



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 9. Циклы паротурбинных установок

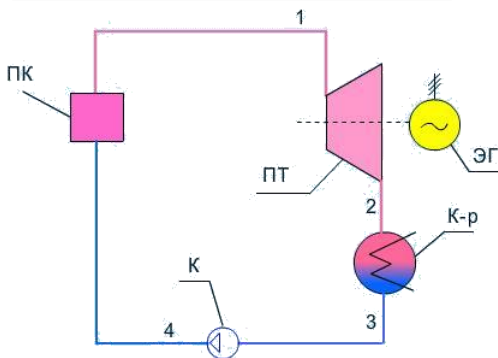
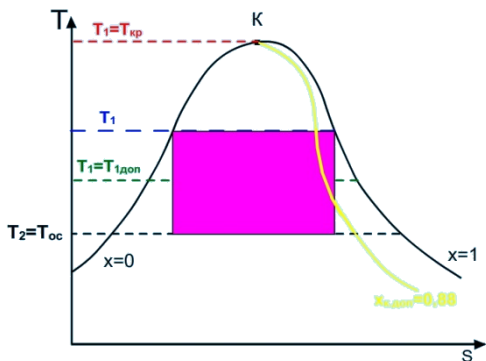


Схема паротурбинной
установки на влажном
насыщенном водяном паре:
ПК – паровой котел, ПТ –
паровая турбина; К-р –
конденсатор паровой
турбины; К – компрессор; ЭГ
– электрический генератор

Паротурбинный цикл
Карно (схема установки на
рисунке) теоретически
можно реализовать в
области влажного
насыщенного пара.

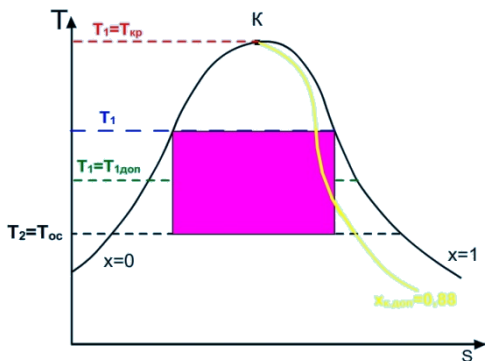
В этой области изотермы
водяного пара также
являются и изобарами.

Значение нижней
температуры T_2 в цикле



Значение нижней температуры T_2 в цикле ПТУ близко к температуре окружающей среды ($T_2 = T_{oc}$) поскольку охлаждение

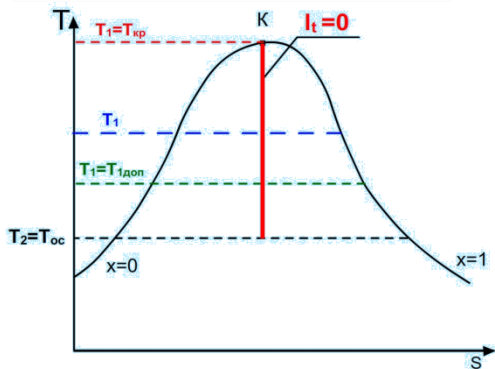
рабочего тела в ПТУ осуществляется водой рек, прудов охладителей и т.п. Следовательно, термический КПД данного цикла в основном определяется температурой горячего источника теплоты T_1 .



Максимальное значение $T_1 = T_{кр}$, т.к. при больших значениях T_1 практически осуществить изотермический подвод теплоты к водяному пару

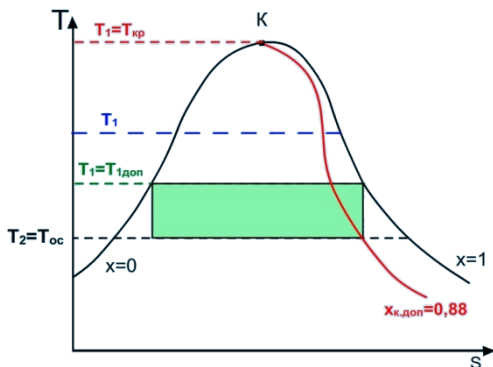
технически очень сложно.

При критическом значении температуры $T_1 = 646$ К и $T_2 = 293$ К КПД цикла Карно равен 54,7%. Это большое значение КПД, по сравнению с современными ПТУ.



Однако в этом случае получается парадокс – при большом КПД работа цикла равна нулю, а цикл Карно в T,s - диаграмме вырождается в вертикальную прямую.

В таком цикле работа расширения пара в турбине равна работе сжатия пара в компрессоре и КПД цикла не может отражать его экономичность.



При меньших значениях температуры $T_1 < T_{кр}$ работа цикла Карно больше нуля, однако и в этом случае имеется ограничение по температуре T_1 , вызванное

необходимостью иметь влажность пара на выходе из паровой турбины не более 12 % ($x_{к,доп} = 0,88$).

