

Тепловые электрические станции (Введение в специальность)

Тема 6

ТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ

«Тепловая машина, как и большинство человеческих изобретений, родилась из почти бесформенных попыток, приписываемых различным людям; истинный же автор остается неизвестен...»

(Сади Карно)

Ефимов Николай Николаевич – проф., д.т.н., зав каф. ТЭСиТ

Что такое турбинная установка

Турбинная установка это комплекс устройств и агрегатов, находящихся в машинном зале электростанции, обеспечивающий преобразование потенциальной энергии пара в кинетическую энергию струи, а затем в механическую энергию вращения ротора турбины.

Турбинная установка состоит из турбины и вспомогательного оборудования, к которым относятся системы регенерации, маслоснабжения и регулирования.

Турбина это первичный двигатель с вращательным движением рабочего органа – ротора и непрерывным рабочим процессом, преобразующий в механическую работу кинетическую энергию подводимого рабочего тела – пара, газа или воды.

Турбину называют также лопаточной машиной или турбомашиной. Струя рабочего тела поступает через направляющие аппараты на криволинейные лопатки, закрепленные по окружности ротора, и, воздействуя на них, приводит ротор во вращение.

Стационарные паровые и газовые турбины

Турбины применяются для привода:

- электрогенераторов (в таком комплексе они называются турбогенераторы),
- центробежных компрессоров и воздуходувок (турбокомпрессоры и турбовоздуходувки),
- питательных, топливных и масляных насосов (турбонасосы).
- судовых движителей с выходом на гребные валы через зубчатые редукторы (турбозубчатые агрегаты), которые создают оптимальную частоту вращения гребных винтов.

Газовые турбины широко применяются в качестве:

- авиационных двигателей (турбовинтовые и турбореактивные двигатели);
- на локомотивах (газотурбовозы).

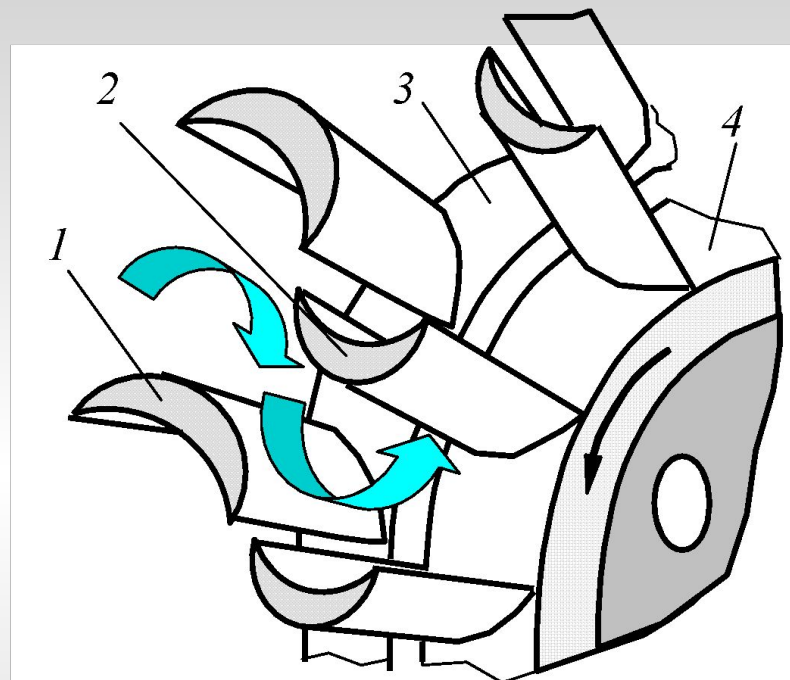
На гидроэлектростанциях устанавливаются тихоходные гидравлические турбины для привода генератора электрического тока (гидрогенераторы).

В свое время турбины вытеснили из энергетики поршневые машины благодаря хорошей экономичности, компактности, надежности работы и возможности получать большую единичную мощность в одном агрегате.

Схема движения рабочей среды в межлопаточном канале турбины

Принцип действия турбины заключается в преобразовании тепловой энергии пара в кинетическую энергию потока струи, которая, воздействуя на лопатки рабочего колеса, приводит во вращение ротор турбины.

Рабочие лопатки турбины имеют изогнутую форму и в совокупности образуют систему криволинейных каналов, называемых рабочей решеткой



Совокупность сопловых и рабочих решеток образуют ступень турбины.

Межлопаточные каналы сопловых и рабочих решеток называются проточной частью турбины.

Вал, на котором находятся рабочие лопатки, называются ротором турбины.

Работа турбинной ступени

Если преобразования потенциальной энергии в кинетическую происходит только в сопловой решетке, то такой принцип работы турбины называется активным, а сама ступень – активной ступенью.

Если же преобразование потенциальной энергии пара происходит как в сопловой, так и в рабочей решетке, то в этом случае ступень называется реактивной ступенью турбины

Согласно уравнению Бернулли рабочее колесо совершает работу:

$$\Delta I = (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho_{cp} g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

Следовательно, вся энергия потока состоит:

- из энергии положения - $(z_1 - z_2)$
- энергии давления - $\frac{p_1 - p_2}{\rho_{cp} g}$
- кинетической энергии потока . $\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$

Активная и реактивная ступени давления

Для **реактивных ступеней** и турбин характерна зависимость:

$$(z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho_{cp} g} > 0.$$

В таких ступенях и турбинах энергия на рабочем колесе совершается с избытком давления. Однако при этом частично используется и кинетическая энергия потока.

