

## Конструкции узлов. Неподвижные детали.

### Общие сведения

Привод — это энергетическое устройство, приводящее в движение потребитель механической энергии. Он состоит из преобразователя энергии, передаточного механизма и аппаратуры управления. Если в качестве преобразователя энергии используется турбина, то привод называется *турбоприводом*. В судовой энергетической установке турбоприводами являются турбоагрегаты вспомогательного назначения.

По типу рабочего вещества судовые турбоприводы подразделяются на *паротурбоприводы* и *газотурбоприводы*, служащие приводами судовых электрогенераторов и различных насосов: питательных, грузовых, пожарных, циркуляционных, зачистных, балластных и др.

В настоящее время паротурбогенераторы (ПТГ) применяются в качестве источника электрической энергии на судах с разными типами энергетических установок. Вследствие высокой степени электрификации на современных судах установлены турбогенераторы относительно большой мощности. В зависимости от типа судна, типа и мощности его энергетической установки единичная мощность ПТГ современных судов находится в пределах 100—2000 кВт. ПТГ на турбоходах потребляет до 20% общей паропроизводительности главных паровых котлов.

На судах отечественной постройки установлены генераторы переменного тока с частотой вращения 1000 и 1500 об/мин, а на судах зарубежной постройки — 1800 и 3600 об/мин. Поэтому турбопривод к ним выполняют с *зубчатой передачей* (редуктором).

Для обеспечения высокой экономичности турбина ПТГ выполняется многоступенчатой, с развитой проточной частью. Турбина, зубчатая передача и электрогенератор, соединенные между собой муфтами, монтируются на общей фундаментной раме.

Применение питательных насосов с паротурбоприводом обусловлено большой потребной мощностью насоса, простотой конструкции, малыми массой и размерами турбопривода, необходимостью обеспечения высокой надежности агрегата, способностью паротурбопривода плавно менять частоту вращения. Паротурбоприводы грузовых насосов на танкерах применяются благодаря их малой массе и размерам при большой мощности.

Паротурбоприводы грузовых, балластных и зачистных насосов на дизельных танкерах работают на насыщенном или слабоперегретом паре вспомогательных котлов в основном следующих параметров: давление пара 1,0—1,5 МПа; температура 180—220 °С, давление отработавшего пара 0,04—0,15 МПа.

Паротурбоприводы насосов выполняют горизонтальными и вертикальными. При использовании вертикальных турбонасосов можно сократить длину машинного отделения.

Основными узлами каждой турбины являются ротор и статор. *Статор* образует все неподвижные части турбины, т. е. корпус и находящиеся в нем сопловые коробки, сопла первых ступеней, направляющие лопатки, диафрагмы, лабиринтовые уплотнения, опорные и упорные подшипники.

Главные турбозубчатые агрегаты выполняют многокорпусными, поэтому в этих агрегатах различают корпуса турбин высокого (ТВД), среднего (ТСД) и низкого давлений (ТНД).

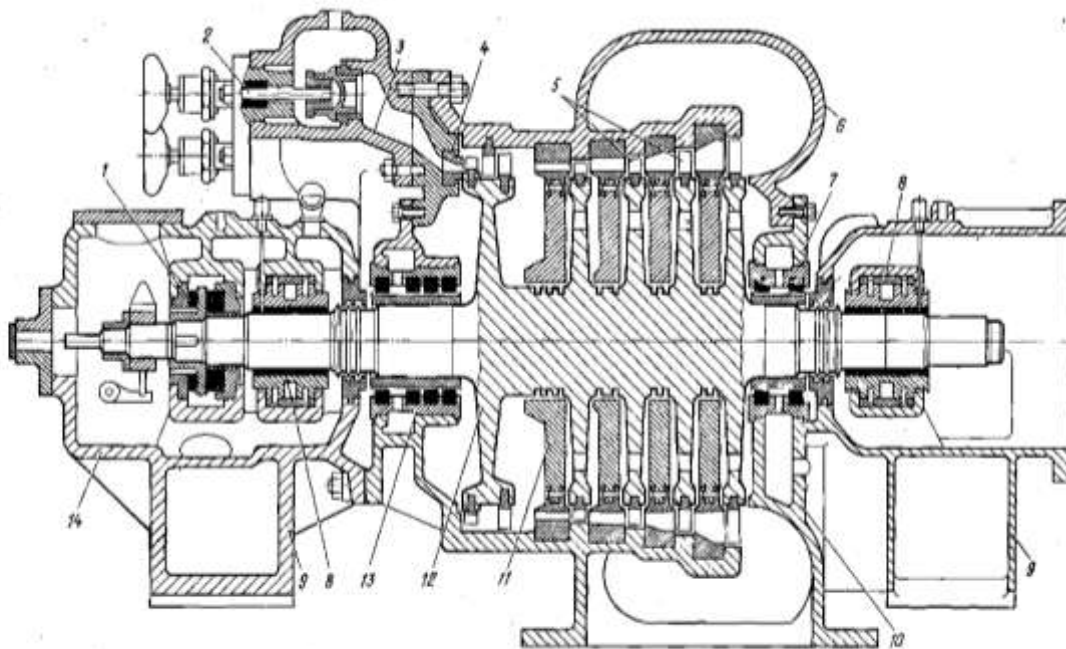


Рис. 13.1. Турбина паротурбогенератора

На рис. 13.1 показан продольный разрез типичной турбины утилизационного ПТГ. К основным деталям турбины относятся: нижняя 10 и верхняя 6 части корпуса, ротор 12, сегмент сопел 4, диафрагма с промежуточными соплами 11, рабочие лопатки 5, опорные 8 и упорный 1 подшипники, наружные уплотнения 13 и 7, корпуса подшипников 14 и их стулья 9, сопловая коробка 3, сопловой клапан 2.

### Корпус и сопловые коробки

**Корпус турбины.** Выполняется литым или сварным. В нем размещается большое количество патрубков фланцев и штуцеров для подвода и отвода пара, масла и удаления конденсата. Поэтому корпус имеет сложную конфигурацию.

Корпус горизонтальной турбины для удобства выемки и установки ротора всегда имеет горизонтальный разъем, разделяющий его на две половины: нижнюю — собственно корпус и верхнюю — крышку.

Крышка и нижняя половина корпуса снабжены толстыми горизонтальными фланцами, которые крепят болтами или шпильками, расположенными близко к стенкам корпуса, чтобы избежать или уменьшить изгибающие усилия во фланцах. Болты по всему корпусу выполняют одинакового размера, но частоту их установки (шаг) меняют в зависимости от давления пара в данном месте корпуса: в области высокого давления болты ставят как можно чаще. При таком расположении болтов места для нормальных гаек недостаточно, поэтому последние в этом случае изготавливают в виде колпаков (см. рис. 13.3), шестигранные головки которых сильно уменьшены. Это дает возможность затягивать гайки, расположенные вплотную одна от другой.

Горизонтальные фланцы обрабатывают путем точной и чистой фрезеровки. Между фланцами прокладки не ставят, чтобы не изменить радиальные зазоры при вскрытии турбины. Для достижения лучшей паронепроницаемости фланцы смазывают тонким слоем специальной мастики, рекомендованной заводом-изготовителем турбины.

При отсутствии такой рекомендации можно использовать мастику из смеси натуральной технической олифы или вареного льняного масла с любым из составов (80% по массе):

а) графит 25% и магнезит 75%; б) графит 40%, свинцовый сурик 40%, белила 20%; в) графит 40%, свинцовый сурик 60%. Составные части мастики до смешивания просеивают через мелкое сито. Смесь разводят проваренной олифой (или маслом) и размешивают до состояния густоты сливок; толщина слоя мастики должна быть 0,5—1 мм.

Затягивание болтов и шпилек горизонтального разъема следует проводить равномерно с обеих сторон корпуса; при этом затяжку гаек надо начинать со стороны наиболее неплотного прилегания фланцев. При правильном направлении и последовательности затягивания болтов с обеих сторон устраняется возможность деформации крышки.

Для обеспечения правильности положения крышки относительно корпуса фланцы разъемного соединения имеют от двух до восьми установочных болтов, которые вытачивают по развернутым во фланцах отверстиям. Каждое отверстие и пригнанный к нему болт маркируют. Для отрыва крышки от корпуса в крышке устанавливают от четырех до восьми отжимных болтов.

У главных турбин каждую половину изготавливают обычно из двух или нескольких частей, скрепляемых неразъемными вертикальными фланцевыми соединениями. Это делают для облегчения отливки и обработки корпуса, а также для возможности изготовления отдельных его частей из различного материала.

На нижней половине корпуса имеются по концам стулья, где расположены опорные и упорные подшипники. Стулья отливают или вместе с корпусом, или отдельно. Отдельные отлитые стулья крепят к корпусу на фланцах; это соединение может быть жестким или подвижным.

