

## Гидроагрегаты

Студент гр. 10602219 Вадейко В.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Николаенко В.Л.

Белорусский Национальный Технический Университет

Минск, Беларусь

Гидроагрегат - агрегат, в состав которого входят гидротурбина и гидрогенератор.

Гидроагрегаты делят на горизонтальные осевые и вертикальные. В свою очередь горизонтальные осевые гидроагрегаты подразделяются на прямоточные и погруженные агрегаты. К погруженным гидроагрегатам относятся капсульные и шахтные агрегаты с верховым и низовым расположением генератора.

Гидрогенератор –это электрическая машина, используемая на гидроэлектростанции для выработки электроэнергии.

Обычно гидрогенератор представляет собой синхронную явно полюсную электрическую машину вертикального исполнения, которая приводится во вращение от гидротурбины. Однако существуют также гидрогенераторы горизонтального исполнения, к числу которых относятся капсульные гидрогенераторы).

Конструкция гидрогенератора в основном зависит от параметров гидротурбины, которые в свою очередь определяются природными условиями в районе строительства электростанции: напором и расходом воды. По этой причине каждая отдельная гидроэлектростанция обычно оснащена специально спроектированным для нее гидрогенератором.

В основном гидрогенераторы характеризуются малой частотой вращения ротора (до 500 об/мин) и достаточно большим диаметром (до 20 м), чем в первую очередь определяется вертикальная конструкция большинства гидрогенераторов, так как при горизонтальном исполнении обеспечение необходимой механической прочности и жесткости элементов конструкции гидрогенераторов становится крайне сложным.

Основными компонентами вертикальных гидрогенераторов являются:

- статор;
- ротор;
- верхняя и нижняя крестовины;

- подпятник, представляющий собой упорный подшипник, который воспринимает вертикальную нагрузку от вращающихся частей гидрогенератора и гидротурбины;

- направляющие подшипники.

Вращающиеся части гидроагрегата: вал, рабочее колесо и ротор генератора — имеют единую систему подшипников. Для нормального функционирования должно использоваться два вида подшипников: направляющие, препятствующие только радиальным перемещениям вращающихся частей, и подпятник, воспринимающий осевые нагрузки, которые в вертикальных гидроагрегатах определяются весом вращающихся частей и осевым гидродинамическим воздействием потока на рабочее колесо.

По особенностям конструкции гидрогенераторы подразделяются на подвесные и зонтичные.

У подвесных гидрогенераторов подпятник располагается над ротором в верхней крестовине, у зонтичных — под ротором в нижней крестовине или опирается на крышку турбины. В последнем случае нижняя крестовина у гидрогенератора отсутствует.

На гидроаккумулирующих электростанциях используются обратимые гидрогенераторы, так называемые гидрогенераторы-двигатели. Обратимые генераторы способны как вырабатывать электрическую энергию, так и потреблять ее. От обычных гидрогенераторов их отличает особая конструкция подпятника, которая позволяет ротору вращаться в противоположных направлениях.

Горизонтальные капсульные гидроагрегаты представляют собой часть герметичной капсулы, которая в свою очередь содержит, помимо гидрогенератора, гидротурбину и системы обеспечения. Капсула при этом помещается непосредственно в проточную часть гидроэлектростанции.

На практике применяются различные системы опирания вращающихся частей гидроагрегата.