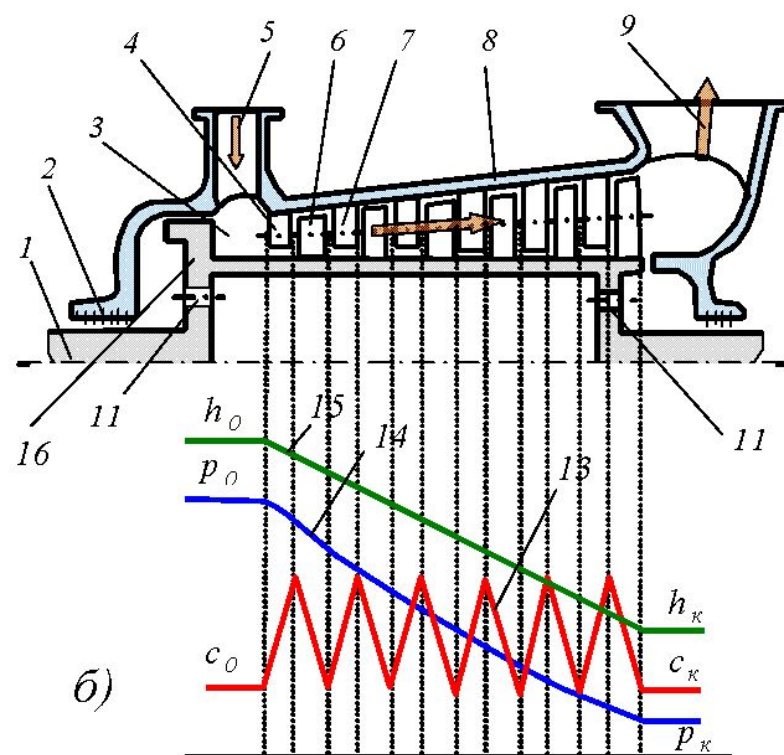
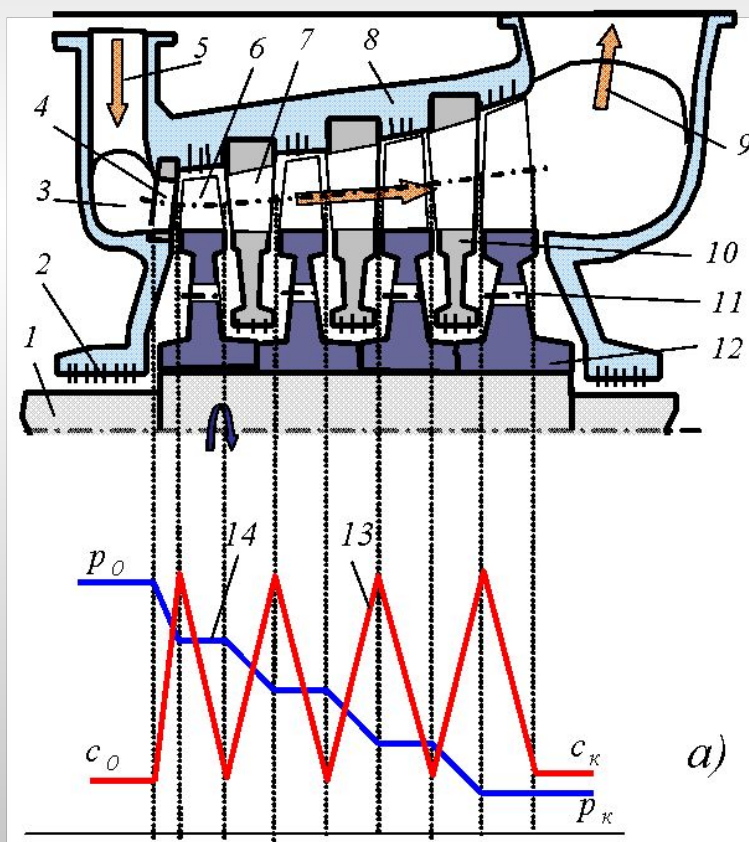
В **активных ступенях** и турбинах $z_1 = z_2$, а $p_1 = p_2$, т.е. работа на рабочем колесе совершается при постоянном давлении. Весь напор потока преобразуется в кинетическую энергию и работа совершается только за счет ее изменения.

Турбина, которая имеет только одну сопловую и одну рабочую решетки, называется **одноступенчатой**.

Если же сопловых и рабочих решеток больше чем по одной, то турбина - **многоступенчатая**.

Продольный разрез активной (а) и реактивной (б) турбины

Движение рабочей среды в турбине может происходить вдоль оси – тогда турбина называется осевой, если же поток среды движется перпендикулярно оси – радиальной.



Истечение пара или газа из сопловой решетки

Процесс разгона пара в сопловой решетке связан с процессом его расширения. При адиабатного изменения параметров:

$$\tilde{h}_{1a} = \sqrt{2 \cdot \dot{I}_0 + c_0^2}$$

c_{1a} – осевая проекция абсолютной скорости потока на выходе из сопловой решетки, м/с;

c_0 – скорость потока перед сопловой решеткой, м/с;

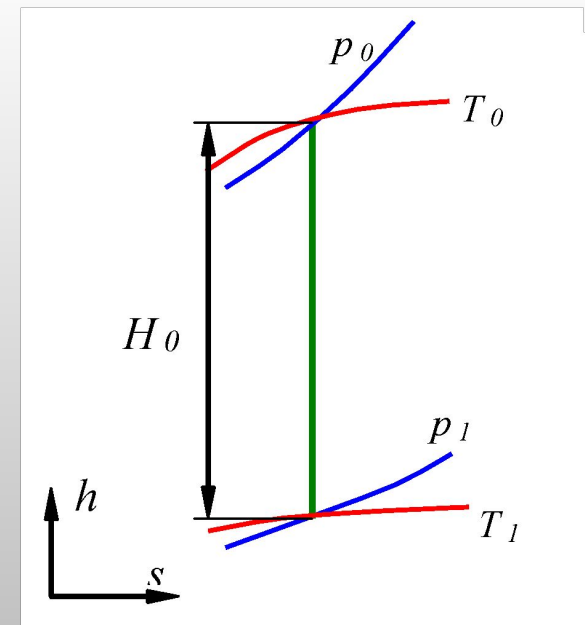
H_0 – располагаемый теплоперепад, Дж/кг;

Зная скорость движения рабочей среды можно найти объемный V (м³/с) и массовый G (кг/с) расход:

$$V = f \cdot c; \quad G = (f \cdot c)/v,$$

f – площадь сечения перпендикулярное вектору скорости потока, м²;

v – удельный объем рабочей среды, м³/кг.



Конфузорное и диффузорное движение

Уравнение неразрывности:

$$\frac{df}{f} = \frac{dv}{v} - \frac{dc}{c}$$

Площадь сечения межлопаточного канала проточной части турбины может, как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от того, какое из слагаемых правой части равенства больше по абсолютной величине.

Если увеличивать скорость ($dc > 0$), то можно увидеть, как при изменении скорости величина df/f поменяет свой знак, т.е. сечение до определенного момента будет уменьшаться ($df < 0$), а затем увеличиваться ($df > 0$).

Скорость пара в наименьшем сечении называется критической скоростью и равна скорости звука: $c_{кр} = a$.

Поэтому дозвуковой поток имеет место при сужающейся сопловой решетке и сверхзвуковой при расширяющейся.