Подвижное соединение применяют при высокой температуре пара; при таком соединении корпус может свободно расширяться в радиальном направлении. Существует несколько типов конструкций подвижного соединения. Осевое расширение корпуса в процессе нагрева обычно у турбин старой постройки обеспечивается с помощью носового подвижного стула (см. рис. 13.1), в современных конструкциях с помощью гибкой опоры (см. рис. 13.3); благодаря упругой деформации вертикальной полки гибкой опоры стул может свободно перемещаться.

Корпус турбин при температуре пара до 230 °С изготавливается из чугуна, а при более высокой температуре — из стали. Чугунное литье при температуре выше 230°С применять нельзя вследствие «роста» чугуна. Материалом для отдельно отлитых стульев обычно служит чугун.

Все горячие части корпуса турбины покрывают изоляцией в виде асбестовой массы, соевитовых плит или алюминиевой фольги. Изоляция корпуса служит не только для уменьшения потери теплоты в окружающую среду, но и для уменьшения деформаций. Толстая изоляция способна аккумулировать большое количество теплоты, поэтому она задерживает прогрев и охлаждение корпуса. Изоляция покрывается декоративной обшивкой.

Корпус турбины во время работы испытывает сложные напряжения: от давления находящегося в нем пара; температурных расширений; вибраций, передающихся через опоры; изгиба направляющих лопаток и диафрагм, закрепленных в корпусе; собственного веса и веса ротора. Помимо действия внешних усилий, корпус испытывает значительные температурные напряжения, так как в современных турбинах разность температур пара при входе и выходе достигает 200—300°С

Поэтому в процессе эксплуатации, ревизии и ремонта необходимо тщательно наблюдать за деформацией корпуса и плотностью его фланцевого соединения.

Общее представление о конструктивных формах корпусов турбин дано на рис. 13.2 и 13.3. На рис. 13.2 показан корпус турбины с двумя ступенями скорости

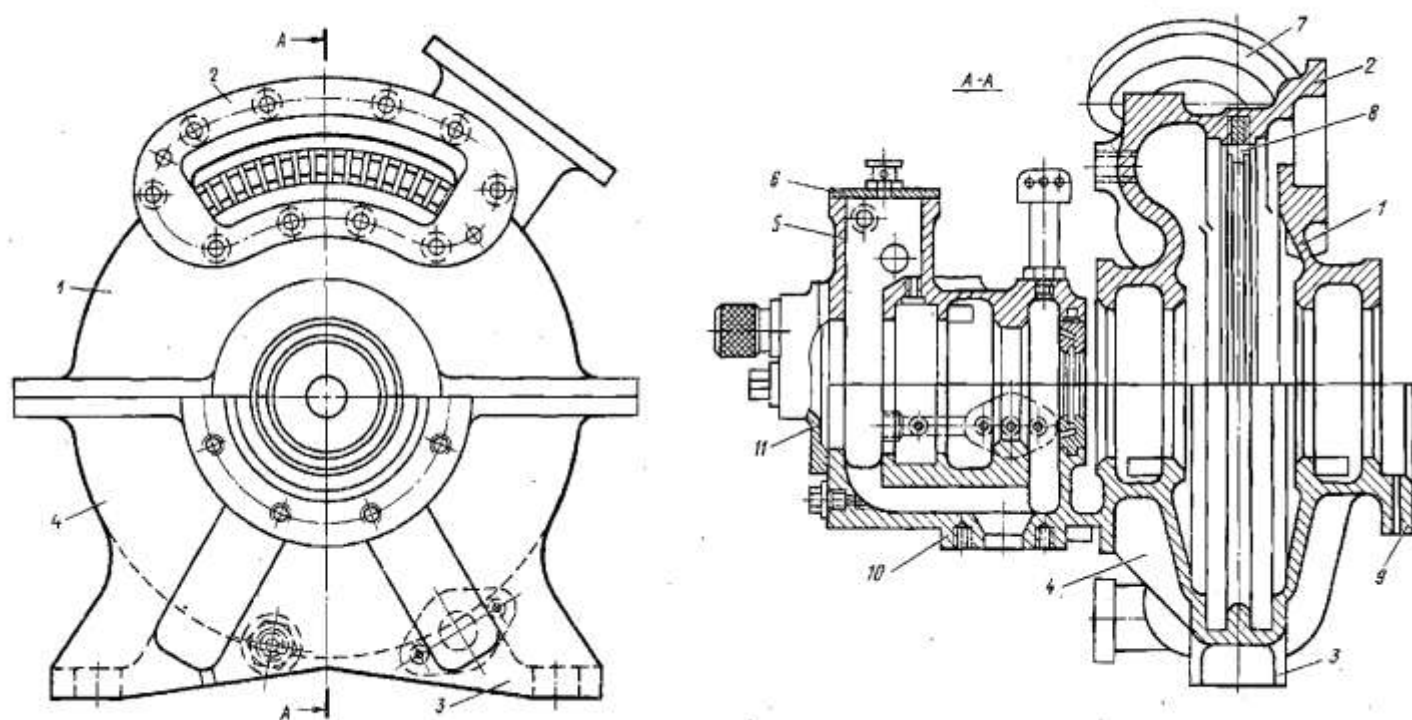


Рис. 13.2. Корпус двухвенточной турбины масляного насоса

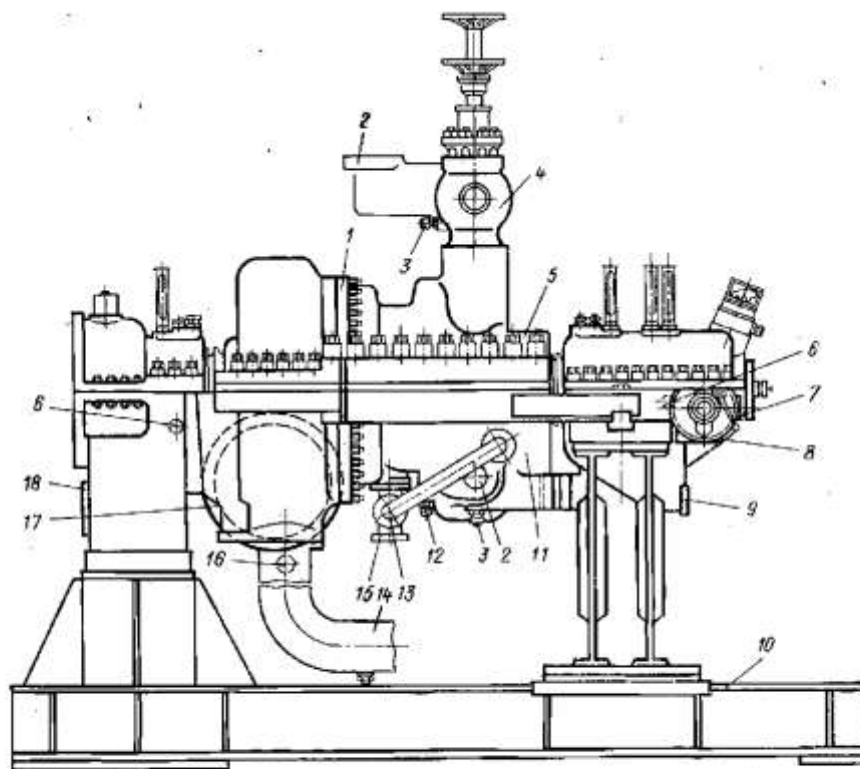


Рис. 13.3. Общий вид корпуса ТВД ГТЗА:

1 — фланец вертикального разъема; 2 — подвод пара к ТВД; 3 — штуцера для продувания сопловых коробок; 4 — клапанная коробка; 5 — верхняя половина корпуса; 6 — подвод масла к опорным и упорному подшипникам; 7 — отвод масла к масляному выключателю; 8 — подвод масла к регулятору безопасности; 9 — слив масла из носового стула; 10 — рама; 11 — нижняя половина корпуса; 12 — штуцер для прогрева камеры первой ступени; 13 — штуцера для продувания камер отбора пара; 14 — отвод пара в конденсатор при аварийном режиме; 15 — отбор пара давлением 0,72 МПа; 16 — отбор пара давлением 0,34 МПа; 17 — отвод пара к ТНД; 18 — слив масла из кормового стула

(двухвенечной турбины) масляного насоса. Литой стальной корпус имеет горизонтальный разъем и состоит из нижней половины (собственно корпуса) 4, верхней половины (крышки) 1, отлитого заодно корпуса опорно-упорного подшипника 10, крышки 5 подшипника, крышек 11 и 6. Совместно с верхней половиной корпуса отлиты сопловая камера 2, в которой закреплен сегмент направляющих лопаток 8, и выпускной патрубок 7. Правым полукруглым фланцем 9 корпус турбины соединяется и центрируется с корпусом редуктора, где располагаются вкладыши опорного подшипника. В нижней части корпуса отлита лапа 3 для крепления его к фундаментной раме.

Общий вид корпуса ТВД ГТЗА Ленинградского производственного объединения «Кировский завод» (ЛОКЗ) показан на рис. 13.3; продольный разрез этого корпуса можно видеть на рис. 16.5.

