

# **Тепловые двигатели и нагнетатели**

## **Паротурбинные установки (часть 2)**

Лекция № 27

# 1. Мощность и КПД турбины

*Потери турбины можно разделить на две группы:*  
**внутренние** и **внешние**.

- **Внутренние потери** непосредственно влияют на изменение состояния рабочего тела (РТ) при его расширении в турбине и ***снижают*** **располагаемый теплоперепад**.
- К ***внутренним потерям*** относят:
- 1) **потери кинетической энергии *в соплах и на рабочих лопатках***, вызванные трением потока о стенки, завихрениями и т.п. Эта энергия превращается в теплоту и повышает энтальпию РТ в конце процесса по сравнению с течением без трения;

2) **потери кинетической энергии с выходной скоростью отработавшего РТ;**

3) **потери из-за перетоков РТ через внутренние зазоры между рабочими лопатками и корпусом турбины, между диафрагмой и валом** и др.;

4) **потери вследствие влажности пара возникающие в последних ступенях турбин:** частицы влаги в паре, ударяясь о стенки лопаток, тормозят вращение ротора и снижают полезную работу.

- К *внешним потерям* относятся:
- 1) *потери от утечки РТ через концевые зазоры между корпусом турбины и вала.* Эти потери не влияют на состояние РТ в турбине, а лишь несколько увеличивают его расход;
- 2) *механические потери, которые включают затраты энергии на преодоление трения в подшипниках турбины и на привод вспомогательных механизмов.*

- Работа турбины, как теплового двигателя, характеризуется **внутренней (индикаторной) мощностью**, развиваемой лопатками, и **эффективной (на валу) мощностью**.
- **Эффективная мощность  $N_e$  меньше внутренней  $N_i$  на величину механических потерь.**
- **Внутренняя мощность  $N_i$  меньше мощности  $N_0$ , развиваемой идеальной турбиной, работающей без потерь, на величину внутренних потерь.**

- **Внутренний относительный КПД** учитывает внутренние потери турбины и определяется отношением:

$$\eta_{io} = \frac{N_i}{N_o},$$

- Механические потери оцениваются *механическим КПД*:

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{N_e}{N_o},$$

- Для большинства современных турбин

$$\eta_{oi} = 0,7 \div 0,88$$

$$\eta_{\text{мех}} = 0,99 \div 0,995$$

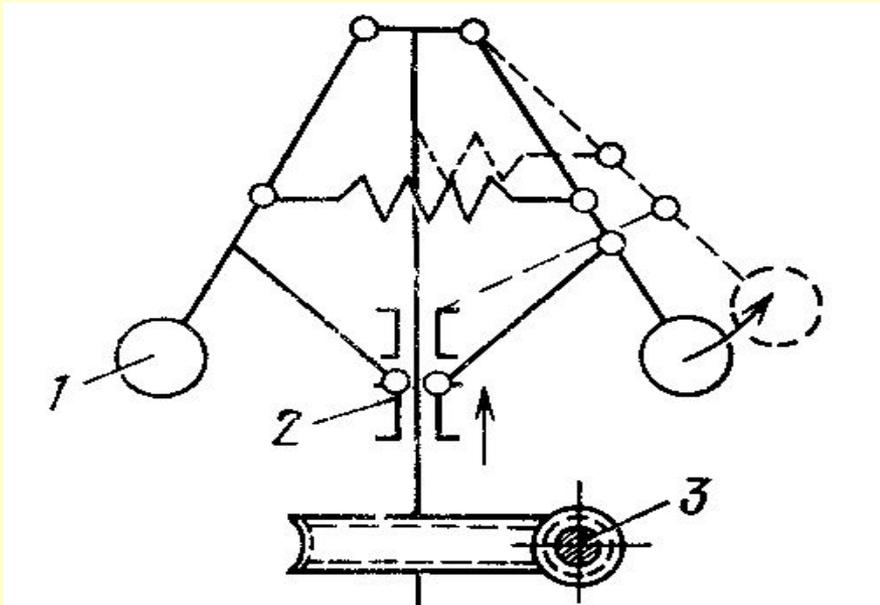
## 2. Регулирование турбин

Паровые турбины обычно работают в широком диапазоне изменения нагрузок.