Расход пара в межлопаточном канале

Массовый расход рабочей среды (пара) для i -го сечения канала:

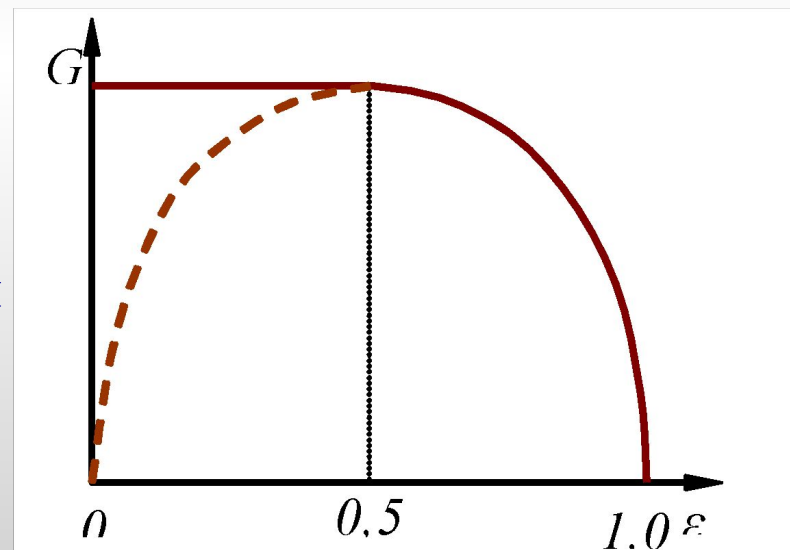
$$G = \rho_i f_i \tilde{n}_{i\dot{a}} = f_i \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right]} \cdot \varepsilon^{\frac{1}{k}}$$

Отсюда теоретически $G = 0$ при $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = 1,0$, однако, в реальных условиях при $\varepsilon < 0,5$ расход не изменяется.

Реальные скорости при движении по межлопаточному каналу от сечения 0-0 до 1-1 уменьшаются с учетом величины потерь на трение, завихрения и т.д.

Величину реальной скорости в сечении 1-1 можно определить по уравнению $c_1 = \varphi c_0$ при условии, что сечение канала не изменяется.

Здесь φ – коэффициент скорости; обычно $\varphi = 0,96 \div 0,98$.



Процесс движения рабочей среды в каналах решеток

Процессы в рабочей решетке можно рассматривать относительно подвижной (относительное движение) и неподвижной (абсолютное движение) систем координат.

Векторное построение абсолютной, относительной и окружной скоростей называется **треугольником скорости**.

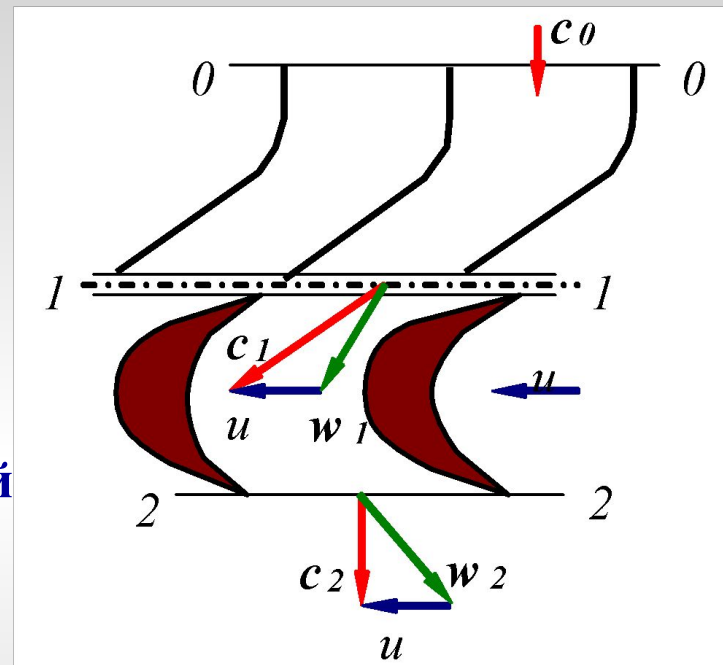
В теории турбомашин входной и выходной треугольники скоростей рассматриваются приведенными к одной точке

Степенью реактивности называется отношение теплоперепадов, перерабатываемых в рабочей решетке к общему теплоперепаду ступени:

$$\rho = \frac{h_p}{h_i + h_\delta} = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2}$$

h_p – теплоперепад, срабатываемый в рабочей решетке; $h_p = h_1 - h_2$, Дж/кг;

h_n – теплоперепад, перерабатываемый в направляющей решетке: $h_n = h_0 - h_1$, Дж/кг;



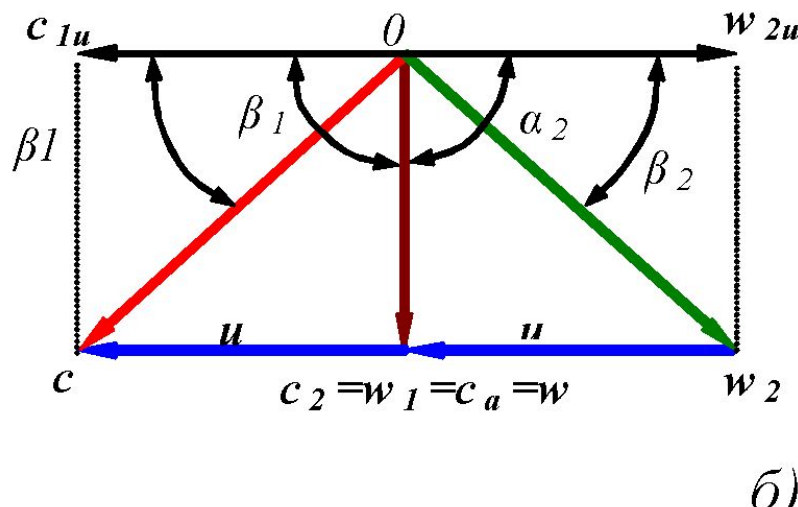
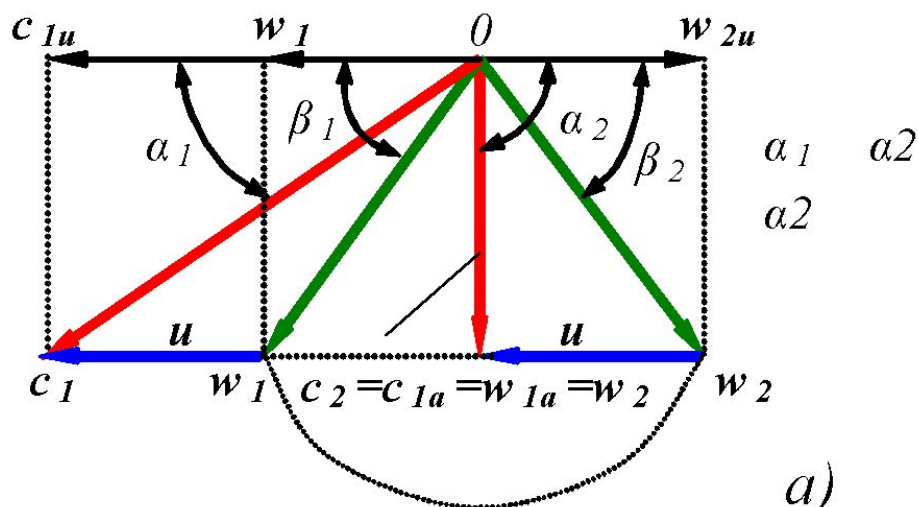
Приведенные треугольники скоростей ступени давления турбомашины