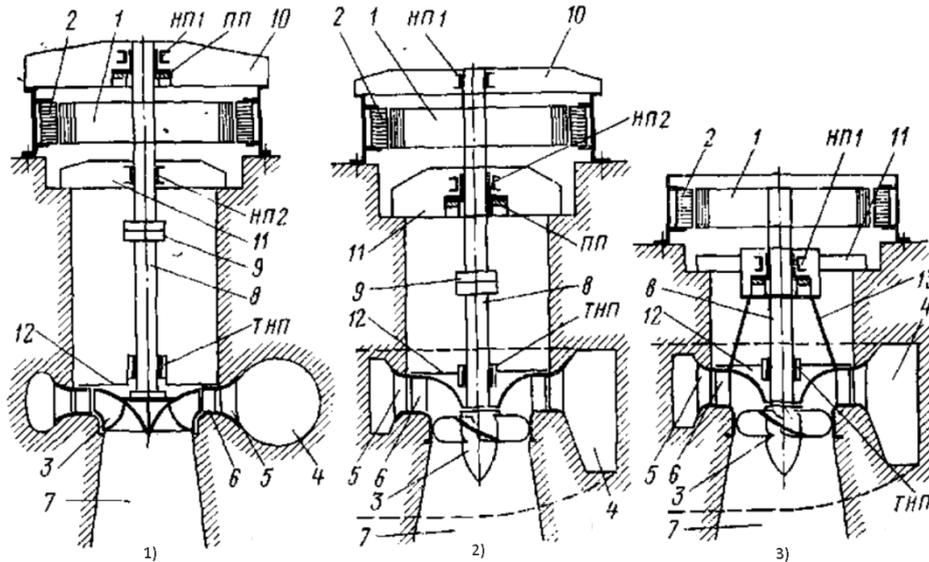


Рис.1 Принципиальные схемы гидроагрегатов

На рис. 1.1 изображена принципиальная схема подвешенного гидроагрегата, в котором подпятник (ПП) и верхний направляющий подшипник (НП1) опираются на мощную верхнюю крестовину (10), передающую нагрузку на корпус статора. Корпус генератора укреплен бетонной конструкцией. Второй направляющий подшипник (НП2) располагается в нижней крестовине (11), крепящейся к бетону. Третий турбинный направляющий подшипник (ТНП), закреплен на крышке турбины (12). На рис. 1.2 и 1.3 показаны принципиальные схемы гидроагрегатов с зонтичными генераторами, в которых подпятник (ПП) расположен под ротором генератора, при этом он опирается на мощную нижнюю крестовину (11) (рис. 1.2) или передает нагрузку на крышку турбины (12) через опорную конструкцию (13) (рис. 1.3).

Основываясь на рассмотренных примерах можно сделать вывод: несмотря на то, что гидроагрегат состоит из двух машин — турбины и генератора, обе эти машины имеют единую систему опор вращающихся частей. Это необходимо учитывать при рассмотрении конструкции турбин.

В погружных или капсульных агрегатах наибольшее распространение получили горизонтальные осевые турбины. Генератор в таких гидроагрегатах располагается в замкнутой стальной капсуле, обтекаемой водой.

На длине всего тракта поток воды имеет минимальные повороты, а также прямоосное движение без поворота в отсасывающей трубе. Последнее свойство особенно важно, поскольку приводит к снижению

гидравлических потерь и увеличению коэффициента полезного действия (КПД) турбины, что наиболее хорошо выражается при больших расходах воды. В результате горизонтальные турбины развивают на 20 – 35% большую мощность, чем вертикальные турбины того же диаметра.

Конструкцию капсульного агрегата рассмотрим на примере гидроагрегата, установленного на Саратовской гидроэлектростанции.