*В то же время изменение частоты вращения вала турбины для электрического генератора недопустимо.*

- **Основная задача регулирования турбин для привода генератора – *поддержание в заданных пределах частоты вращения вала.***
- Регуляторы скорости паровых турбин многообразны по своему устройству и взаимному расположению отдельных элементов.
- ***Самый простой регулятор скорости состоит из двух элементов: измерительного устройства и регулирующего органа.***
- Более сложные регуляторы имеют дополнительно ряд унифицированных элементов, таких как сервоприводы, устройства обратной связи и др.

- *Измерительным устройством большинства регуляторов скорости турбин служит центробежный маятник.*
- Центробежный маятник приводится в движение от вала турбины **3** посредством зубчатой передачи.
- При увеличении частоты вращения турбины **грузы 1** центробежного маятника *под действием центробежных сил расходятся*, перемещая вверх связанную с ним **муфту 2**.

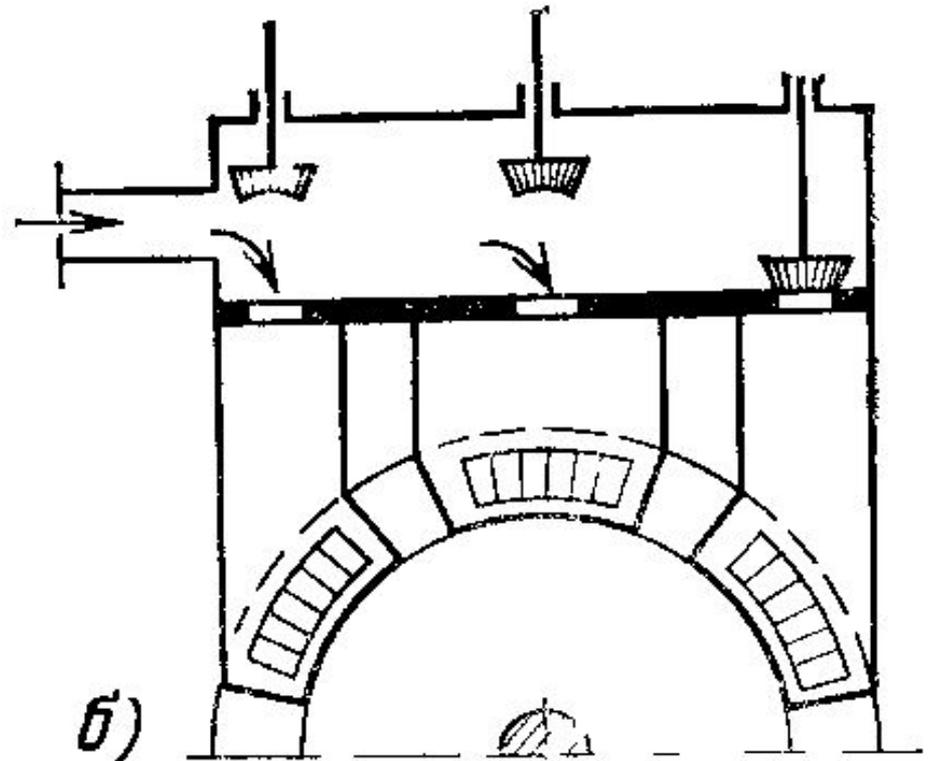
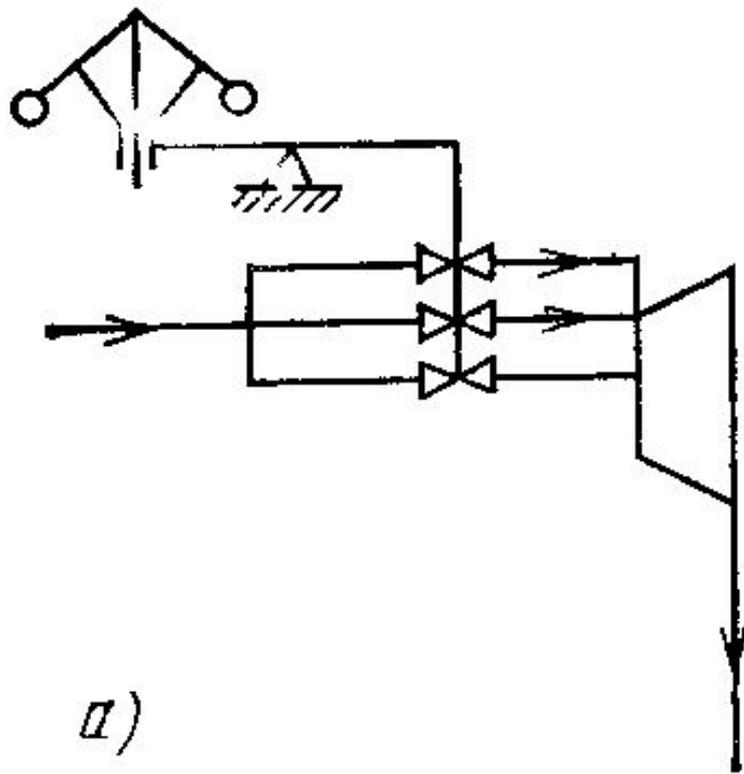