На рис. *а* представлены треугольники скоростей активной ступени давления со степенью реактивности $\rho = 0$ или близко к нулю.

На рис. *б* реактивной ступени давления со степенью реактивности $\rho = 0,5$.

В направляющей решетке происходит увеличение скорости от c_0 до c_1 .

В рабочей решетке производится механическая работа при неизменном (активная ступень) или изменяющемся (реактивная) давлении за счет уменьшения скорости от c_1 до c_2 .

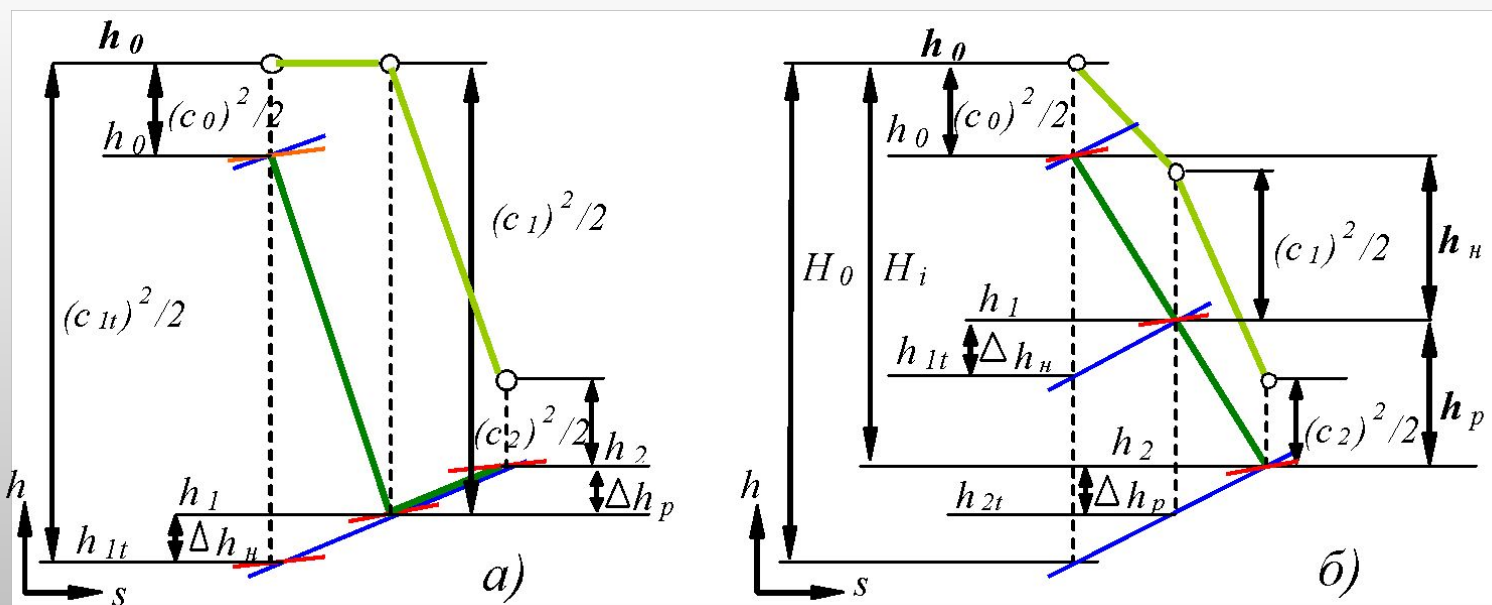


Теплоперепады энтальпий в активной и реактивной ступенях давления

Потери в направляющей Δh_n и рабочей Δh_p решетках происходят с увеличением энтропии s при адиабатическом процессе.

В направляющей решетке активной ступени давления полная энтальпия h_0 сохраняется неизменной при уменьшении статической энтальпии рабочей среды от h_0 до h_1 ,

В реактивной ступени давления турбины (б) изменения полной h и статической h энтальпий происходит как в направляющей, так и в рабочей решетках. При этом в этих решетках происходит последовательное изменение давления и скорости рабочей среды.



Работа турбинной ступени

Общий теплоперепад может быть использован в качестве определения удельной механической работы турбинной ступени:

$$l_{1,2} = \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$$

Уравнение удельной работы турбинной ступени давления можно представить в виде **уравнения Эйлера**:

$$l_{1,2} = u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}$$

Мощность ступени давления турбины, Вт: $N = G l_{1,2} = G (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})$

Располагаемый теплоперепад: $H_0 = H_i + \Delta h_i + \Delta h_\delta + \Delta h_{\hat{a}, \tilde{n}}$

H_i –внутренний теплоперепады ступени, Дж/кг ;

$\Delta h_{\hat{a}, \tilde{n}}$ - потери с выходной скоростью, Дж/кг; $\Delta h_{\hat{a}, \tilde{n}} = \tilde{n}_2^2 / 2$;

Относительный внутренний к.п.д. ступени турбины:

$$\eta_{oi} = \frac{H_i}{H_0} = \frac{H_i}{H_i + \Delta h_i + \Delta h_\delta + \Delta h_{\hat{a}, \tilde{n}}}$$

Описание тепловой схемы паровой турбины

При производстве электроэнергии паровая турбина прямой и обратной связью связана с котлом.

Схема, на которой показаны основные пароводяные потоки, называется принципиальной тепловой схемой энергоустановки.

