки электрической энергии входят регулирование стока воды и улучшение судоходства реки, создание орошаемых массивов, развитие энергоемких производств, использующих местное сырье, и т.д.

В настоящее время на равнинных реках сооружают станции, напор которых достигает 100 м.

>■ ^ На рис. 5.6 показана Саяно-Шушенская ГЭС на р. Енисее, у которой высота плотины составляет 240 м и вода по водоводам поступает к 10 турбинам, вращающим электрические генераторы мощностью по 640 МВт каждый.



Энергия и мощность ГЭС

Энергия, используемая ГЭС, может быть определена путем замены $N_{\text{уч}}$ на напор H . Однако на ГЭС выработку энергии и мощность принято измерять на выводах гидрогенератора, поэтому энергия и мощность ГЭС будут определяться с учетом коэффициентов полезного действия гидротурбины и электрогенератора.

Мощность на валу гидротурбины (кВт) определяется как

$$N_T = 9,81 Q_T H \eta_T$$

где Q_T — расход воды через гидротурбину, $\text{м}^3/\text{с}$; H — напор турбины с учетом потерь; η_T — коэффициент полезного действия (КПД) турбины (у современных крупных гидротурбин = 0,93 – 0,96)

Электрическая мощность гидрогенератора

$$N_{\text{ген}} = N_T \eta_{\text{ген}}$$

Где $\eta_{\text{ген}}$ — КПД гидрогенератора, обычно равный 0,97.

Регулирование мощности агрегата ГЭС производится изменением расхода воды, проходящей через гидротурбину. Мощность ГЭС в i -й момент времени равна

$$N_{Гi} = 9,81 Q_{Гi} H_{Гi} \eta_{Гi}$$

где $Q_{Гi} H_{Гi} \eta_{Гi}$ – расход ГЭС, напор ГЭС и КПД ГЭС в i -й момент времени.

Выработка электроэнергии ГЭС (кВт·ч) за период времени $T(ч)$ определяется как

$$Э_{ГЭС} = \int_0^T N_{Гi} dt$$

В качестве расчетного периода T рассматриваются час, сутки, неделя, месяц, год.

Годовая выработка электроэнергии ГЭС не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от объема стока, поступившего в водохранилище, степени его регулирования и условий эксплуатации ГЭС. При годичном регулировании годовая выработка электроэнергии ГЭС, как правило, существенно колеблется – в основном за счет энергоотдачи в паводковый период.

При многолетнем регулировании неравномерность выработки электроэнергии по годам бывает незначительной.

Очевидно, что электрическая мощность, подведенная к потребителю, меньше мощности, производимой гидроэлектростанцией, $N_{ГЭС}$. Сумма всех потерь при передаче электрической мощности от ГЭС до потребителя и при многократных преобразованиях ее в повышающих и понижающих трансформаторах можно оценить при помощи КПД системы передачи и преобразований $\eta_{пер}$. Обычно $\eta_{пер}$ составляет 0,92 – 0.93.

Установленная мощность ГЭС $N_{уст}$ определяется как сумма номинальных (паспортных) мощностей установленных на ней генераторов. Она соответствует максимальной мощности, которую Может развить гидроэлектростанция.

Вопросы для самоконтроля.

1. Перечислите основные типы ГЭС.
2. Перечислите основные сооружения ГЭС на равнинной реке.

3. Как определяется напор ГЭС нетто и брутто?
4. Какие виды гидротурбин используются на ГЭС?
5. Как определяется мощность и энергия ГЭС за какой-нибудь период времени?