**Схема  
центробежного  
маятника**

- При понижении частоты вращения вала, наоборот, грузы сближаются и муфта опускается вниз.
- *Перемещение муфты передается при помощи механических связей (системы рычагов) или посредством гидроусилителей на регулирующие органы турбины – парораспределительные устройства, которые увеличивают или уменьшают мощность турбины, восстанавливая заданную частоту вращения вала.*
- Парораспределительные устройства бывают *дроссельными, сопловыми, обводными и комбинированными.*



- При дроссельном парораспределении для уменьшения мощности турбины клапаны прикрываются и весь пар, направляемый к соплам, дросселируется.
- Дросселирование пара (процесс  $00'$  при  $h = \text{const}$ ) сопровождается потерями некоторой части располагаемого теплоперепада и ухудшением КПД турбины.
- Дроссельное парораспределение при частичных нагрузках турбины неэкономично и применяется в турбинах малой мощности.

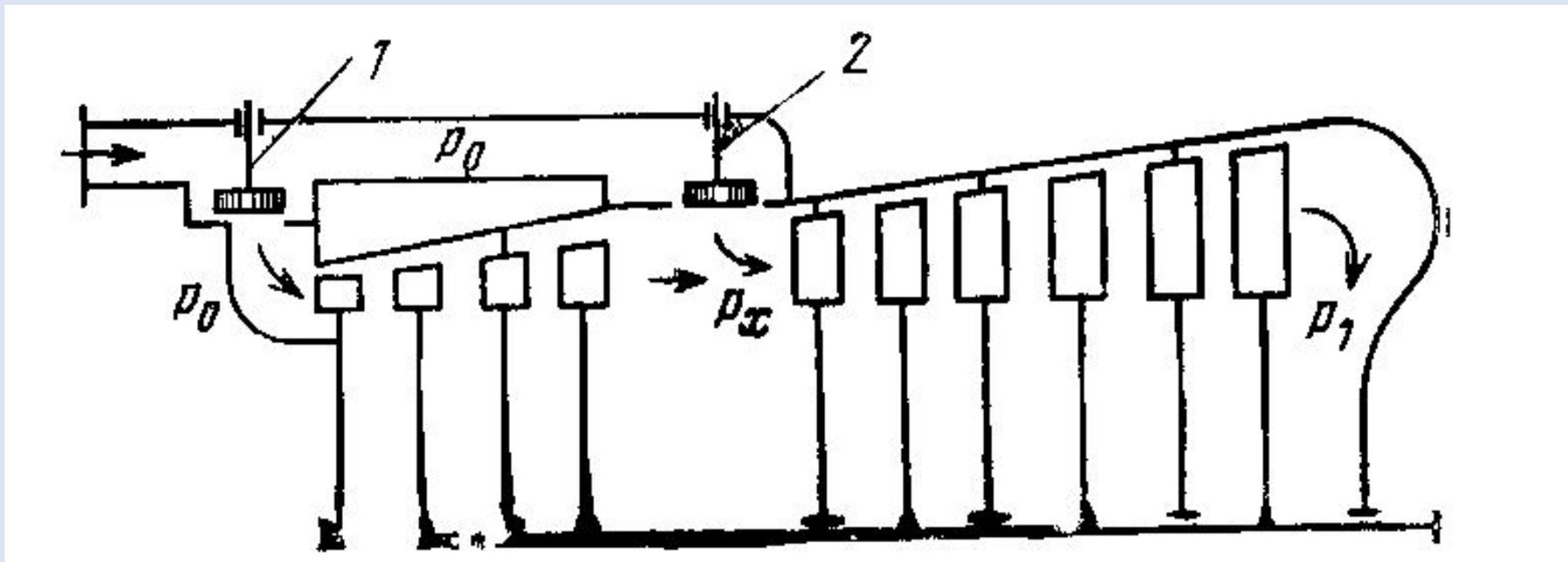


## Сопловое парораспределение.

а) – принципиальная схема; б) – схема клапанной коробки.