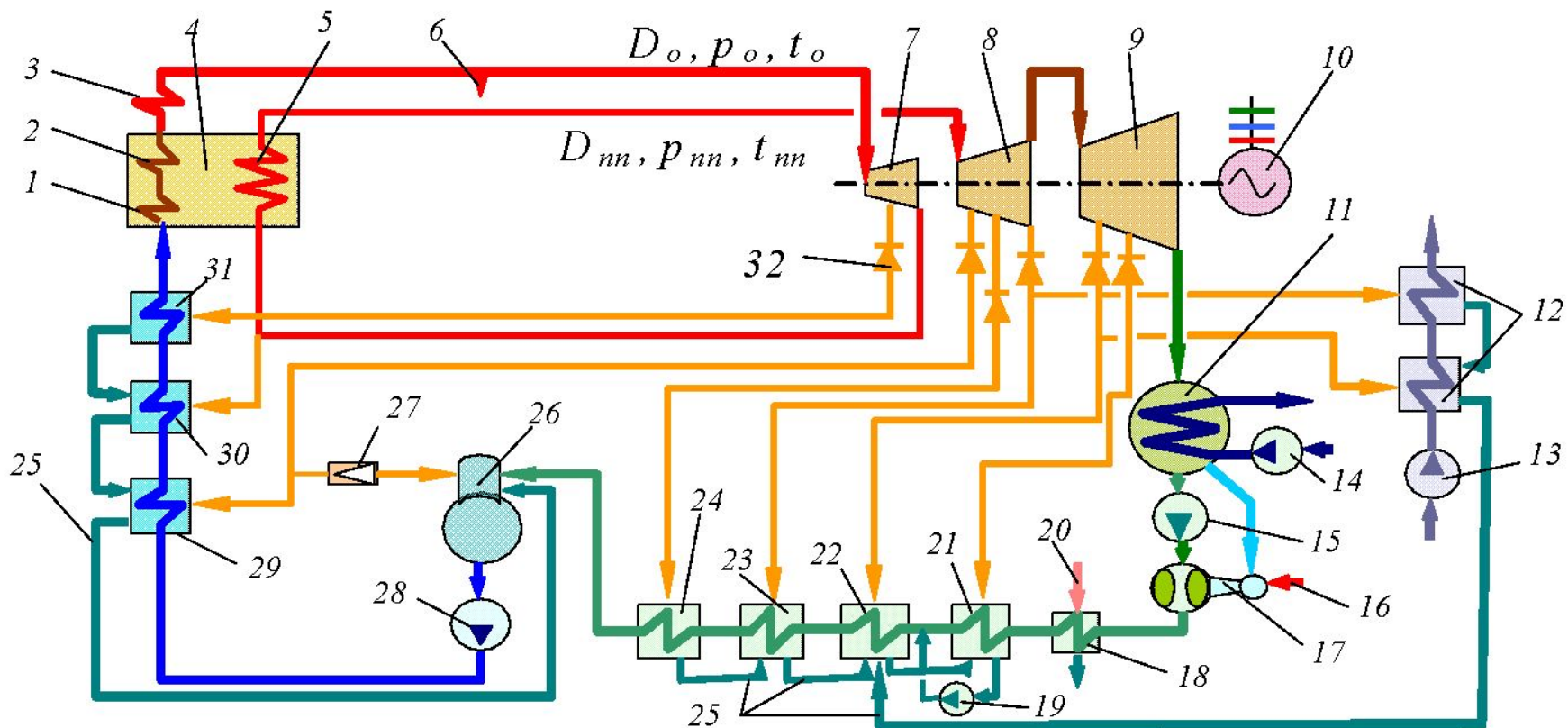
Энергоустановка, работающая по циклу «котел - турбина – котел» без связей с соседними энергоустановками, называется энергоблоком.

Если котел выдает пар на общий паропровод для нескольких турбин, то в этом случае тепловая схема энергоустановки называется с поперечными связями.

Тепловую схему энергоблока представляют в виде отдельных систем:

- Собственно турбинная установка, состоящая из нескольких частей – цилиндров, системы смазки, регулирования и т.д.
- Конденсационная установка включает в себя конденсатор, конденсатный насос, эжекторы, циркуляционные насосы и др.
- Система регенерации паротурбинной установки состоит из подогревателей низкого давления, деаэратора, питательного насоса, системы подогревателей высокого давления.
- Система сетевых подогревателей.

Принципиальная тепловая схема энергоустановки



1, 2, 3 – поверхности нагрева котла; 4 - котел; 7, 8, 9 – части высокого (ЧВД), среднего (ЧСД), низкого (ЧНД) давлений; 10 – электрогенератор; 11 – конденсатор; 12 – сетевые подогреватели; 14 - циркуляционный насос; 15 – конденсатный насос; 21, 22, 23, 24 – подогреватели низкого давления: ПНД-1, ПНД-2, ПНД-3, ПНД-4; 26 – деаэратор; 28 – питательный насос; 29, 30, 31 – подогреватели высокого давления: ПВД-1, ПВД-2, ПВД-3.

Часть высокого давления турбины

Современные паровые турбины выполняются из трех частей с активными ступенями давления : ЧВД, ЧСД, ЧНД.

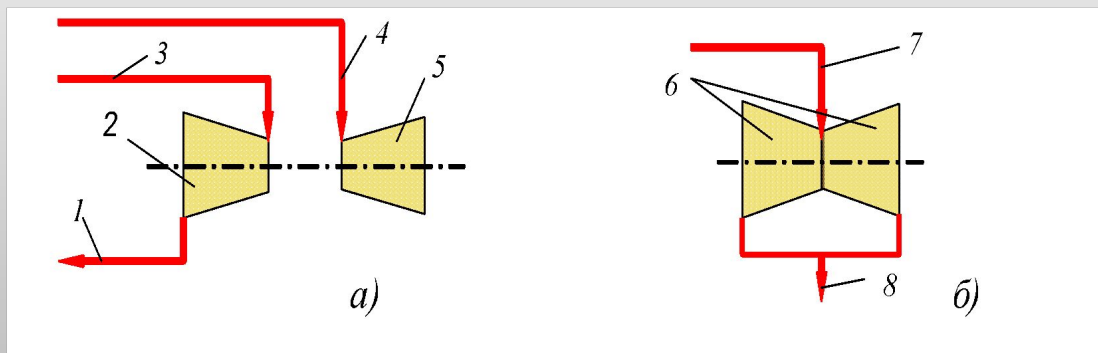
В **ЧВД** происходит расширение пара от 24 МПа до $3,0 - 3,5 \text{ МПа}$ и от температур 545°C до $300 - 340^\circ\text{C}$.

Большие давления требуют толстостенного выполнения корпуса, а перепад температур – продуманную систему расширения металла турбины. При этом приходится учитывать, что ротор турбины удлиняется и быстрее и на бóльшую длину, чем корпус.