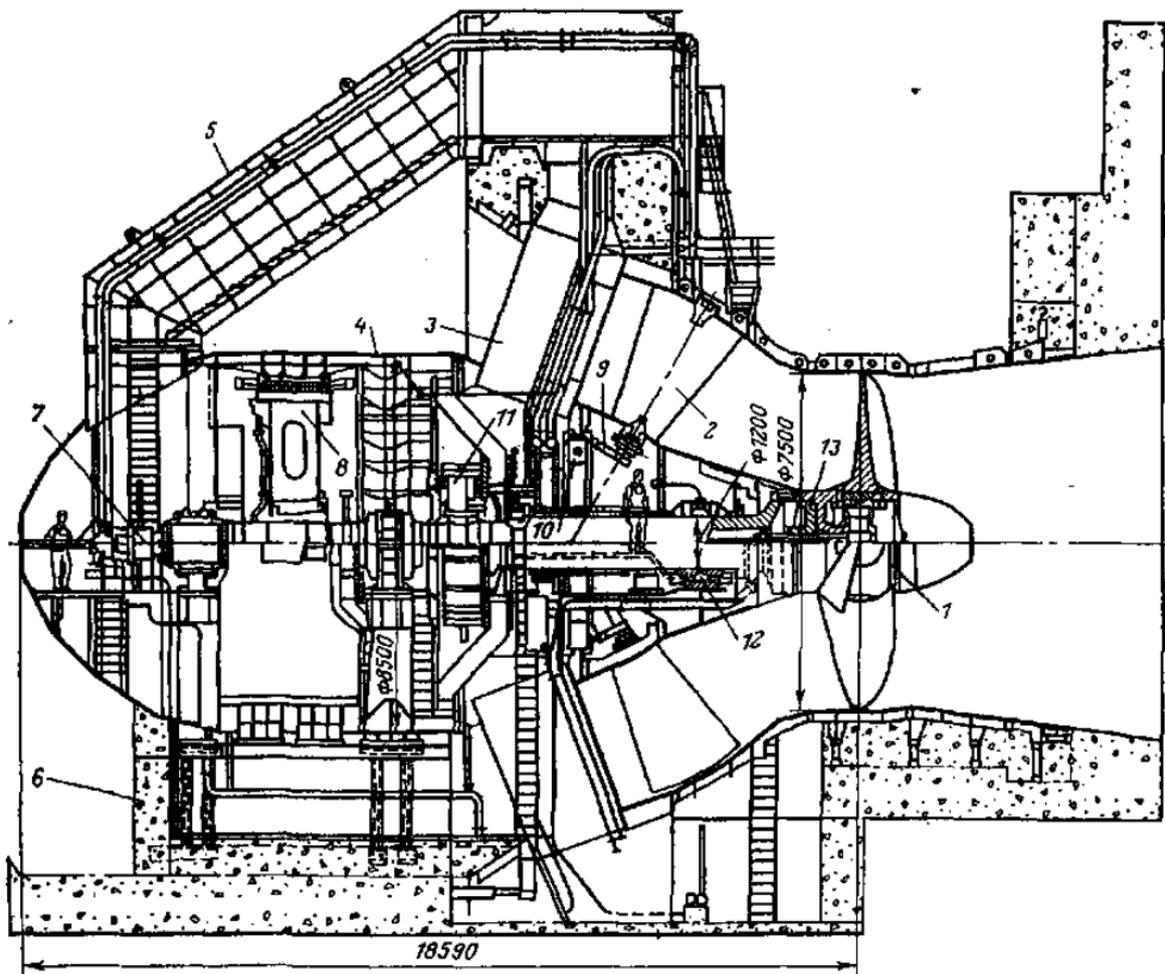


Рис.2 Общий вид капсульного гидроагрегата. Саратовская ГЭС

Основными элементами агрегата являются: рабочее колесо (1), конический направляющий аппарат (2), стальная капсула (4) с коммуникационной шахтой (5). Снизу капсула опирается на бетонную тумбу (6) и раскрепляется в бетон наклонными колоннами (3). Внутри капсулы располагаются генератор (8), опорная конструкция подшипника и подпятника (11), а также вспомогательные устройства. Масло к сервомотору рабочего колеса (13) подается посредством маслоприемника (7).

Отличительной чертой капсульных агрегатов может выступать применение конического направляющего аппарата, открытие лопаток которого определяется углом их установки. Поворот направляющих лопаток осуществляется с помощью рычагов и регулирующего кольца, расположенного внутри капсулы и перемещаемого двумя сервомоторами. Рычаги в свою очередь соединены с регулирующим кольцом посредством серег и шаровых шарниров.