- При сопловом парораспределении пар поступает к соплам первой ступени через несколько регулирующих клапанов.
- Каждый клапан обслуживает свою группу сопел и при нормальной нагрузке полностью открыт.
- При изменениях нагрузки турбины регулирующие клапаны последовательно открываются или закрываются.

- Дросселирование пара происходит лишь в не полностью открытом клапане (или клапанах).
- Но так как **через каждый клапан проходит лишь часть от общего количества пара**, *то потери от дросселирования здесь меньше*, **чем в турбине с дроссельным парораспределением**.



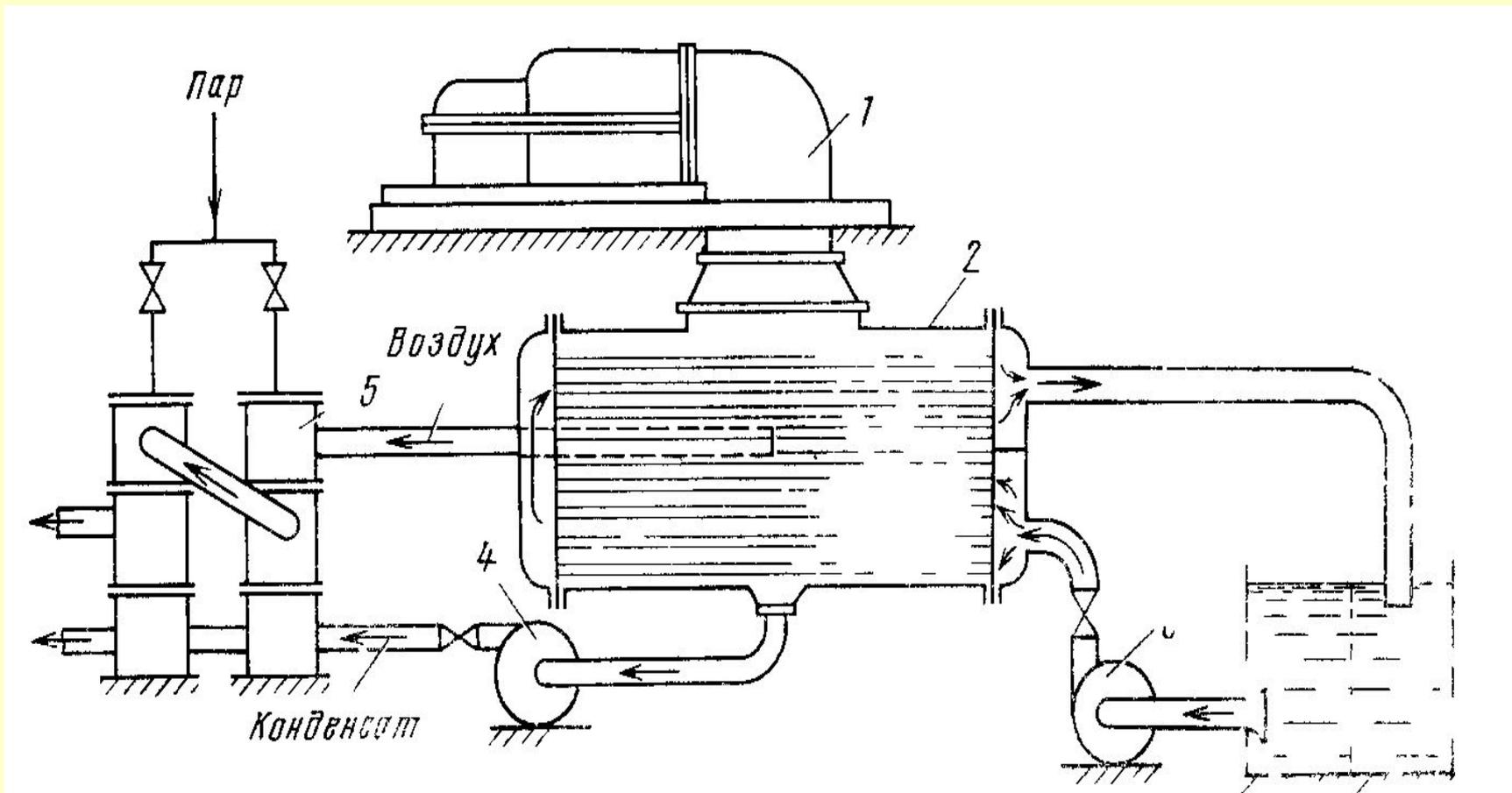
**Схема обводного парораспределения.  
1 – групповой клапан; 2 – байпасный  
клапан**