Конструктивно корпус выполняется так, чтобы разность температур между соседними точками, как при работе, так и при пусках – остановах не превышала $40 - 50^\circ\text{C}$. Для этого сопловые и направляющие решетки в диафрагмах набираются в обоймы по 4 – 5 штук в одной.

Степень реактивности в ступенях ЧВД не превышает 1 – 2 %.

Метал ЧВД выполняется из легированной стали.



ЧСД и ЧНД паровой турбины

Часть среднего давления характеризуется изменением давления от 3 МПа до примерно атмосферного. Изменения температур в ЧСД от 545°C до $300 - 340^{\circ}\text{C}$.

Для предотвращения возможности термических напряжений металла диафрагмы сопловых и направляющих решеток здесь также набираются в обоймы.

Корпус выполняется меньшей толщины и из углеродистой стали.

Степень реактивности также как и в ЧВД равна 1 – 2 %.

Чтобы компенсировать осевые усилия от давления пара, в современных турбинах поток пара направляется в противоположные стороны.

Корпус **части низкого давления** выполнен из простых металлоконструкций.

Основное для ЧНД – это компенсировать осевые усилия, так как степень реактивности для последних ступеней доходит до 20 – 30 %.

Поэтому при делении ЧНД на потоки их направляют в противоположные стороны

Конденсационная установка

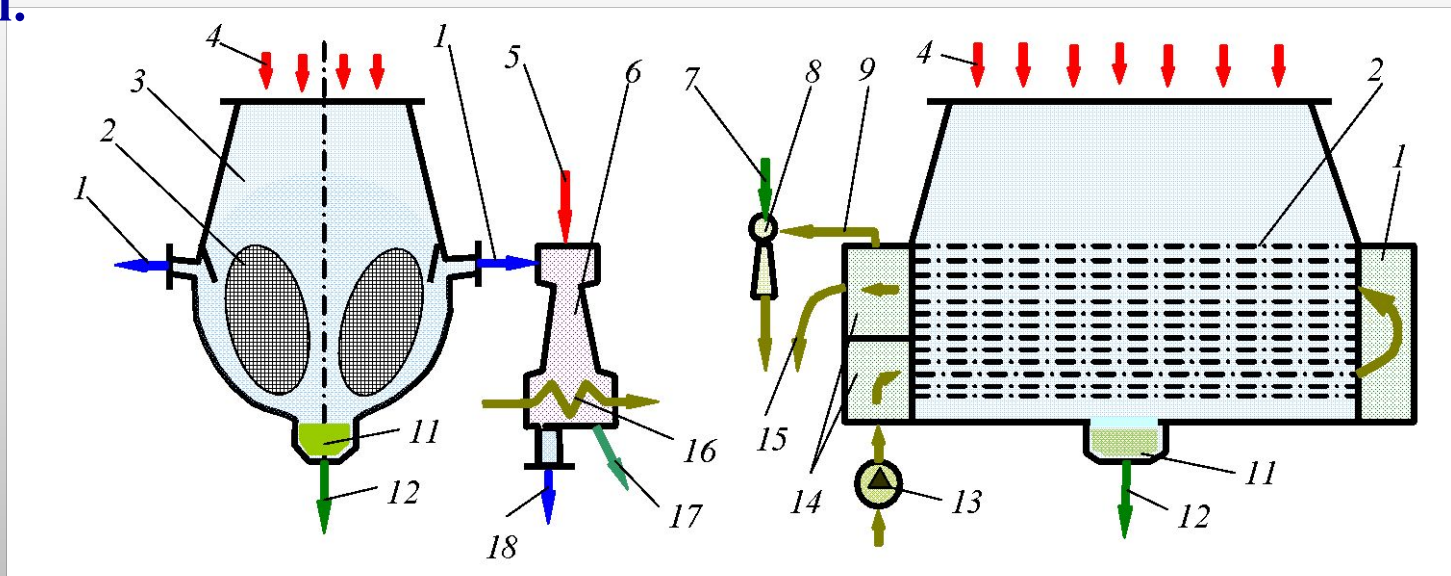
В конденсационной установке происходит конденсация отработавшего в турбине пара при искусственно созданном вакууме.

Параметры в конденсаторе при номинальном режиме:

давление $p_k = 0,003 - 0,005 \text{ МПа}$; температура $t_k = 26 - 28 ^\circ\text{C}$.

Чтобы охлаждающая вода не попадала в конденсат, давление охлаждающей воды должно быть минимальным. Для этого в верхней части выходной камеры по охлаждающей воде устанавливается инжектор.

Конденсатор устанавливается на пружинных опорах. При расширении конденсатор перемещаться ему вниз относительно неподвижной оси турбины.



Система регенерации паротурбинной установки

Подогрев конденсата, а после деаэратора, питательной воды производится в системе регенерации для повышения экономичности энергоустановки.

Он происходит в нескольких подогревателях низкого давления (ПНД) и подогревателях высокого давления (ПВД). Подогрев осуществляется от температур конденсата $t_k = 20 - 30^\circ\text{C}$ до $200 - 280^\circ\text{C}$ после ПВД.

Разбивка подогрева воды в подогревателях связана с выбором числа отборов турбины, количество которых обосновывается технико – экономическим расчетом.

Обычно повышение температуры воды в одном подогревателе ПНД осуществляется на $\Delta t_{\text{ПНД}} = 20 - 25^\circ\text{C}$, а в ПВД на $\Delta t_{\text{ПВД}} = 30 - 35^\circ\text{C}$.

В деаэраторе также происходит повышение температуры воды на $13 - 15^\circ\text{C}$. При этом в деаэраторе температура воды t_d должна быть равной температуре насыщения при рабочем давлении, которое при закритических параметрах пара поддерживается равным $0,7 \text{ МПа}$, а при докритическом – $0,6 \text{ МПа}$.