Серьезной проблемой горизонтальных гидроагрегатов является обеспечение надежной работы подшипников, в особенности турбинного подшипника, на который приходится большая радиальная нагрузка. Данная нагрузка вызвана консольным размещением рабочего колеса. По этой причине при проектировании гидроагрегата необходимо по возможности приблизить центр тяжести рабочего колеса к подшипнику.

Также существуют капсульные агрегаты, в которых между валами турбины и генератора устанавливается мультипликатор – устройство, повышающее частоту вращения ротора генератора в 5-10 раз по отношению к турбине. Эта мера позволяет сделать генератор более компактным, что в свою очередь делает возможным уменьшение диаметра капсулы. Однако мультипликатор, представляющий собой шестеренчатую, соосную, планетарную передачу, является весьма сложным и дорогим элементом и используется при сравнительно небольшой мощности. Так, каскад гидроэлектростанций с напорами 4-5 м на р. Мозель (ФРГ) оборудован капсульными агрегатами мощностью по 3,5-4,6 МВт с турбинами диаметром  $D = 4,6 - 4,8$  м и мультипликаторами с частотой вращения 87/750-67/750 об/мин. Капсульный агрегат мощностью 400 кВт с турбиной  $D = 3,3$  м и мультипликатором установлен также в Мурманской области (РФ) на Кислогубской приливной ПЭС.

Особым видом гидроагрегата с горизонтальной турбиной является так называемый прямоточный агрегат.

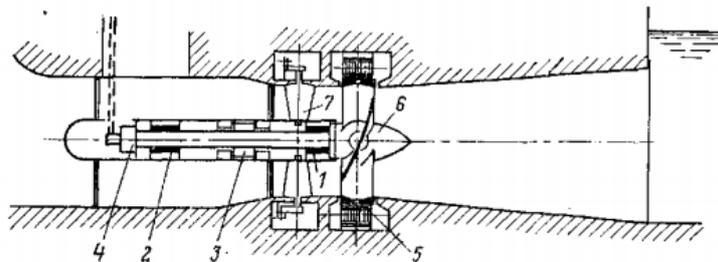


Рис.3 Горизонтальный осевой прямоточный агрегат

В данном виде агрегата в капсуле располагаются только подшипники (1) и (2), подпятник (3) и маслоприемник (4). Ротор генератора (5), насажен непосредственно на концы лопастей рабочего колеса (6) и вместе со статором располагается в кольцевой нише. Направляющий аппарат (7) является осевой. Конструкция прямоточного гидроагрегата получается чрезвычайно компактной. Однако из-за трудности передачи нагрузок от тяжелого ротора через лопасти, а также отсутствия надежной системы уплотнений, которая бы исключала попадание влаги на обмотки, применение прямоточных агрегатов довольно сложно.

Прямоточный лопастной гидроагрегат позволяет получать электроэнергию при прохождении рабочего потока через полый ротор генератора с закрепленными внутри лопастями. Количество, форма и крепление лопастей зависят от размера и назначения гидроагрегата, а также его мощности и напора воды.

Ротор вращается в подшипниковых узлах статора, его концы соединены с входным трубопроводом и отсасывающей трубой через муфты с подшипниками и сальниками, предотвращающими протечки. Осевое усилие потока на лопасти ротора компенсируется опорным подшипником, который закрепляется на выходном конце ротора в основании гидроагрегата. Площади сечения ротора и водоводов совпадают. Рабочий поток проходит прямо по тракту без изменения направления, ламинарно, что позволяет при одинаковых размерах получать большую мощность и предотвращать возникновение кавитации, ведущей к губчатому разрушению проточной части турбин.

Вес гидроагрегата значительно меньше веса других моделей, имеющих направляющий аппарат, турбину, генератор и вал с опорным подшипником. Ротор с жестко закрепленными внутри лопастями вращается в двух подшипниковых узлах генератора, что повышает виброустойчивость всей конструкции по сравнению с турбинами, закрепленными на одном конце рабочего вала гидрогенератора.