- При групповом парораспределении осуществляют добавочный впуск свежего пара непосредственно в одну или несколько промежуточных ступеней ЦВД (цилиндр высокого давления) через специальные байпасные последовательно открывающиеся клапаны.
- Обвод пара применяют для обеспечения перегрузки сверх экономической мощности.
- Чем дальше от первой ступени осуществляется добавочный подвод пара, тем больше пропускная способность перегрузочной ступени и следовательно, тем больше можно перегрузить турбину.

- Обводное парораспределение *часто сочетается с сопловым.*
- В современных турбинах можно встретить подобную комбинированную систему: *пропуск пара в пределах от холостого хода до экономической мощности изменяется при помощи соплового распределения, а увеличение нагрузки сверх экономической мощности достигается за счет обводного.*

### 3. Конденсационные устройства

Конденсационная установка предназначена для создания за **паровой турбиной 1** разряжения (вакуума) с целью увеличения используемого **теплоперепада** и **повышения термического КПД паротурбинной установки**. В конденсационную установку входят **конденсатор 2**, **циркуляционный 3** и **конденсатный 4** насосы, а также **устройство для отсасывания воздуха из конденсатора 5** (обычно это – **паровой эжектор**).

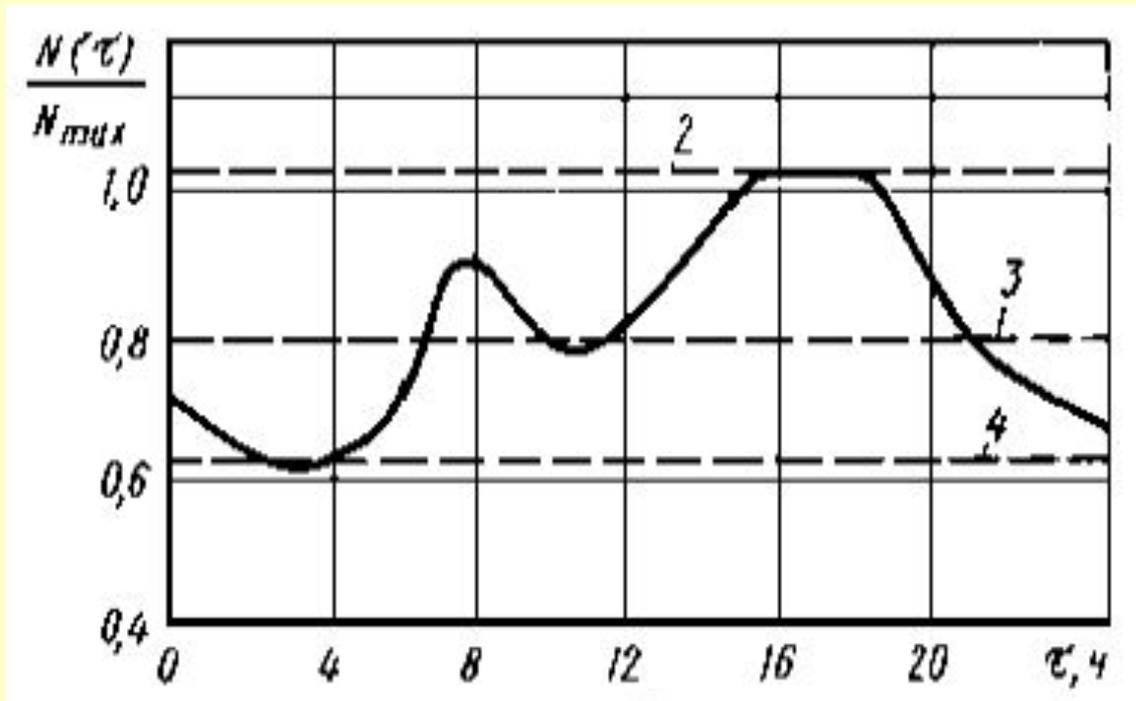


**Принципиальная схема конденсационной установки.**  
**1** – паровая турбина; **2** – конденсатор; **3** – циркуляционный насос; **4** – конденсатный насос; **5** – поверхностные холодильники парового эжектора.