**Сопловая коробка.** Сопла первых ступеней устанавливаются или закрепляются к вставным сопловым парораспределительным коробкам, куда подводится свежий пар. Сопловая коробка крепится к корпусу турбины болтами 1 (рис. 13.4). Фиксация положения коробки осуществляется двумя установочными болтами. Внутри коробки, соответственно числу клапанов в трех расточках впрессованы седла 2 клапанов. Клапаны 4 закреплены на штоках 3. Конструкции сопловых коробок весьма разнообразны. Крепление коробок в корпусе турбины можно осуществить различно.

Показанная на рис. 13.4 сопловая коробка с ручным регулированием открытия сопловых клапанов турбогенератора крепится к верхней части корпуса турбины. Внутренняя полость коробки разделена двумя перегородками на камеры *a*, *b*, *c*, сообщающиеся с корпусом быстрозапорного клапана при помощи трех ручных сопловых клапанов. Камера *a* сообщается с двумя соплами, камеры *b* и *c* — с четырьмя соплами каждая. Для того чтобы свежий пар мог попасть к соплам турбины, необходимо открыть быстрозапорный клапан (на рис. 13.4 не показан) и также хотя бы один ручной (сопловой) клапан 4. При работе с полной нагрузкой достаточно открыть два клапана, пропускающие пар к шести соплам. При работе с половинной нагрузкой достаточно открыть один клапан, пропускающий пар к четырем соплам.

При работе с перегрузкой нужно открыть два клапана и дать доступ пара к восьми соплам. Наконец, при работе с пониженным давлением пара может выявиться необходимость в открытии всех трех клапанов, дающих доступ к десяти соплам.

Сопловая коробка с автоматическим регулированием открытия сопловых клапанов показана на рис. 13.5. Здесь сопловые клапаны 1 имеют общую траверсу 2. Требуемая последовательность открытия клапанов обеспечивается путем поддержания установленных заводом-изготовителем расстояний  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ , между

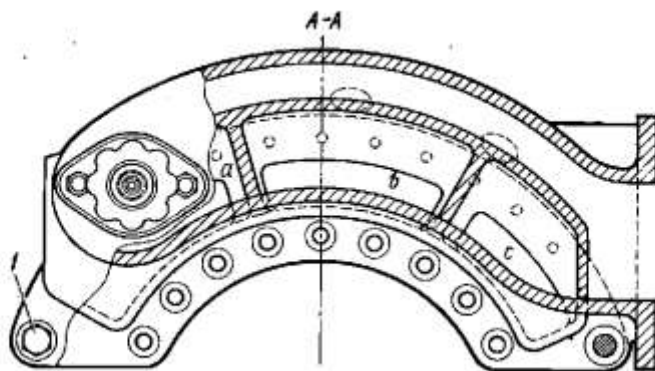
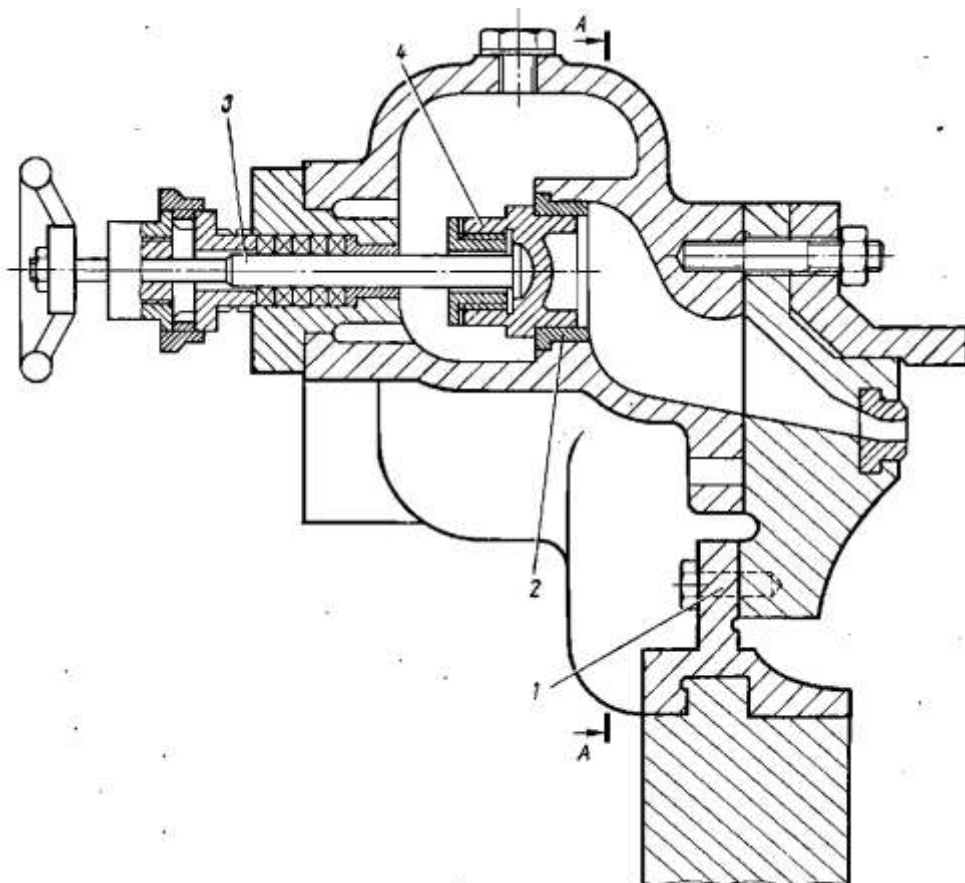


Рис. 13.4. Сопловая коробка турбины паротурбогенератора

верхней плоскостью траверсы и нижними торцами гаек 3, ограничивающих свободную длину штоков.

### § 13.3. Сопла и диафрагмы

**Общие сведения.** Сопла служат для преобразования потенциальной энергии пара в кинетическую и для направления парового потока на рабочие лопатки.

Сопла, применяемые в паровых турбинах, бывают расширяющимися и суживающимися. В суживающихся соплах площадь поперечного сечения плавно уменьшается по ходу пара, а в

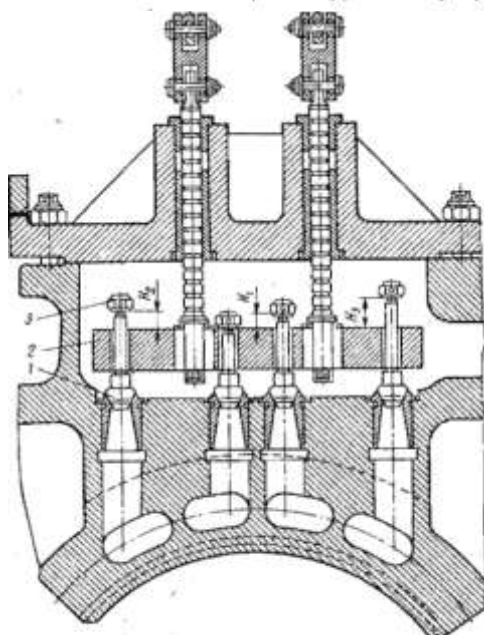


Рис. 13.5. Сопловая коробка турбогенератора ТД 750-1

расширяющихся — сначала плавно уменьшается, затем плавно увеличивается.

Суживающиеся сопла применяют в ступенях многоступенчатых турбин при дозвуковых и околозвуковых скоростях пара, а расширяющиеся — у турбин со ступенями скорости, у которых осуществляют сверхкритические перепады энтальпий.

Сопла первых ступеней объединяются в так называемые сопловые сегменты. У главных турбин сопла располагаются на значительной части окружности, но включаться в работу они могут не одновременно, а в зависимости от мощности, необходимой для заданного хода судна.

Сопла промежуточных ступеней располагаются в диафрагмах, основное назначение которых отделять одну ступень от другой. Диафрагмы бывают неразъемные и разъемные. Неразъемная диафрагма представляет собой круглую пластину с отверстием в центре. Разъемная диафрагма состоит из двух полудиафрагм, смыкающихся в плоскости разъема. Верхнюю полудиафрагму устанавливают в крышке турбины, а нижнюю — в нижней половине корпуса. Для надежного стыкования по разъему одна полудиафрагма имеет шпонку, а другая — паз для шпонки. В горизонтальных турбинах для удобства разборки и сборки применяют только разъемные диафрагмы. Неразъемные иногда используют в вертикальных турбинах.

Диафрагма (рис. 13.6) состоит из полотна 1, представляющего собой ее остов, сопловых лопаток 3, обода 2 и уплотнительных колец 4, устанавливаемых в месте прохода вала через центральное отверстие диафрагмы.

**Конструкция сопел первых ступеней.** По конструкции и способам технической обработки сопловые сегменты подразделяют на литые, сборные, наборные из цельнофрезерных сопел и сварные с соплами из профильного или листового проката.