Таким образом гидроагрегат прямоточный лопастной относится к области гидромашиностроения и может быть использован для малых и средних ГЭС. По конструкции агрегат представляет собой электрогенератор с полым ротором, внутри которого под углом к оси вращения закреплены лопатки. Относительно малый вес и компактность данного типа агрегата делает его использование перспективным, при условии устранения существующих недостатков конструкции.

Одной из разновидностей турбин, входящих в состав вертикального гидроагрегата, является поворотно-лопастная гидротурбин. Использование поворотно-лопастных вертикальных гидротурбин, так называемых турбин Каплана, по объемам приходится на второе место в мировой практике после радиально-осевых гидротурбин. В этих турбинах лопасти выполняются поворотными, благодаря чему в зависимости от условий работы, а именно открытия и напора, угол их установки может меняться. Это позволяет получить более высокие энергетические показатели. Турбины такого типа установлены на каскаде Днепровских (Каховская, Днепродзержинская, Кременчугская), Волжских (Рыбинская, Горьковская, Волжская, Саратовская) и других гидроэлектростанций.

Наиболее мощными поворотно-лопастными турбинами оснащены ГЭС Сальто Гранде (Аргентина–Уругвай) – 138 МВт, Шамхорская ГЭС (Азербайджан) – 195 МВт, Шульбинская ГЭС (Казахстан) – 230 МВт, Днестровская ГЭС-1 (Украина) – 120 МВт. Турбинами производства ОАО «Силовые машины – ЛМЗ» оснащены Волгоградская и Волжская ГЭС – 115 МВт (РФ), Саратовская ГЭС – 60 МВт при расчетном напоре 9,7 м с самыми крупными турбинами, имеющими диаметр рабочего колеса 10,3 м (РФ).

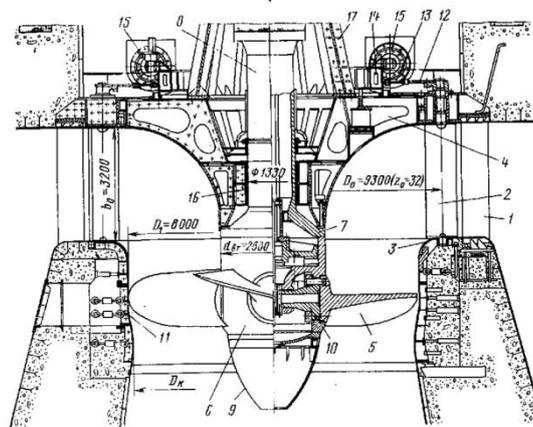


Рис.4 Разрез по поворотно-лопастной турбине Кременчугской ГЭС:  
 1 – колонны статора; 2 – направляющие лопатки; 3 – нижнее кольцо; 4 – крышка турбины; 5 – лопасти рабочего колеса; 6 – корпус рабочего колеса; 7 – фланец вала; 8 – вал; 9 – обтекатель рабочего колеса; 10 – камера рабочего колеса; 11 – выдвижной сегмент; 12 – рычаг направляющей лопатки; 13 – серьга; 14 – регулирующее кольцо; 15 – сервомоторы; 16 – подшипник; 17 – опорная конструкция подпятника генератора.

Конструкцию вертикальной поворотной-лопастной турбины рассмотрим на примере турбины Кременчугской ГЭС (рис. 4). Диапазон напоров данной гидроэлектростанции составляет 9,6–16,9 м, мощность 58 МВт, диаметр рабочего колеса  $D = 8,0$  м.

Подводящая часть турбины данного агрегата состоит из турбинной камеры, статора и направляющего аппарата. Статор турбины представляет собой ряд колонн (1) с вытянутой удобообтекаемой формой поперечного сечения. Главной функцией статора является принятие нагрузок, действующих между верхним и нижним железобетонными конусами турбинной камеры, которые вызваны весом конструкций и оборудования, а также давлением воды.