- В конденсаторе осуществляется конденсация отработавшего в турбине пара.
- Охлаждающей средой обычно служит вода, которая подается циркуляционным насосом.
- Вода, получившая тепло в процессе охлаждения конденсата, *охлаждается в специальных установках (градирни, брызгальные бассейны* и т. д.), которые входят в систему теплоэлектростанции.
- Абсолютное давление пара в конденсаторах поддерживается в пределах **3,0 – 7,0 кПа**.

# **4. Регулирование мощности и работа турбины на частичных режимах**

- В процессе эксплуатации мощность турбины может меняться в широком диапазоне нагрузок от холостого хода до максимальной. Это наглядно иллюстрирует суточный график потребления электроэнергии ТЭЦ с двумя максимумами (утренний и вечерний).



**Суточная загрузка ТЭЦ**

- **Мощность**, при которой турбина работает с наименьшим удельным расходом тепла (или с наивысшим абсолютным КПД), называется **экономичной**.
- **Длительная предельно допустимая мощность называется номинальной**. Она на 10...20 % выше экономичной.
- При кратковременных перегрузках можно получить мощность на 5...7 % выше номинальной.
- **Тепловой расчёт и проектирование турбины ведётся на экономическую мощность**. При этом принимается наивыгоднейшее соотношение  $U/C_1$ , а на других режимах оно несколько отличается от оптимального

- Изменение мощности турбины осуществляется одним из следующих способов (или их комбинацией):

□ дросселированием свежего пара при впуске в турбину;

□ подводом свежего пара к одной или двум промежуточным ступеням (обводное распределение пара);

□ изменением числа открытых для свежего пара сопел в регулирующей ступени турбины (сопловое распределение). При этом изменяется степень парциальности.

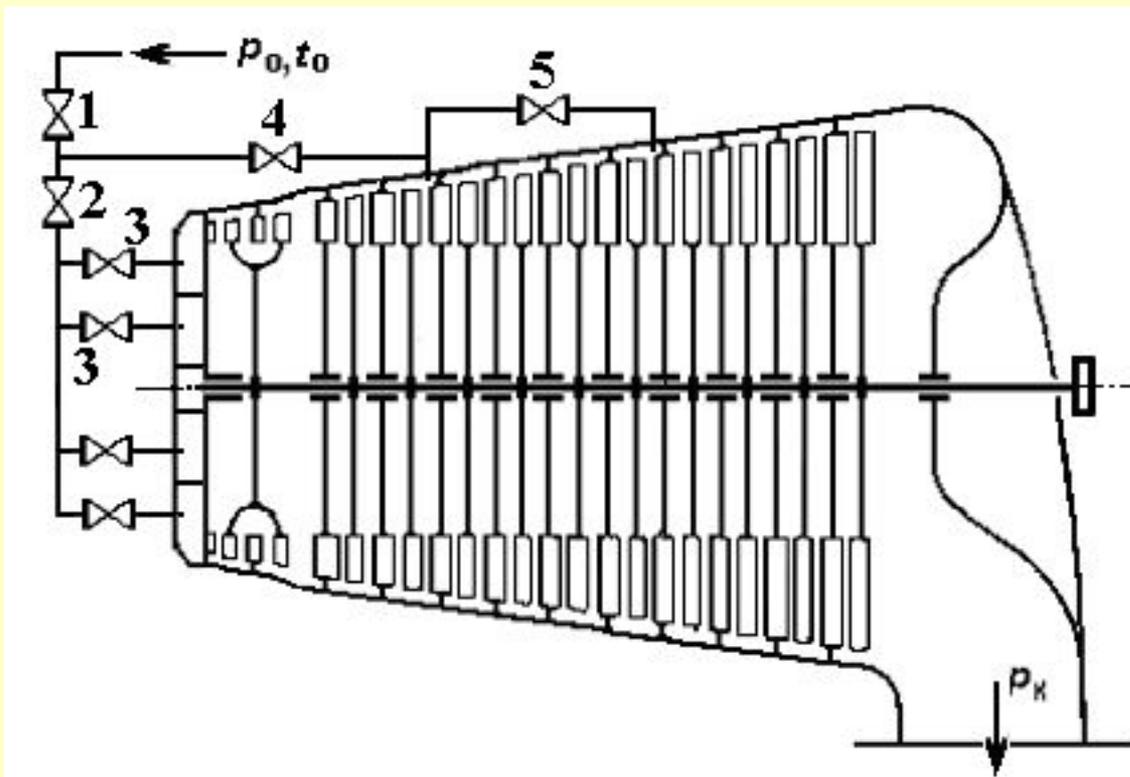
- От котельного агрегата свежий пар подаётся через один (или несколько) паропроводов. *На входе в турбину всегда устанавливается автоматический стопорный клапан, перекрывающий пар при аварийных ситуациях и экстренных остановках.*
- При дроссельном регулировании за стопорным краном устанавливается управляемый регулятором дроссельный клапан, уменьшающий расход и давление пара на входе в турбину, что естественно приводит к уменьшению её мощности.
- Дроссельное регулирование *увеличивает внутренние потери* и *существенно уменьшает КПД установки.*