У литого соплового сегмента (рис. 13.7) сопловые лопатки изготавливают отдельно штамповкой из чистых стальных пластинок. Отштампованные лопатки заформовывают на определенном расстоянии одна от другой в стержни так, чтобы кромки лопаток выступали из стержней на 8—12 мм. Набор стержней с лопатками устанавливают в форму и заливают ее расплавленным чугуном. При остывании чугун схватывается с выступающими над стержнями кромками лопаток, и после удаления формочной земли получается сопловой сегмент прямоугольного сечения.

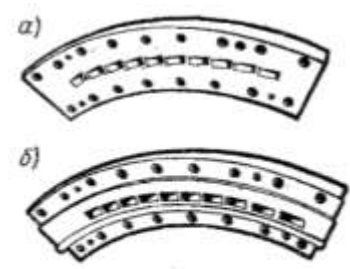


Рис. 13.7. Литой сопловой сегмент со стороны впуска (а) и выпуска (б) пара

**Сборный сопловой сегмент** (рис. 13.8) состоит из цельнофрезерованных сопловых лопаток 10 (из хромоникелевой стали) и двух оправ — верхней 2 и нижней 3. Каждая сопловая лопатка имеет по два шипа 11. При сборке сегмента шипы вставляют в отверстия в верхней и нижней оправе и расклепывают. Для прочности сопловые лопатки дополнительно скрепляют заклепками 5, которые проходят сквозь отверстия 12 обеих оправ и лопаток. Наружные боковые стенки сегмента образуются концевиками 6 и 4, которые скрепляются с оправой двумя-тремя заклепками увеличенного диаметра.

Собранный сопловой сегмент крепят к корпусу 9 турбины болтами 8 на красно-медной прокладке 7. Правильность положения сегмента обеспечивается двумя

установочными штифтами, которые вытаскивают по развернутым в оправках отверстиям 1.

У этих сопел наблюдается просачивание пара через неплотности между отдельными деталями, образующиеся в результате неточности изготовления и неизбежных тепловых деформаций деталей. Сборный сопловой сегмент также может быть составлен из двух оправ, одна из которых имеет выфрезерованные сопловые перегородки.

Сопловой сегмент турбины ПТГ (рис. 13.9) состоит из набора десяти *цельнофрезерованных сопел 4*, глухого сопла 3 правого 2 и левого 5 концевиков, изготовленных из нержавеющей стали.

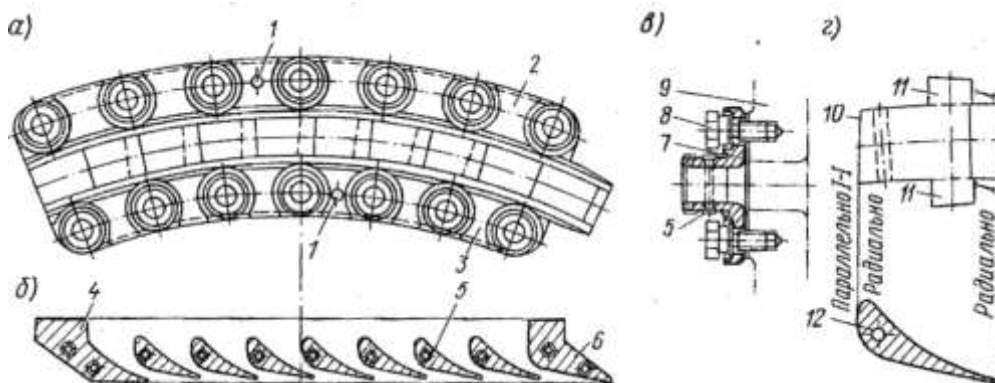


Рис. 13.8. Сборные сопловые сегменты:

а — вид сверху; б — продольный разрез и развертка; в — поперечный разрез; г — сопловая лопатка нержавеющей стали.

Все сопла заводят в соответствующую канавку корпуса турбины Т-образным буртом.

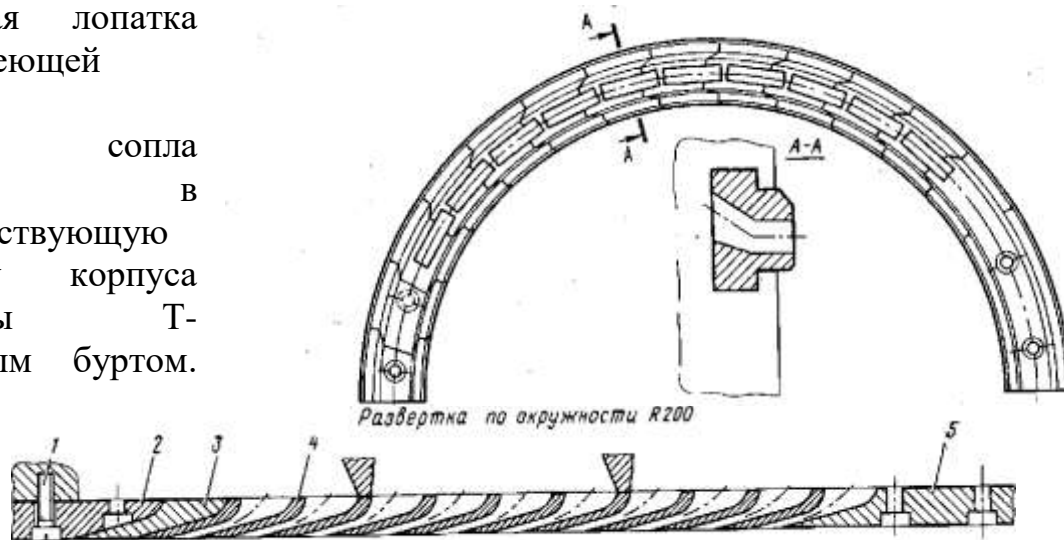


Рис. 13.9. Сопловой сегмент турбины ПТГ

предотвращения сдвига набора сопел в канавке каждый концевик крепится к корпусу турбины двумя винтами 1.

**Конструкция диафрагм.** По способу изготовления и крепления сопловых лопаток диафрагмы подразделяются на литые, наборные и сварные.

В литой диафрагме (см. рис. 13.6) сопловые каналы образованы предварительно отштампованными лопатками 3, залитыми одним концом в обод 2, а другим — в полотно диафрагмы 1. Для надежного сцепления лопаток с металлом обода

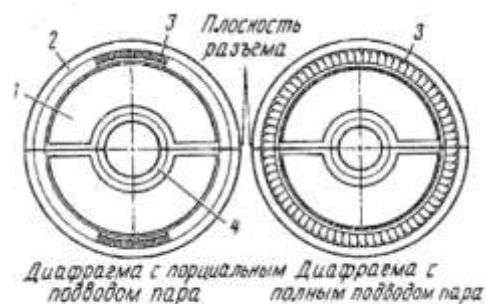


Рис. 13.6. Типы диафрагм



и полотном диафрагмы в концах лопаток перед формовкой фрезеруют пазы или сверлят отверстия и лудят концы лопаток. Литые диафрагмы изготавливают из чугуна и используют при температуре пара до 200—270 °С. Сопловые лопатки штампуют из листовой никелевой или хромоникелевой стали.

*Наборная кованая диафрагма* (рис. 13.10) представляет собой два полудиска 6 постоянной толщины. На наружной поверхности полудиска имеется кольцевой выступ 5, на который надевают цельнофрезерованные сопла 4 с прорезями 1 в хвостовой части. После установки на место сопла прикрепляют к выступу 5 заклепками 2. Для увеличения жесткости сопла скрепляют между собой по наружной окружности полукольцами, которые входят в прорезанную в наружных выступах сопел канавку 3. Полукольца скрепляются с каждым соплом штифтом.



Рис. 13.10. Наборная кованая диафрагма

*В сварных диафрагмах* (рис. 13.11), часто применяемых в современных турбинах, сопловые лопатки 5 в большинстве случаев нарезают из цельнотянутых полос и заводят концами в два ленточных бандажа — наружный 2 и внутренний 3. Наружный бандаж приваривают к ободу 1, а внутренний к полотну 4 диафрагмы.

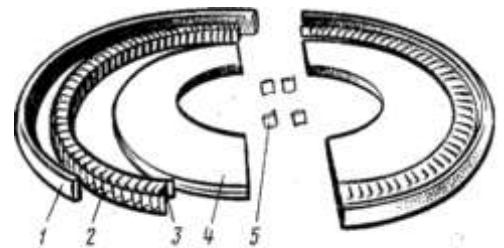


Рис. 13.11. Сварная диафрагма

На рис. 13.12 показана типичная компоновка *наборных диафрагм* в корпусе утилизационной турбины. В выточках корпуса 5 турбины между дисками ротора установлены четыре диафрагмы 1. Каждая диафрагма состоит из кованого стального полотна в виде диска, разделенного на две половины. Обе половины центрируются между собой при помощи шипа 7, имеющегося на разъеме нижней половины, и соответствующего паза в верхней половине. К утопленному ободу диафрагм прикреплены заклепками 6 сопловые лопатки 3. По наружным цилиндрическим поверхностям, образованным сопловыми лопатками, проточены канавки, в которые запрессованы стальные кольца 4 из двух половин. Эти кольца предназначены для усиления жесткости крепления сопловых лопаток на полотнах диафрагм. Все диафрагмы имеют для центровки осевые штифты.