Колонны статора могут крепиться посредством анкеров в железобетон по отдельности или с целью большей жесткости и прочности объединяться стальными кольцевыми верхним и нижним поясами. Отдельные колонны применяются при сравнительно малых напорах и больших диаметрах, статор с поясами в свою очередь применяется при более высоких напорах. Обязательным условием использования поясов является изготовление турбинной камеры из стали или наличие у камеры стальной облицовки. Угол установки и профиль сечения колонн статора выбираются таким образом, чтобы потери при их обтекании потоком воды были минимальными. Исходя из этого условия в бетонных турбинных камерах в зоне фронтального подвода потока сечения искривлены больше, чем в зоне спирали. Одна статорная колонна, замыкающая спираль, так называемый зуб спирали, делается фасонной.

Направляющий аппарат представляет собой систему из направляющих лопаток (2), укрепленных в нижнем кольце (3) и в крышке турбины (4) с помощью осей (цапф), что делает возможным их поворот в пространстве.

Направляющий аппарат создает необходимое направление потока перед рабочим колесом. Также функцией этого аппарата является регулирование или же изменение пропускаемого турбиной расхода и развиваемой мощности. Это достигается при повороте всех направляющих лопаток, т. е. при изменении открытия турбины, которое в общем случае определяется как минимальное расстояние между двумя смежными лопатками. В положении полного закрытия доступ воды к турбине перекрывается за счет смыкания концов лопаток.

Очередной разновидностью турбины, нашедшей применение на гидроэлектростанциях с вертикальным типом агрегата, является радиально-осевая турбина. Устройство и конструкцию радиально-осевых турбин, другое название которых – «турбины Френсиса», можно рассмотреть на примере турбины Саяно-Шушенской ГЭС.