- *Гораздо эффективнее работает обводное парораспределение.*

- *Здесь небольшая доля свежего пара дросселируется и попадает в первые ступени, а большая часть пара с высоким давлением по перепускному трубопроводу направляется во второй участок, который работает на экономичном режиме.*
- *Широкое распространение нашли турбины с сопловым распределением.*
- *В этом случае на первой ступени по главной окружности устанавливается шесть (или больше) клапанов, каждый из которых может *полностью перекрыть пар к 1/6 части сопл.**

- Для изменения мощности перекрывают один или несколько клапанов.
- **Отношение числа неперекрытых сопел к общему числу сопел этой ступени** называют степенью парциальности турбины (точнее это доля окружности по среднему диаметру сопловой решётки, через которую пар проходит в открытые сопла).
- Сопловое парораспределение **позволяет изменять расход пара практически без изменения его начальных параметров, и поэтому потери в лопаточных каналах почти такие же, как и при номинальном режиме.**

- На крупных турбинах применяются одновременно все три эти приёма, но *наибольший эффект обычно получают за счёт соплового парораспределения*.



**Схема организации регулирования мощности паровой турбины:**

**1** – отсечной клапан; **2** – дросселирующий клапан; **3** – клапана соплового парораспределения; **4** – обводной клапан; **5** – клапан внутреннего обвода

- При установившемся режиме работы турбоустановки угловая скорость вращения вала  $\omega$  остаётся постоянной.
- Неизменным остаётся и отношение между расходом пара и вращающим моментом на валу турбины.
- Изменение нагрузки, например уменьшение её, приведёт к увеличению числа оборотов и угловой скорости вращения вала.
- Чтобы сохранить прежней скорость вращения вала, нужно настолько уменьшить расход или параметры пара, чтобы энергия, отдаваемая им на лопатках турбины в точности соответствовала энергии, необходимой для создания уменьшенного крутящего момента на валу электрогенератора.

- Число оборотов останется неизменным, только когда при любых изменениях нагрузки имеет место равенство мощностей или крутящих моментов на выходной муфте турбины и приёмном фланце генератора:

$$M_{\text{кр.муф}} = M_{\text{кр.ген}}$$

- На переходных режимах, при ускорении или торможении вала турбины, возникают силы инерции, поэтому и уравнение моментов в этом случае должно включать ещё и момент от сил инерции:

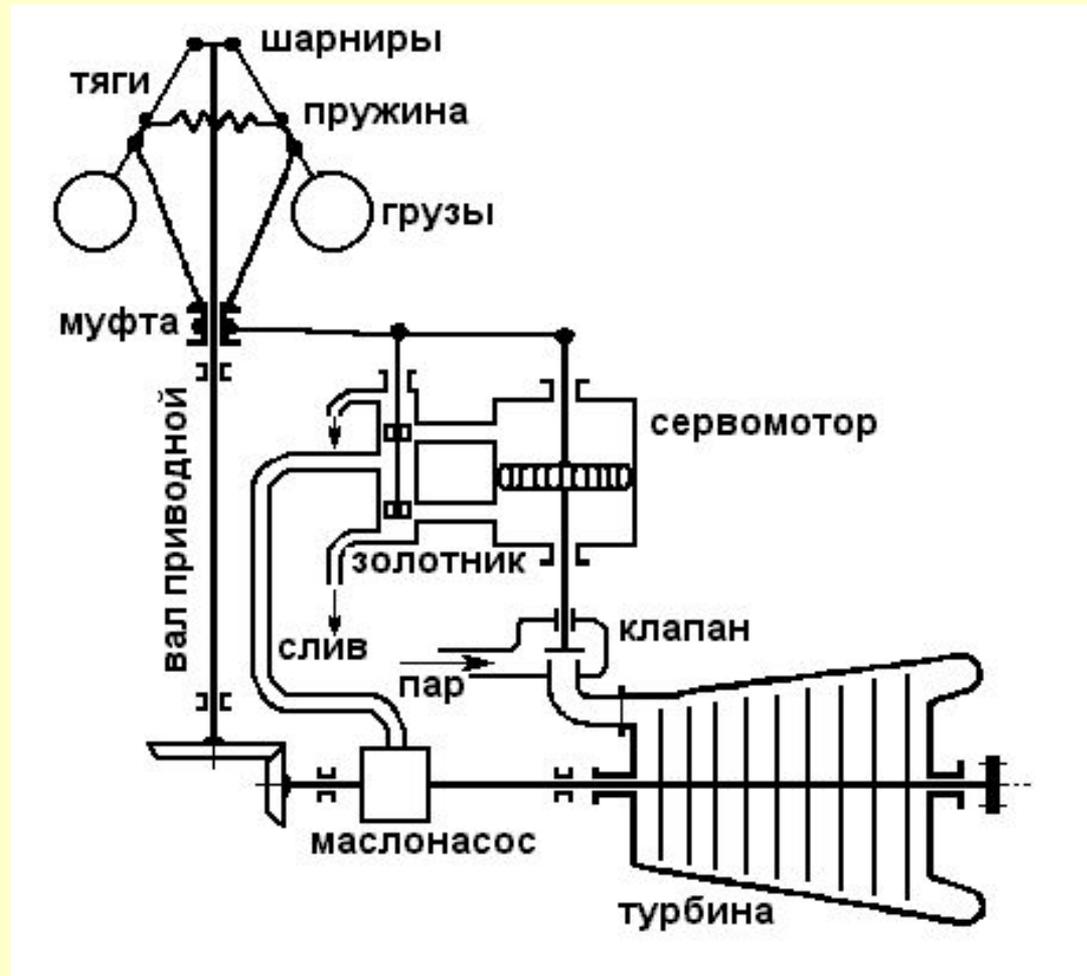
$$M_{\text{кр.муф}} = M_{\text{кр.ген}} \pm M_{\text{кр.ин}}$$

- где

$$M_{\text{кр.ин}} = (J_{\text{T}} + J_{\text{Г}}) \cdot \left( \frac{d\omega}{d\tau} \right)$$

- $J_{\text{T}}$  и  $J_{\text{Г}}$  – моменты инерции масс роторов турбины и генератора, соответственно;
- $d\omega/d\tau$  – угловое ускорение валов.

- **Задача регулирования** – *поддерживать* (например, с точностью до  $\pm 4...5\%$ ) *постоянство заданной скорости  $\omega$* .
- Для этого служит соответствующий регулятор скорости. Часто это центробежный регулятор, изобретённый ещё Уаттом.



**Схема  
регулятора  
паровой**

- С увеличением числа оборотов приводного вала, соединённого с валом турбины, центробежные силы, растягивая пружину, перемещают грузы от оси вращения.
- Грузы перемещают вверх муфту, связанную с золотником сервомотора.
- При перемещении золотника вверх открывается соответствующий канал, через который масло от маслососа под давлением попадает в силовой цилиндр, давит на поршень и перемещает тягу, управляющую дроссельным или отсечными клапанами.

- При уменьшении нагрузки и увеличении числа оборотов это приведёт или к дросселированию пара перед турбиной (показано на рисунке), или к перекрытию каналов к части сопл при сопловом регулировании.
- Как правило, давление пара на выходе из турбины при регулировании мощности остается постоянным, поскольку оно определяется температурой в конденсаторе.