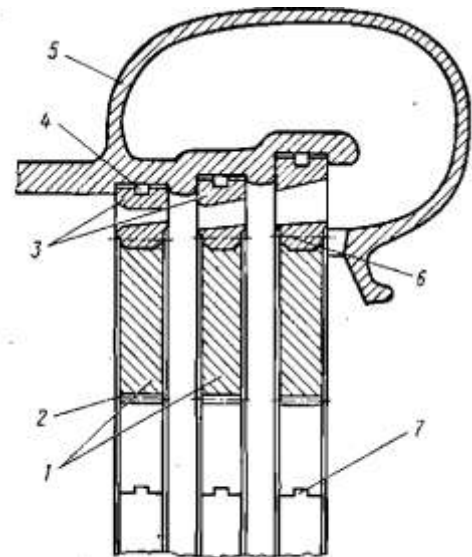


Рис. 13.12. Компоновка наборных диафрагм в корпусе турбины

Для предотвращения протечек пара через зазоры между валом ротора и диафрагмами в ступицах диафрагм установлены лабиринтные уплотнения 2.

### Установка и крепление диафрагмы.

В корпусе турбины (рис. 13.13) вытачивают пазы, в которые вставляют ободья диафрагмы.

При пуске турбины и изменении ее нагрузки диафрагмы, омываемые со всех сторон паром,

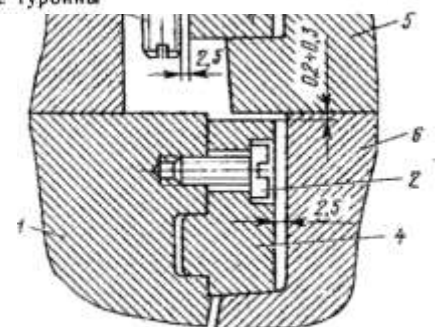


Рис. 13.13. Стопорные планки на диафрагме:  
1,3 — соответственно нижняя и верхняя половины диафрагмы; 2 — стопорный вент;  
4 — шпонка; 5,6 — соответственно верхняя и нижняя половины корпуса турбины

прогреваются быстрее корпуса турбины или обоймы. Чтобы диафрагма могла свободно расширяться относительно корпуса или обоймы, оставляют зазоры.

Радиальный зазор составляет обычно 0,003—0,004 диаметра диафрагмы, а осевой 0,1—0,3 мм.

Нижнюю половину диафрагмы свободно подвешивают на горизонтальном разьеме при помощи шпонок, стопорных планок. Верхняя половина диафрагмы лежит на нижней и подвешена на сухарях или стопорных планках, предотвращающих ее выпадание из расточек при подъеме крышки турбины.

Центровка диафрагмы в корпусе обеспечивается парой шпонок, которые устанавливают в вертикальной продольной плоскости статора на каждой диафрагме, или несколькими радиальными и осевыми штифтами, полуутопленными в обод. При установке диафрагмы в расточку корпуса или обоймы ее обод смазывают тонким слоем графита для предотвращения прикипания диафрагмы к корпусу паровой турбины или обойме.

### Уплотнения

**Общие сведения.** В турбинах устанавливают наружные и внутренние уплотнения.

К **наружным** (концевым) относятся уплотнения в местах **выхода вала из корпуса** турбины. Назначение их состоит в том, чтобы уменьшить утечки пара из корпуса турбины при давлении пара в корпусе выше атмосферного или препятствовать проникновению внутрь корпуса наружного воздуха при давлении меньше атмосферного. Уплотнения в местах прохода вала через диафрагмы и у думмисов называются внутренними. Они предназначены для уменьшения утечки пара из среды с большим давлением в среду с меньшим давлением.

В судовых паровых турбинах применяют лабиринтные металлические и угольные уплотнения; угольные уплотнения иногда применяют в качестве наружных в турбинах турбоприводов.

**Лабиринтные уплотнения.** Сущность лабиринтного уплотнения заключается в пропуске пара через ряд малых кольцевых зазоров 1, за каждым из которых следует относительно большая камера 2 (рис. 13.24). При проходе через малый зазор пар подвергается мятию (дросселируется), т. е. давление его уменьшается и пар приобретает некоторую скорость (зазор играет роль сопла). Далее, попадая в камеру за зазором, пар теряет скорость вследствие вихревых движений.

В результате нескольких расширений пара в зазорах и завихрений в камерах (показаны на рис. 13.24 стрелками) давление пара уменьшается до атмосферного, удельный объем значительно возрастает, а скорость то повышается, то уменьшается почти до нуля. Благодаря этому утечка пара через уплотнение становится очень малой. С увеличением числа щелей утечка пара через уплотнения уменьшается. Для более интенсивного гашения скорости зазоры в уплотнении выполняют так, чтобы пар, переходя из одного зазора в другой, менял свое направление.

По расположению гребней и по отношению их к валу лабиринтные уплотнения подразделяют на радиальные, осевые и смешанные. В современных турбинах наружные и внутренние лабиринтные уплотнения выполняют с радиальными

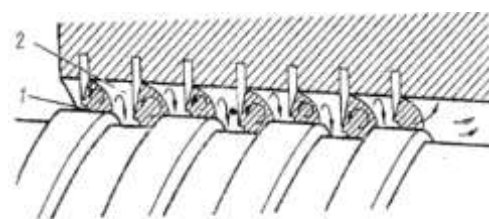
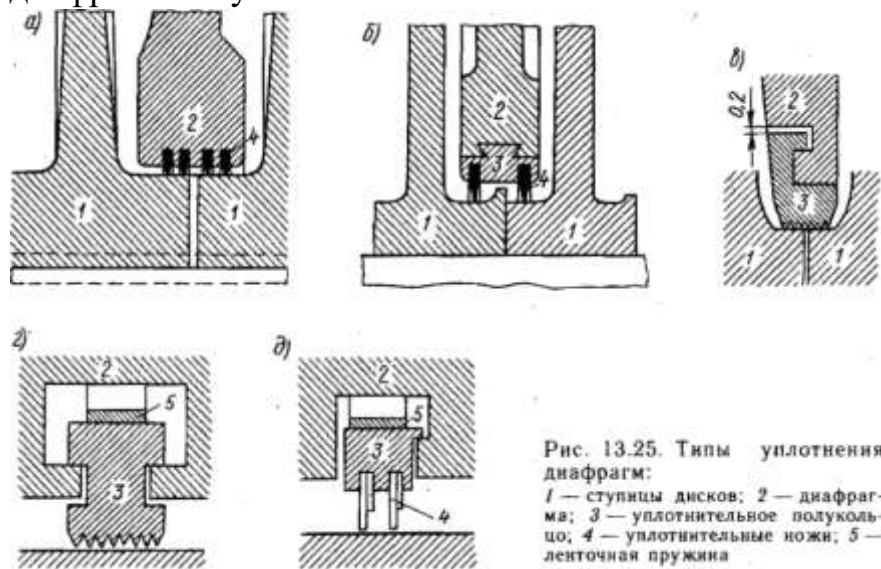


Рис. 13.24. Принцип действия лабиринтного уплотнения

зазорами, поскольку такие уплотнения более надежны, их проще ремонтировать, удобнее собирать и разбирать. Думмисы выполняют с осевыми и радиальными зазорами.

Вследствие небольших перепадов давлений пара перед диафрагмой и за ней уплотнения диафрагмы имеют небольшое число лабиринтов.

В зависимости от способа крепления уплотнительных гребней уплотнения диафрагм могут быть жесткими и эластичными.



В жестком уплотнении (рис. 13.25, а — в) уплотнительные гребни (ножи) из мягкой латуни вставлены и зачеканены в канавках, выточенных в диафрагме или в стальных полукольцах, которые в свою очередь жестко укреплены в выточке каждой половины диафрагмы. Из-за малых радиальных зазоров в

таком уплотнении вращающийся вал может задевать о гребни уплотнения, и места задевания начнут нагреваться. Нагретый металл будет удлиняться, и вал станет выгибаться в ту сторону, на которой произошло задевание, в результате чего задевание увеличится и вал выгнется еще больше. При искривлении вала возникает недопустимая вибрация, которая может привести к тяжелой аварии турбины. Для устранения указанного недостатка стали применять эластичные уплотнения.

Эластичное уплотнение (рис. 13. 25, г — д) представляет собой сегменты, в которых запрессованы или выточены уплотнительные гребни. Сегменты вставляют в выточку каждой половины диафрагмы, где их отжимают ленточными пружинами в направлении вала. Так как при задевании вследствие наличия пружин давление ножей на гребни втулки будет минимальным, небольшое количество выделяющейся теплоты трения неопасно для вала. Правильно собранное уплотнение при нажатии на него пальцем должно пружинить и не заклиниваться.