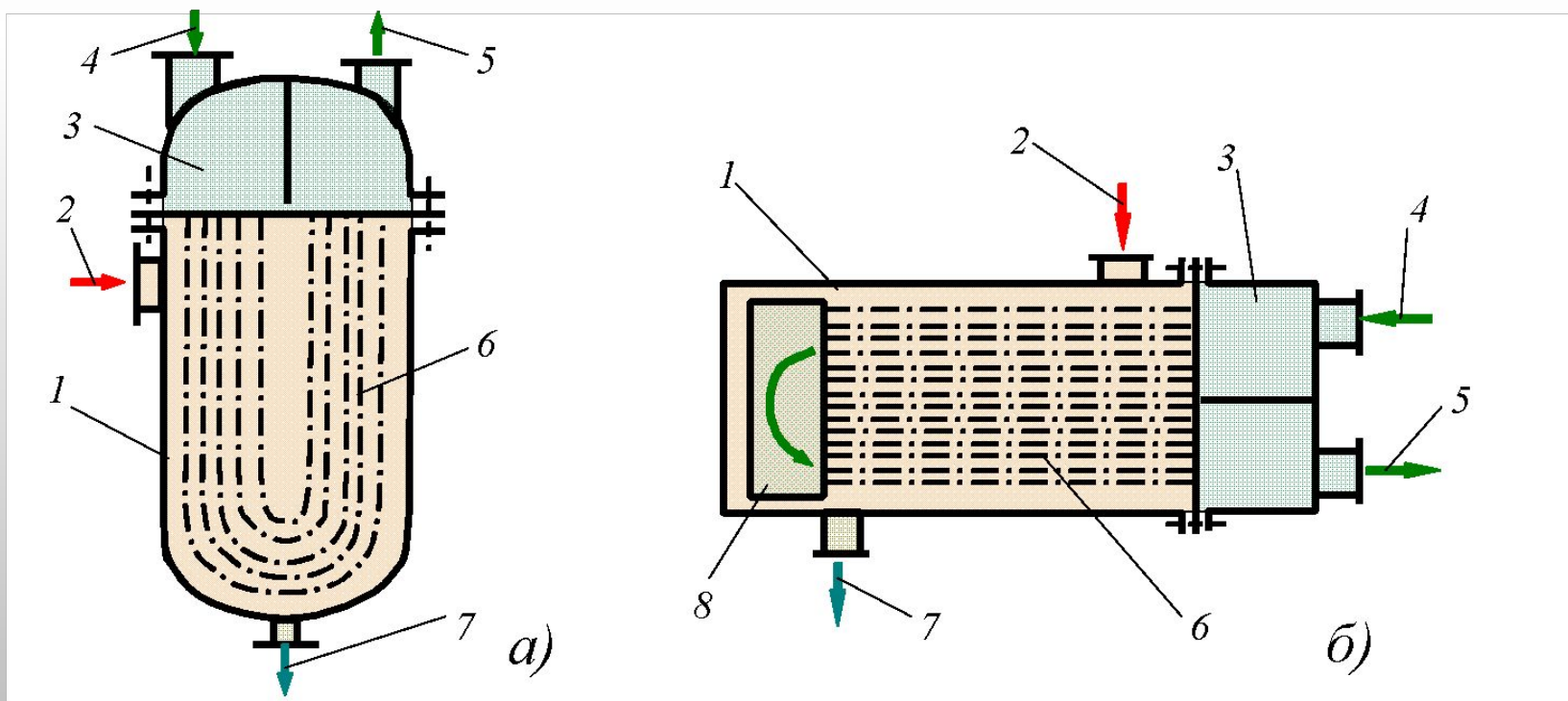
Конденсат после конденсатора подогревается также в охладителях эжекторов и в охладителях пара уплотнений на $2 - 4^\circ\text{C}$.

Конструкции подогревателей

Конструктивно подогреватели выполняются вертикальными, горизонтальными.

Они могут быть с противотоком, прямотоком и поперечным током теплоносителей.

Конструкции ПВД более сложные. Они должны иметь три ступени. В первой ступени пар охлаждается до температуры насыщения. Во второй происходит конденсация пара, а в третьей - охлаждение конденсата пара.



Тепловой и материальный балансы подогревателей

При анализе и расчетах подогревателей используется тепловой и материальный балансы. Тепловой баланс поверхностного подогревателя:

$$D_{\hat{a}}(h_{\hat{a}2} - h_{\hat{a}1}) = G_{\hat{i}}(h_{\hat{i}1} - h_{\hat{i}2})\eta$$

$D_{\hat{a}}, G_{\hat{n}}$ – расходы воды и пара, кг/с;

$t_{\hat{e}1}, t_{\hat{n}1}$ – температура воды и пара перед теплообменником, °С;

$t_{\hat{e}2}, t_{\hat{n}2}$ – температура воды и пара за теплообменником, °С;

$h_{\hat{e}1}, h_{\hat{n}1}$ – энтальпия воды и пара перед теплообменником, кДж/кг;

$h_{\hat{e}2}, h_{\hat{n}2}$ – энтальпия воды и пара после теплообменника, кДж/кг;

η – коэффициент полезного действия теплообменника.

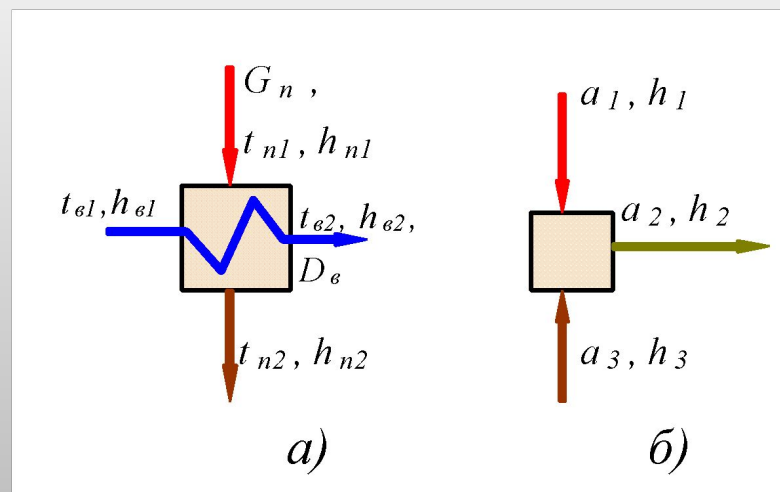
Тепловой и массовый балансы для смешивающего

теплообменника; $a_3 = a_2 h_2$;

$$a_1 + a_3 = a_2 \cdot$$

a_1, a_2, a_3 – доли потоков входящих и выходящих из теплообменника;

h_1, h_2, h_3 – энтальпии рабочих сред входящих и выходящих из теплообменника, кДж/кг.