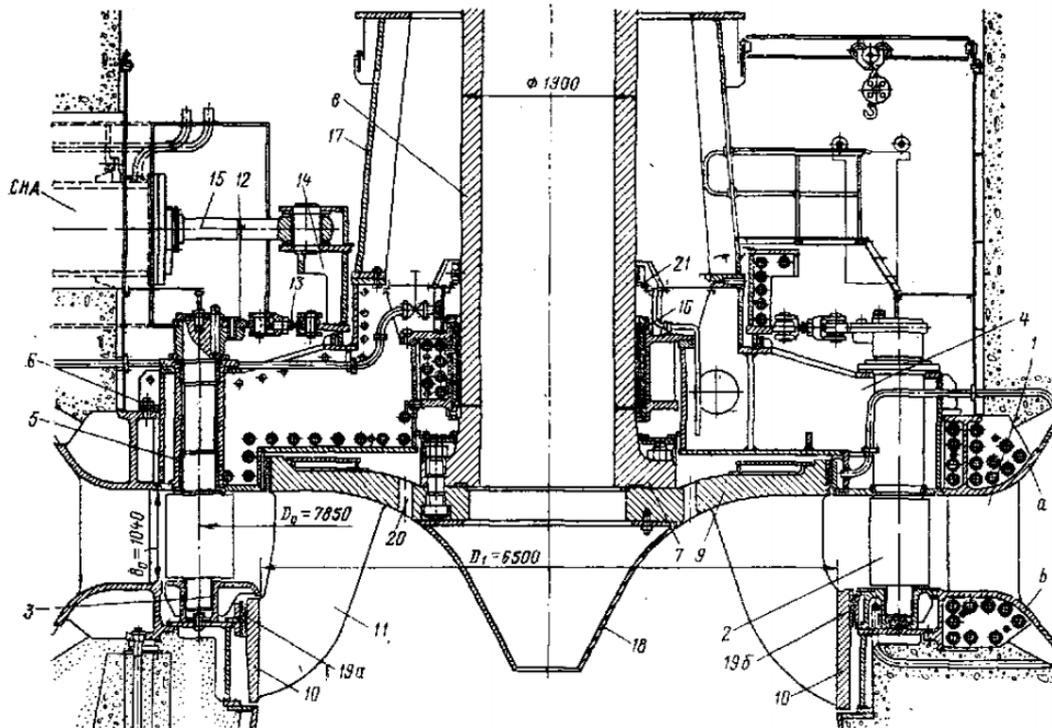


Рис. 5 Радиально-осевая турбина Саяно-Шушенской ГЭС

1 — колонны статора; а, б — верхний и нижний пояса статора; 2 — направляющие лопатки; 3 — нижнее кольцо направляющего аппарата; 4 — крышка турбины; 5 — стаканы опор верхней цапфы направляющих лопаток; 6 — крепление крышки к верхнему поясу статора; 7 — фланец вала; 8 — вал; 9, 10 — верхний и нижний ободы рабочего колеса; Л — лопасти рабочего колеса; 12 — рычаги; 13 — серьги; 14 — регулирующее кольцо; 15 — тяга сервомотора; 16 — подшипник; 17 — опора подпятника; 18 — обтекатель; 19(а), 19(б) — уплотнения обода рабочего колеса; 20 — разгрузочные отверстия; 21 — уплотнение камеры подшипника.

Параметры данной турбины: напоры 175—220 м, расчетная мощность – 650 МВт, при напоре 206 м и выше – 710 МВт, диаметр рабочего колеса  $D = 6,5$  м, частота вращения  $n = 136,4$  об/мин.

Подводящая часть радиально-осевой турбины имеет такую же конструкцию, как у других реактивных турбин. Она состоит из турбинной спиральной камеры со стальной облицовкой, колонн статора (1) с

мощными верхним и нижним стальными поясами (а), (б), к которым приварена облицовка турбинной спиральной камеры, и из направляющих лопаток (2), которые образуют направляющий аппарат турбины. В данном случае число направляющих лопаток – 24. Цапфы направляющих лопаток имеют опоры с втулками в кольце (3), которое в свою очередь укреплено на нижнем поясе статора (б), и в стаканах (5), укрепленных в крышке турбины (4). Крышка турбины крепится болтами (б) к верхнему поясу статора.

Включая зуб спиральной камеры, число колонн статора данной турбины равно числу направляющих лопаток и составляет – 24. Однако зачастую число колонн статора в 2 раза меньше.

Механизм привода и поворота лопаток направляющего аппарата состоит из рычагов (12), которые насаживаются на верхний конец цапф направляющих лопаток, серег (13) и регулирующего кольца (14). Изменение открытия направляющего аппарата осуществляется поворотом регулирующего кольца (14), который осуществляют два сервомотора (СНА), штоки которых (15) соединены с регулирующим кольцом.

Уплотнение направляющего аппарата обеспечивает минимум протечек при полном закрытии. Это достигается сокращением торцевых зазоров, плотным прилеганием лопаток, использованием резиновых или обработанных металлических уплотняющих прокладок, изготовленных из нержавеющей стали. При высоких напорах с целью уплотнения устанавливаются специальные резиновые трубчатые уплотнители, способные полностью перекрывать торцевые зазоры путем нагнетания в их полости сжатого воздуха.

Рабочее колесо (рис. 5) состоит из верхнего (9) и нижнего обода (10), лопастей (11). Пройдя направляющий аппарат, вода попадает на рабочее колесо турбины. Число лопастей рабочего колеса равно шестнадцати. В других турбинах данного вида оно составляет 14—19. Лопасти и составляют единую жесткую конструкцию. Верхним ободом рабочее колесо крепится к нижнему фланцу (7) вала (8), который в данном случае представляет собой толстостенную трубу наружным диаметром 1,9 м. К верхнему ободу крепится обтекатель (18), предназначенный для устранения вихревой зоны в потоке.

Особенностью радиально-осевой турбины является то, что она имеет существенное отличие по форме и конструкции рабочего колеса от осевых и диагональных поворотно-лопастных турбин: в частности, у радиально-

осевой турбины лопасти закреплены жестко и не могут изменять угол установки.