Совокупность деталей наружного уплотнения называется *уплотнительной коробкой*; она может быть жесткой или эластичной. В современных турбинах применяют только эластичные наружные уплотнения.

В уплотнительной коробке турбины ПТГ ТД-400 (рис. 13.26) сегменты четырех уплотнительных колец 2 вставлены в нижнюю 3 и

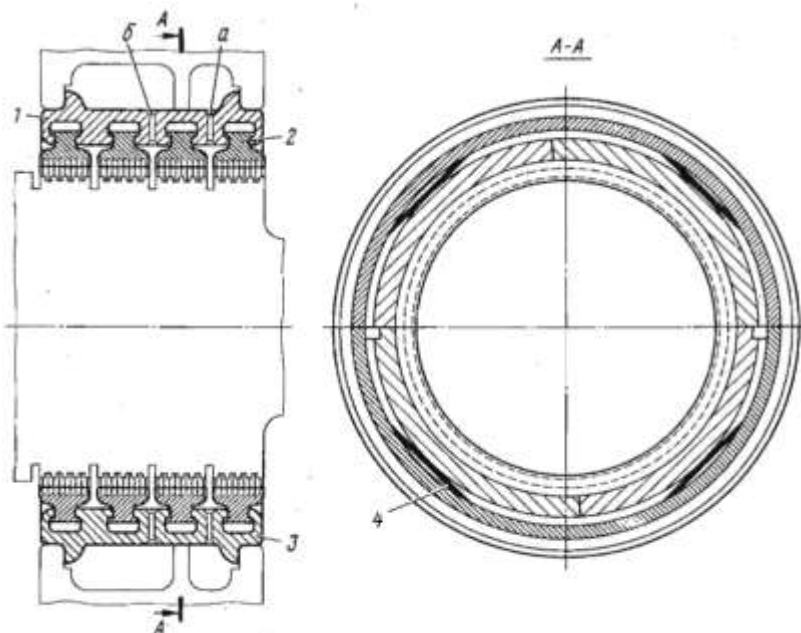


Рис. 13.26. Уплотнительная коробка турбины ПТГ ТД-400

верхнюю 1 обоймы. Плоскими пружинами 4 сегменты отжимаются к шейке вала. Выступы пружин вставляют в соответствующие пазы обойм.

Для предотвращения проворачивания верхняя обойма прикрепляется к корпусу турбины стопорами. Положение сегментов в нижней обойме фиксируется стопорными планками.

Паровой канал б сообщается с системой укупорки, где автоматически поддерживается давление 0,1 — 0,12 МПа. Такое устройство обеспечивает постоянное давление за вторым уплотнительным кольцом независимо от давления пара в турбине, благодаря чему автоматически предотвращаются засасывание воздуха в турбину и значительные утечки пара. Каналы а соединяются с системой отсоса, имеющей эжектор с атмосферным конденсатором. Этот эжектор отсасывает пар, проходящий через коробку, поддерживая в камере абсолютное давление около 0,9 МПа, благодаря чему предотвращается выход пара в машинное отделение.

В турбинах некоторых зарубежных фирм («АЕГ», «Броун-Бовери») применяют уплотнения жесткого типа (рис.

13.27), уплотнительные гребни 3 которых закреплены в канавках 2, проточенных на шейках вала ротора 1, и таким образом вращаются вместе с ротором, а в неподвижных обоймах в корпусе турбины 4 выточены пазы прямоугольного сечения.

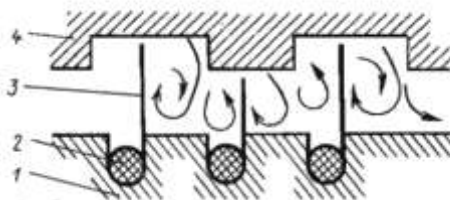


Рис. 13.27. Уплотнение фирмы «Броун-Бовери»

Уплотнительные гребни изготавливают из никеля, нейзильбера или при высокой температуре пара из аустенитной стали. На валу гребня крепят, расчеканивая, проволоку эллиптического сечения. В этих уплотнениях вал не нагревается даже при значительном задевании гребней о неподвижные обоймы. Замена же деформированных и износившихся гребней очень проста. Уплотнение такого типа широко применяют в газовых турбинах и турбонагнетателях дизелей.

**Угольные уплотнения.** Уплотнения этого типа состоят из ряда (от 3 до 8) колец, изготовленных из прессованного угля с большим содержанием графита. Каждое кольцо для удобства сборки в свою очередь состоит из трех-шести сегментов, стянутых пружиной. Кольца помещают в чугунных или стальных обоймах, которые вставляют в уплотнительную коробку или непосредственно в корпус турбины.

При установке колец стыки припиливают один к другому, а сами кольца пришабривают по шейке вала так, чтобы радиальный зазор между кольцом и валом был равен 0,001 — 0,002 диаметра шейки. Этот зазор учитывает только различие в тепловом расширении угольного кольца и вала. Поэтому во время работы турбины зазоры между валом и кольцами приближаются к нулю.

Благодаря смазывающим свойствам колец соприкосновение между кольцами и валом неопасно, и при правильной сборке кольца работают с ничтожным трением.

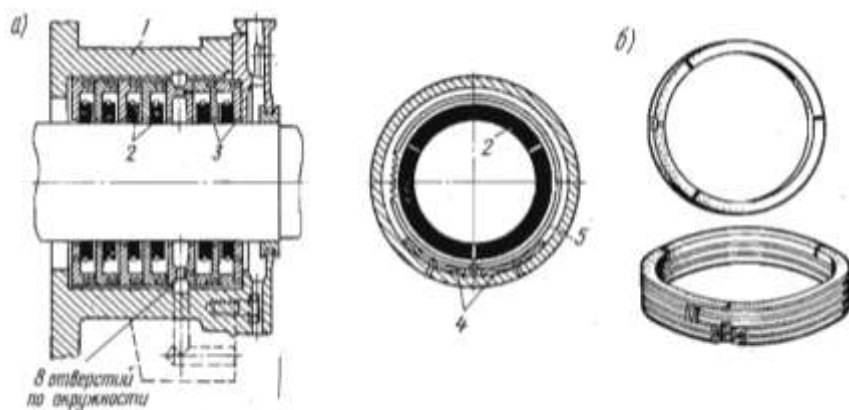


Рис. 13.28. Угольное уплотнение: а — уплотнительная коробка; б — угольные кольца

Практически можно считать, что угольные кольца не расширяются, а вал расширяется на 0,1% на каждые 100 °С нагрева.

Типичная конструкция угольной уплотнительной коробки показана на рис. 13.28, а. Угольные кольца 2, состоящие из трех сегментов, помещаются в чугунных обоймах 3 Г-образной формы, которые вставлены в корпус 1. Снаружи угольные кольца охватываются легкими спиральными пружинами 5. Замки пружин входят в вырезы колец и, упираясь в выступы или штифты обойм, не позволяют кольцам вращаться вместе с валом; обоймы в свою очередь стопорятся шпонками в корпусе турбины. Пружины 4 поддерживают кольца в таком положении, чтобы их центры совпадали с центром вала; при этом пружины разгружают вал от действия веса колец.

Угольные уплотнения компактны и хорошо препятствуют утечке пара, но их можно употреблять, если окружные скорости шеек вала не превышают 35—40 м/с. При больших окружных скоростях выделяемую теплоту трения невозможно полностью отводить от уплотнительных коробок. К недостаткам угольных уплотнений относятся их быстрое изнашивание, частые замены, сложность пригонки и сборки, а также невозможность их применения при температуре пара выше 300 °С в связи с явлением обезграфичивания угольных уплотнений. У некоторых турбин шейки вала под кольцами корродируются.

**Паромаслоотбойные устройства.** Для предотвращения возможности обводнения масла и загрязнения конденсата маслом в районе опорных подшипников устанавливают паромаслоотбойники или дефлекторы. Конструктивно они представляют собой такие же уплотнения, как и концевые, с немного измененными формами гребней и способами их размещения.

В паромаслоотбойном устройстве турбин ЛОКЗ (рис. 13.29) паромаслоотбойником является гребень 1, выточенный заодно с валом. При вращении ротора влажный пар, поступающий из уплотнения, конденсируется и конденсат протекает по валу. Капельки конденсата подходят к гребню, сбрасываются им и уносятся к периферии, не попадая в масло. Масло, вытекающее из подшипников и просачиваясь через кольцевую щель между щитками 2 и валом, дросселируется. Далее, попадая в большие камеры 3, масло теряет скорость, захватывается уступом вала, отбрасывается к периферии корпуса маслоотбойника и стекает в сливную полость.