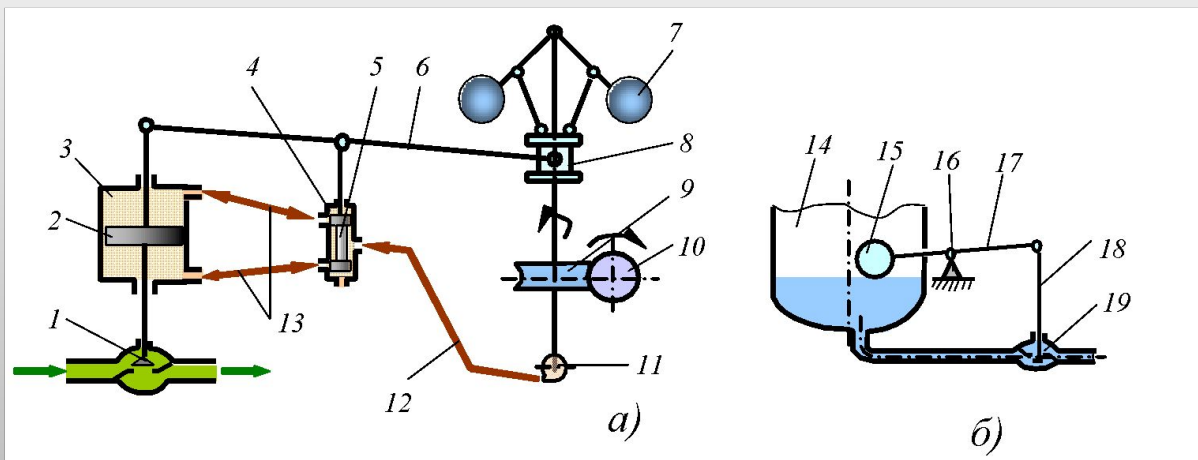


Автоматическое регулирование рабочих параметров турбины

Автоматическое регулирование турбинных установок, также как и котельных установок, имеет различное назначение:

- поддержание рабочих параметров;
- обеспечение режимов пуска и останова;
- различные защиты.

Основным параметром, который необходимо поддерживать на паровой турбоустановке – число оборотов в минуту ротора турбины и генератора. Оно связано с частотой переменного тока сети, на которую работает генератор. Частота электрического тока – 50 Гц , что соответствует скорости вращения ротора турбоустановки 3000 об/мин . Частота вращения ротора поддерживается центробежными регуляторами различной конструкции.



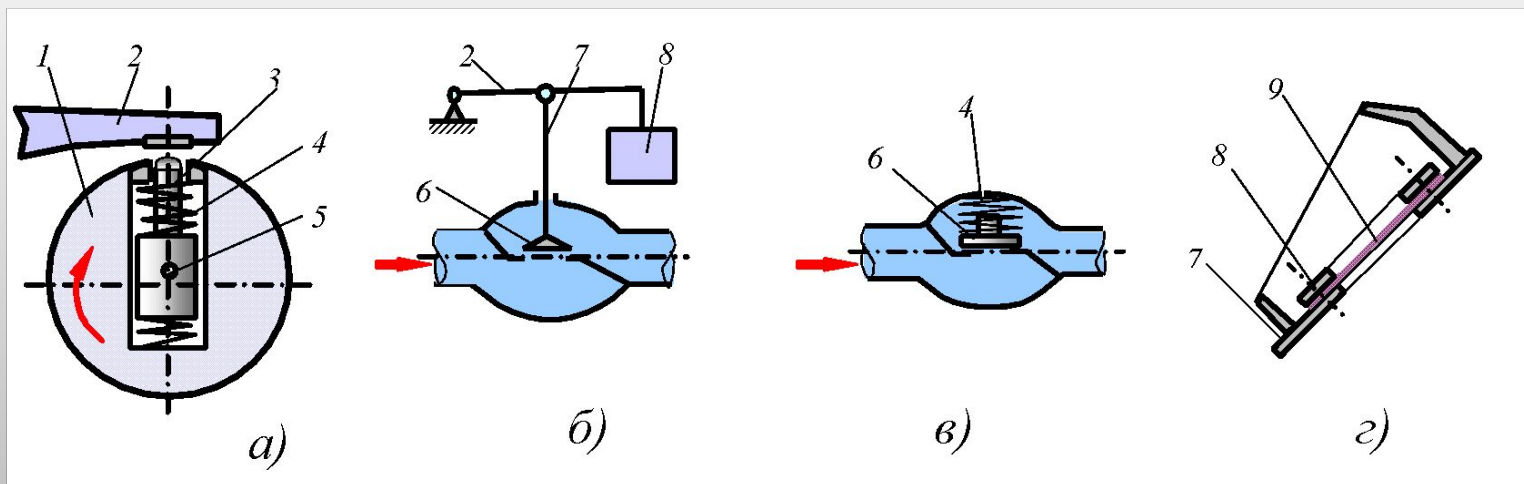
Защиты паротурбинной установки

Для турбинных установок большое значение имеют защиты:

- защита от повышения числа оборотов ротора турбины;
- защита от повышения давления в трубопроводах и конденсаторе;
- защита от попадания воды через отборы в проточную часть турбины.

С увеличением мощности энергоагрегатов возросло количество контролируемых параметров.

Появилась необходимость не только контролировать и поддерживать параметры, но и управлять ими на основе единства технологического процесса энергоагрегата с использованием единой автоматизированной системы управления тепловыми процессами ТЭС (АСУ ТП ТЭС).



АСУ ТП тепловой электростанции

АСУ ТП ТЭС позволяет управлять технологическим процессом энергоагрегата в целом, а не по отдельным частям.

АСУ ТП ТЭС позволяет также управлять операциями пуска и останова энергоагрегата.

По сути АСУ ТП ТЭС является математической моделью энергоагрегата и всей электростанции, на базе которой и строится процесс управления энергооборудованием.

АСУ ТП ТЭС имеет не только функции управления, но и информации.



Информационные функции АСУ ТП ТЭС

Информационные функции АСУ ТП ТЭС следующие:

1. Оперативный контроль технологических параметров. Он может быть индивидуальным, избирательным и множественным.
2. Технологическая сигнализация может быть световая (на табло), звуковая и цветовая (на ЭВМ).
3. Расчетом технико-экономических показателей на основе поступающей информации на ЭВМ обсчитываются оптимальные процессы.
4. Определение достоверности информации. Проверка достоверности осуществляется с помощью дублирующих приборов.
5. Регистрация аварийных положений, для того чтобы можно было бы после этого проводить их анализ.

Функции управления АСУ ТП ТЭС:

1. Статическая оптимизация с целью поддержания максимального к.п.д. работы энергоагрегата.
2. Динамическая оптимизация технологических процессов – поддержание оптимальных переходных процессов.
3. Поддержание оптимальных операций переключения и отключения отдельных элементов оборудования.

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)

Благодарю за внимание

Ефимов Николай Николаевич – проф., д.т.н., зав
каф. ТЭС