Как уже отмечалось, за характерный диаметр рабочего колеса, как и самой радиально-осевой турбины  $D_1$  принимается наибольший диаметр по входным кромкам рабочих лопастей. В данном случае на рис. 2  $D_1 = 6,5$  м.

При работе турбины в потоке перед рабочим колесом создается высокое давление, а за колесом низкое, в следствие чего часто возникает вакуум. Таким образом, при работе турбины часть воды может бесполезно протекать через зазоры между вращающимися и неподвижными элементами, что будет снижать ее КПД. С целью уменьшения протечек предусматриваются уплотнения рабочего колеса. На рис. 5 видны установленные на нижнем ободе щелевые уплотнения (19а) и (19б). На схеме представлены два различных варианта конструкции нижнего обода рабочего колеса и его уплотнения справа и слева соответственно. Работа уплотнений основывается на создании малого зазора между вращающейся и неподвижной деталями (1,5-2,5 мм). Иногда с целью повышения коэффициента сопротивления создаются также уширенные канавки (19а). При очень высоких напорах применяют лабиринтное уплотнение.

Уплотнения на верхнем ободе рабочего колеса необходимы при наличии разгрузочных отверстий. Эти отверстия, сообщая полость над верхним ободом рабочего колеса с областью пониженного давления под колесом, снижают гидродинамические нагрузки, которые создают осевые усилия, воспринимаемые в свою очередь подпятником. Рабочее колесо радиально-осевой турбины является цельным, неразъемным.

Крышка турбины (4) представляет собой мощную сварную конструкцию, способную воспринимать большие нагрузки от направляющих лопаток и регулирующего кольца, от давления воды, а также от опоры подпятника (17). На крышке крепится направляющий подшипник турбины (16) и устройства уплотнения (21).

В зависимости от природных условий места расположения гидроэлектростанций более выгодным становится использование того или иного типа гидроагрегата. В свою очередь каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Так, горизонтальный осевой прямоточный гидроагрегат обладает относительно простой комплектацией и небольшим весом всей конструкции. Однако данный тип агрегата является наиболее уязвимым для разрушения, в силу высоких радиальных нагрузок, из-за чего может

использоваться лишь при небольших напорах. Использование горизонтальных гидроагрегатов позволяет повысить КПД гидроэлектростанции, однако сложность обеспечения необходимой прочности и жесткости их элементов делает их менее выгодными по сравнению с гидроагрегатами вертикального исполнения.

Таким образом выбор гидроагрегата определяется набором факторов, обусловленных в основном природными особенностями местоположения гидроэлектростанции. Крупнейшие же гидроэлектростанции Беларуси низконапорные и оснащены горизонтальными капсульными гидроагрегатами (Витебская ГЭС) и агрегатами с горизонтальными поворотно-лопастными турбинами.

#### Литература

1. Гидроагрегат прямоточный лопастной [Информационный ресурс], Режим доступа: <https://poleznayamodel.ru/model/15/154299.html>, Дата доступа: 22.02.2021
2. Гидравлические машины: Турбины и насосы: учеб. для вузов. — М.: Энергия, 1978. — 320. ил.
3. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГЭС [Информационный ресурс], Режим доступа: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/gidravlichesкое-oborudovanie-ges-i-ego-montazh-4.html>, Дата доступа: 20.02.2021
4. Радиально-осевая турбина [Информационный ресурс], Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>, Дата доступа: 22.02.2021
5. Список гидроэлектростанций Белоруссии [Информационный ресурс], Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>, Дата доступа: 24.02.2021.

#### **Приливные электростанции**

Студент гр. 10602119 Бандюкевич А.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Николаенко В.Л.

Белорусский Национальный Технический Университет

Минск, Беларусь

Резкое наращивание цен на топливные ресурсы, проблемы, связанные с его получением, и его истощение – все эти видимые симптомы энергетического упадка вызывали в последнее время сильный