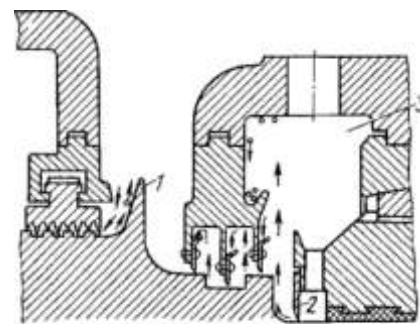


Рис. 13.29. Паромаслоотбойное устройство

### Подшипники

**Общие сведения.** У паровых турбин имеются опорные и упорный подшипники. Опорные подшипники воспринимают вес ротора и усилия, действующие на него при парциальном выпуске пара, а также фиксируют положение ротора в радиальном направлении относительно частей статора.

Обычно в корпусе турбины устанавливаются два опорных подшипника — передний и задний. Однако имеются паротурбоприводы, где один опорный подшипник установлен в корпусе турбины (в стуле), а два — в корпусе редуктора. Таким образом ротор турбины и скрепленная с ним шестерня редуктора (см. рис. 16.3) лежат на трех опорных подшипниках.

Упорный подшипник предназначен для удержания вращающегося ротора в заданном осевом положении относительно корпуса и фиксирования осевых зазоров в проточной части турбины. Он воспринимает также осевое усилие ротора при работе турбины, которое значительно изменяется в зависимости от нагрузки и состояния проточной части, начальных и конечных параметров пара.

Часто у турбин турбоприводов задний опорный подшипник конструктивно объединен с упорным. Такой подшипник называют *опорно-упорным*.

**Опорные подшипники.** Подшипники турбин должны работать в условиях высоких частот вращения шеек и больших удельных нагрузок, окружная скорость вращения шейки ротора современных турбин достигает 60—80 м/с, а удельная нагрузка доходит до 0,14—0,15 МПа. Подшипники турбин должны иметь большую надежность, — отличаться малым изнашиванием и минимальной потерей энергии на преодоление трения.

Для удовлетворения этих требований при конструировании подшипников используют принцип клинового смазывания (жидкостного трения). Согласно гидродинамической теории смазывания подшипник растачивают до диаметра немного большего, чем диаметр шейки вала. При этом центр вала не совпадает с центром подшипника и, следовательно, между шейкой и вкладышем подшипника образуется дугообразный клиновидный зазор.

В спокойном состоянии шейка вала опирается на нижнюю часть вкладыша подшипника (рис. 13.30, а) и эксцентриситет  $0 - 0_1$  между центрами вала 2 и подшипника 1 находится в вертикальном положении. В момент страгивания ротора с места между шейкой вала и вкладышем подшипника имеется металлический

контакт 4, но уже с началом вращения шейка силой трения затягивает масло в клиновидный зазор 3 и как бы всплывает на слое масла; так обеспечивается жидкостное трение в подшипнике. При этом шейка сначала сдвигается влево, затем поднимается и занимает положение, показанное на рис. 13.30,

<sup>1</sup>Удельной нагрузкой подшипника называется отношение всей нагрузки, действующей на подшипник, к площади проекции нижнего вкладыша.

Удельной нагрузкой подшипника называется отношение всей нагрузки, действующей на подшипник, к площади проекции нижнего вкладыша.

Рис. 16.3. Турбопривод электрогенератора ТД-400

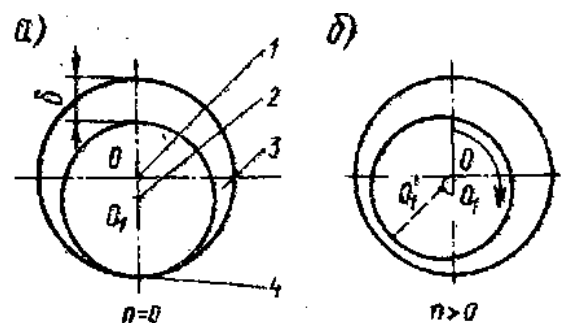
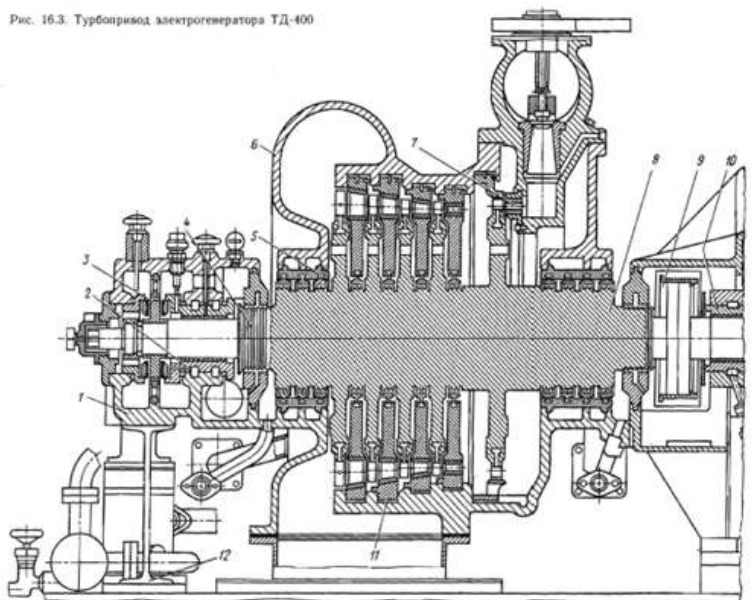


Рис. 13.30. Образование гидродинамического клиновидного зазора

б. При увеличении частоты вращения центр шейки описывает криволинейную траекторию  $0_1 — 0_1' — 0$ , при которой эксцентриситет уменьшается, а толщина слоя масла увеличивается.

Для нормального действия турбины должны быть обеспечены непрерывный подвод и отвод масла; ведь оно служит не только для смазывания, но и для охлаждения подшипников, т. е. для отвода теплоты, выделяющейся при трении шейки вала в подшипнике. Масло подводится к подшипникам вала турбины под избыточным давлением (форсированное смазывание) 68—83 кПа.

Температура масла, выходящего из подшипников, не должна превышать 60—70 °С, так как при дальнейшем ее повышении вязкость масла понижается и масляная пленка становится минимальной. Кроме того, при температуре выше 70 °С начинается интенсивное окисление масла и оно быстро стареет. Температура входящего в подшипник масла должна быть 35—45 °С; при температуре менее 35 °С вязкость масла возрастает до значения, при котором сплошной масляной пленки может не получиться.

Большое значение для работы подшипников имеют способ и место подвода масла, которое должно поступать в те места подшипника, где давление масла будет наименьшим. Каналы для подвода масла расположены **обычно в нижних вкладышах** в виде сверлений или залитой во вкладыш трубки с выходом к горизонтальному разъему.

Отсюда масло растекается вдоль шейки вала в обоих направлениях и затем стекает из подшипника.

Для правильной работы подшипника нижний вкладыш тщательно растачивают или пришабривают на краску по шейке вала с дугой обхвата не менее 60° (см. рис. 13.30, а). Между верхним вкладышем и шейкой вала выдерживают масляный зазор  $\delta$  (разница в диаметрах расточек вкладыша и шейки вала), который зависит от диаметра вала, частоты его вращения и вязкости масла. Обычно зазор принимают равным 0,015 диаметра шейки, но не более 0,2 мм. Боковой зазор может быть принят составляющим приблизительно 0,001 диаметра шейки вала. Как слишком большой, так и слишком малый масляные зазоры могут быть причинами сильной вибрации турбины и выхода ее из строя.

У плоскости разъемов вкладышей на небольшом расстоянии от торцов выполняют скосы (холодильники) для более легкого поступления масла к валу и создания масляного клина. У торцов нижнего вкладыша с обеих сторон располагают скосы на длине 10—20 мм глубиной примерно 0,2 мм.

Для регулирования количества масла, поступающего к каждому подшипнику, на маслопроводе устанавливают игольчатые дроссельные клапаны или дроссельные шайбы.

Опорный подшипник турбин состоит из следующих основных частей: корпуса, крышки, двух вставных вкладышей — верхнего и нижнего, маслозапорного устройства и других деталей — болтов для крепления крышки к корпусу, масляных трубок, контрольных приборов, кожуха и т. п.

Корпус опорного подшипника (стул турбины) выполняют как самостоятельную конструкцию или отливают заодно с корпусом турбины. Крышку подшипника обычно отливают из углеродистой стали. Вкладыш подшипников изготавливают из бронзы или углеродистой стали, заливают оловянным баббитом Б-83 (состав: 10—12% сурьмы, 5,5—6,5% меди, остальное — олово). Основная мягкая масса баббита

Б-83 с высокой пластичностью и вязкостью является раствором сурьмы и меди в олове. Верхние вкладыши в целях экономии иногда заливают свинцовым баббитом Б-16.

Горизонтальный разъем вкладышей и крышек подшипников обычно шабруют и для непроницаемости покрывают легким слоем бакелитового лака или спиртовым раствором шеллака. Крепят разъем болтами. Вкладыши подшипника при вращении вала должны плотно прилегать к расточке стула и крышке подшипника. Неплотное прилегание крышки к верхнему вкладышу может вызвать вибрацию подшипника, поэтому крышки подшипников устанавливают на вкладыше с небольшим натягом (0,05—0,1 мм). Для обеспечения центровки вкладышей в радиальном и осевом направлениях и точной установки крышки предусматривают центрирующие установочные штифты.

В правильно сконструированных и хорошо изготовленных опорных подшипниках после нескольких лет нормальной эксплуатации турбины при ревизии в верхнем и нижнем вкладышах можно видеть следы механической обработки на поверхности баббитовой заливки, т. е. следы от шабера и резца.

Опорные подшипники в зависимости от способа установки их вкладышей в корпусах (стульях) бывают нерегулируемыми и регулируемыми.

Вкладыши *нерегулируемых подшипников* наружной поверхностью опираются непосредственно на поверхности расточек корпусом. Вкладыши *регулируемых подшипников*

помещают на установочных сухарях (колодках), привернутых к корпусу вкладыша винтами. Наружную поверхность сухарей протачивают концентрично с расточкой корпуса подшипника. Между сухарями и вкладышами укладывают стальные прокладки, подбирая которые, достигают нужного положения ротора в корпусе турбины. Этим значительно облегчается центровка ротора, так как вкладыши после расточки не нужно пришабривать по месту. Кроме того, при просадке ротора в процессе эксплуатации турбины можно восстановить его положение при помощи радиального перемещения вкладыша относительно корпуса турбины.

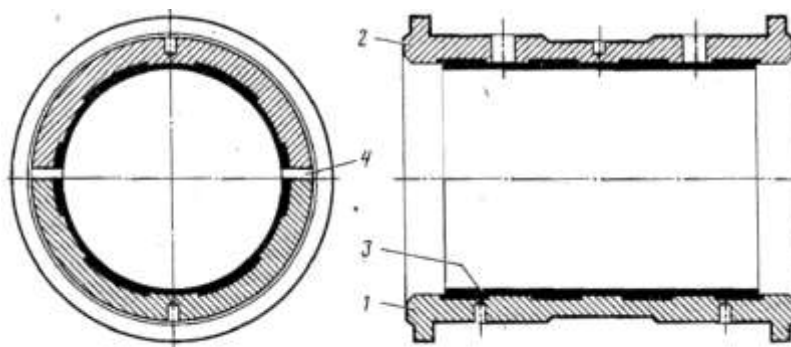


Рис. 13.31. Вкладыши жесткого нерегулируемого подшипника

На рис. 13.31 показан вкладыш жесткого нерегулируемого подшипника. Два бронзовых вкладыша 1 и 2 залиты баббитом 3. Для лучшего удержания баббита во вкладышах простроганы и выточены продольные и поперечные канавки в форме ласточкина хвоста. Нижний вкладыш помещается в расточке стула, а верхний — в крышке. В плоскости разъема вкладыши стопорятся от проворачивания утопленными впотай винтами. Смазочное масло входит во вкладыш по каналу 4, расположенному в горизонтальном разъеме вкладыша, поступает к шейке вала, растекаясь в обоих направлениях по шейке, и затем стекает с обоих концов вкладыша в сливную полость стула. Около каналов 4 на баббитовой заливке сделаны скосы для того, чтобы масло легко поступало к валу и не прерывалась масляная пленка.



**Упорные подшипники.** Упорный подшипник является ответственным узлом турбины. Повреждение упорного подшипника может вызвать смещение ротора в осевом направлении, поломку рабочих лопаток и диафрагм, срез лабиринтовых уплотнений и повреждение вала ротора, поэтому основным требованием, предъявляемым к упорному подшипнику, является его надежность.

В судовых турбинах применяют одногребенчатые упорные подшипники (рис. 13.32), гребни которых или откованы вместе с ротором, или съемные. С одной или по обе стороны гребня 4 расположены 6—12 упорных подушек (сегментов) 1, которые, опираясь выпуклой поверхностью на неподвижную опору 3, могут наклоняться под некоторым углом к плоскости гребня.

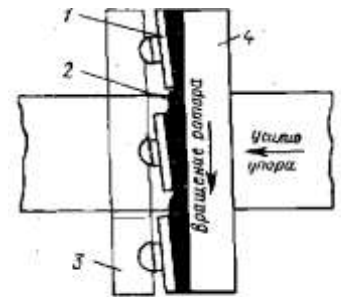


Рис. 13.32. Принцип работы упорного подшипника

Масло к подшипнику подводится в кольцевой зазор между валом и подушками, где оно вследствие вязкости прилипает к гребню и при вращении последнего прогоняется через зазоры между гребнем и подушками. При входе в зазоры масло наклоняет подушки под некоторым углом, образуя масляный клин 2; при этом осевые усилия, испытываемые ротором, передаются подушками и далее корпусу турбины.

Расположение упорных подушек по обеим сторонам гребня обеспечивает неизменное осевое положение ротора при изменении направления вращения. Вывод масла из упорного подшипника осуществляется сверху, чтобы подшипник всегда был заполнен маслом.

Упорные гребни отковывают из мягкой углеродистой стали с последующей цементацией и закалкой. Упорные подушки изготавливают из фосфористой бронзы или марганцовистой латуни и обычно заливают баббитом Б-83. Толщина слоя баббита (1,2—2 мм), должна быть меньше осевых зазоров в проточной части, чтобы в случае выплавления баббита не произошло задевания рабочих лопаток о направляющие (у реактивных турбин) или о диафрагмы (у активных турбин).

Упорно-опорный подшипник (рис. 13.33) состоит из жестких вкладышей 2, залитых баббитом Б-83 3. С торцов на вкладышах равномерно по окружности установлены на штифтах десять упорных сегментов 6, также залитых баббитом Б-83. Столько же подушек находится на обойме 7. Утечка масла из подшипника

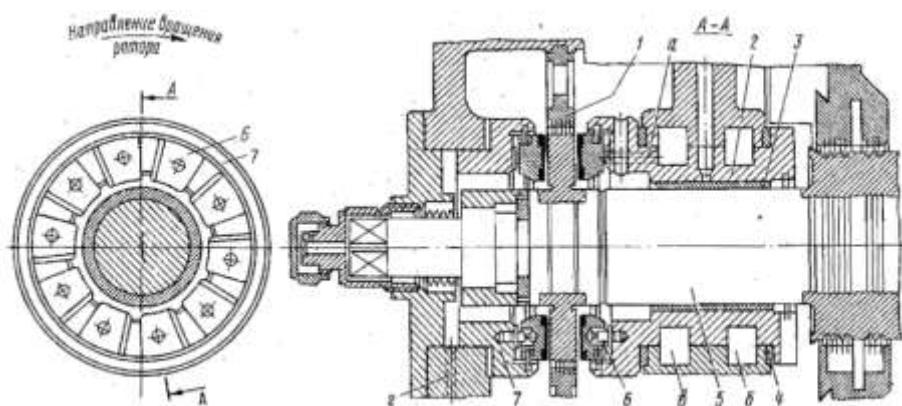


Рис. 13.33. Упорно-опорный подшипник

предотвращается маслосборным кольцом 1, состоящим из двух половин. Перемещение ротора в упорном подшипнике ограничено осевым зазором  $\delta = 0,3 - 0,4$  мм; этот зазор регулируется посредством изменения толщины установочных колец 4. Вкладыши подшипника закрепляются крышкой, которую устанавливают с натягом 0,01—0,05 мм. Масло для смазывания подается: по кольцевому каналу в, сверлениям а — к сегментам,

установленным на вкладыше; по каналу  $b$  — к шейке вала 5 через разъем вкладыша; по сверлению  $z$  в корпусе — к сегментам, установленным на обойме.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные узлы и детали паровой турбины.
2. Что такое статор турбины? Из каких основных частей он состоит?
3. Для чего применяют установочные болты?
4. Как классифицируются сопла паровых турбин?
5. Для чего служат диафрагмы? Как они классифицируются по способу изготовления? Из каких частей состоят? Как в них могут располагаться промежуточные сопла?
6. Чем отличается активная лопатка от реактивной?
7. Какие существуют способы изготовления лопаток? Каковы взаимные достоинства и недостатки цельнотянутых и цельнофрезерованных лопаток?
8. Как устанавливаются и крепятся турбинные лопатки?
9. Каково назначение бандажа и связывающей проволоки? Для чего утоняются вершины у реактивных лопаток?
10. Какие функции выполняют концевые уплотнительные устройства?
11. Для каких целей устанавливают пароотражательные и маслоотбойные устройства?
12. Каково назначение опорных подшипников? Какие типы опорных подшипников применяют у паровых турбин? Какова нормальная и предельно допустимая температура подшипников при работе турбин?
13. Как осуществляются смазывание и охлаждение опорных подшипников?
14. Для каких целей устанавливают упорные подшипники? Как устроен одногребенчатый подшипник?