При больших влажностях пара происходит быстрое разрушение последних ступеней турбины.

Если выполнить это ограничение по $T_1 = T_{1доп}$, КПД цикла Карно будет иметь значение 24 %.



Это очень низкое значение КПД для современных энергетических установок. Однако практическая реализация и такого цикла Карно в области влажного пара невозможна еще и по причине сложности технической реализации адиабатного сжатия пара в компрессоре с одновременным фазовым переходом пара в жидкость. При переходе пара в жидкость в таком процессе происходит резкое уменьшение объема воды, что приведет к гидравлическим ударам в компрессоре и его разрушению.

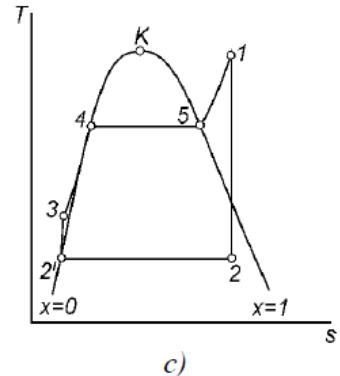
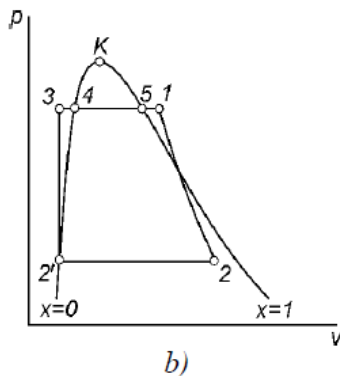
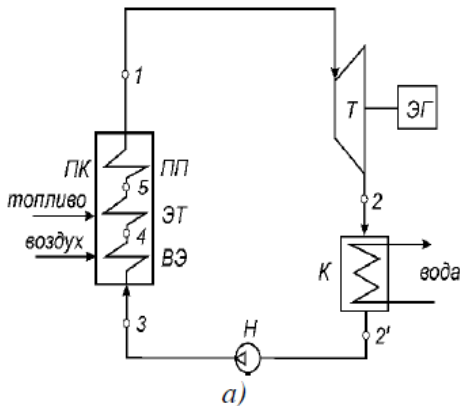


Исходя из вышеприведенного анализа следует, что практическая реализация цикла Карно в области влажного насыщенного пара технически невозможна и нецелесообразна.



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

Проблемы практической реализации цикла ПТУ были решены в пятидесятых годах XIX века шотландским инженером-физиком У. Ренкиным и немецким ученым Р. Клаузиусом. Они предложили цикл ПТУ на перегретом водяном паре и сжатии рабочего тела в жидкой фазе. Схема и цикл такой ПТУ представлена на следующем экране.



ПК – паровой котел, ПП – пароперегреватель, ЭТ – экранные (испарительные) трубы парового котла, ВЭ – водяной экономайзер, Т – паровая турбина, К – конденсатор, Н – насос, ЭГ – генератор электрического тока



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

Сжатие рабочего тела в жидкой фазе позволило не только избежать проблем, связанных со сжатием паровой фазы воды, но и значительно снизить затраты работы на привод насоса по сравнению с затратами на привод парового компрессора.

Использование перегретого пара в этом цикле ПТУ сместило процесс паровой турбины в область допустимой конечной влажности пара.



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

Благодаря этим нововведениям практическая реализация такого цикла стала технически осуществима.

Термический КПД такой ПТУ меньше, чем у цикла Карно при $T_1=T_0$ и $T_2=T_{oc}$, поскольку температуры холодных источников теплоты у обоих циклов одинаковы и близки к температуре окружающей среды, а среднетермодинамическая температура подвода теплоты к рабочему телу у цикла Ренкина намного меньше T_0 .



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

Однако если сравнить КПД аналогичных необратимых циклов, то окажется, что внутренний абсолютный КПД цикла Ренкина будет больше, чем внутренний абсолютный КПД цикла Карно. Такой неожиданный результат сравнения КПД объясняется тем, что влияние необратимости в процессе адиабатного сжатия воды в цикле Карно значительно больше, чем в цикле Ренкина.



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

Например, при $T_1=T_o=673$ К и $T_2=T_{oc}=305$ К

$$\eta_t^K = 0,547 > \eta_t^P = 0,41, \text{ а}$$

$$\eta_{oi}^K = 0,01 < \eta_{oi}^P = 0,364,$$

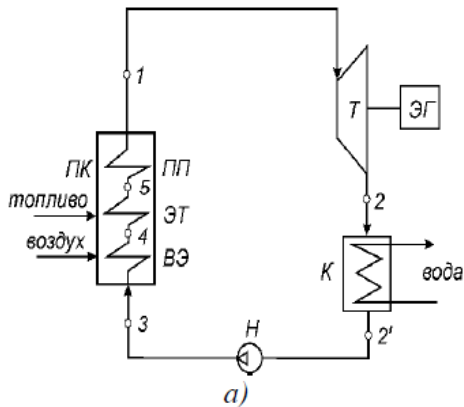
при этом затраты работ на привод насосов соответствующих циклов составят:

$$l_H^K = 1200 \text{ кДж/кг и } l_{Hi}^K = 1510 \text{ кДж/кг,}$$

$$l_H^P = 10 \text{ кДж/кг и } l_{Hi}^P = 12,5 \text{ кДж/кг.}$$



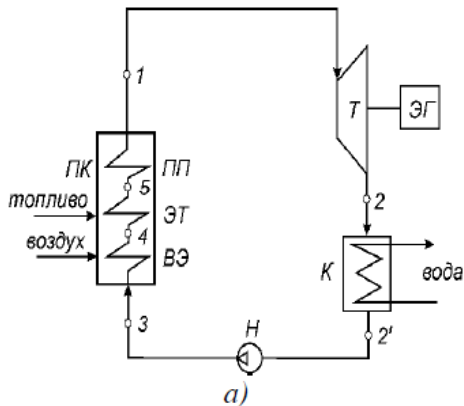
Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости



Итак, вернемся к схеме ПТУ и диаграммам цикла. Назначение основных элементов ПТУ следующее: Паровой котел **ПК** предназначен для изобарного подвода теплоты к рабочему телу (вода) за счет охлаждения продуктов сгорания органического топлива;



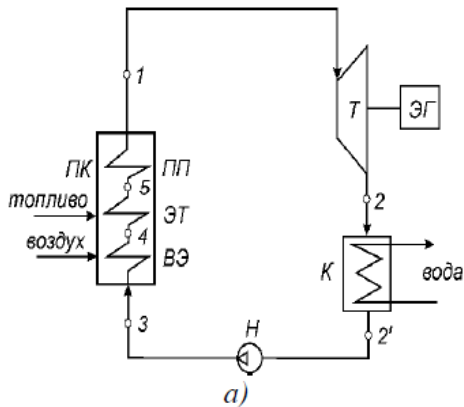
Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости



Паровая турбина *ПТ* предназначена для преобразования тепловой энергии в техническую работу, что достигается последовательным преобразованием работы изменения давления в потоке в кинетическую энергию потока в сопловых каналах турбины.



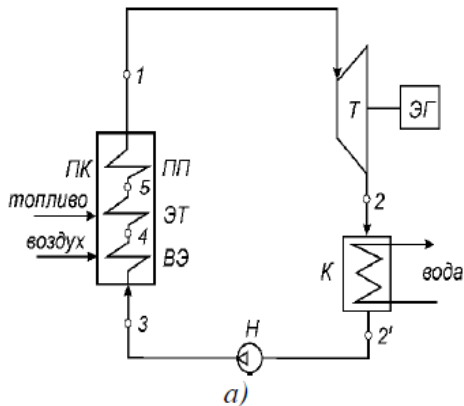
Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости



На рабочих лопатках турбины кинетическая и тепловая энергия потока преобразуется в механическую работу вращения вала турбины;



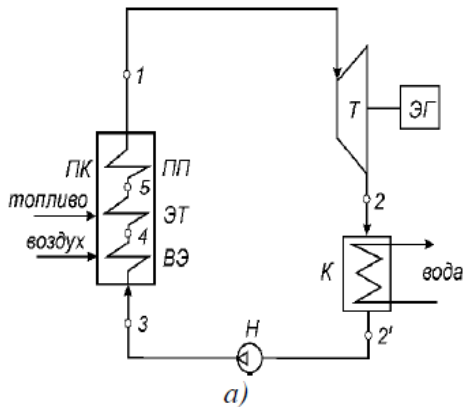
Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости



Конденсатор паровой турбины **К** предназначен для изобарного отвода теплоты от рабочего тела во внешнюю среду посредством циркулирующей по трубам воды, взятой из внешнего водоема.



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

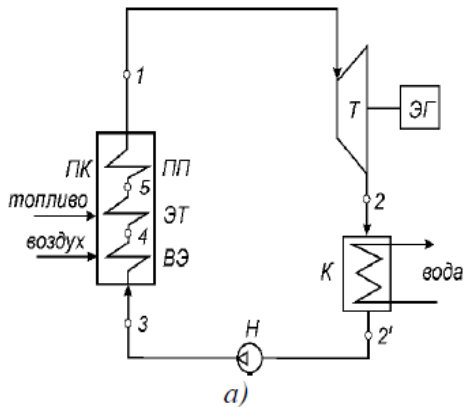


В результате конденсации пара в конденсаторе уменьшается удельный объем рабочего тела и создается вакуум, что и позволяет получить техническую работу (работу изменения давления в потоке) в турбине

за счет наличия разности давлений потока на входе и выходе из турбины;



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

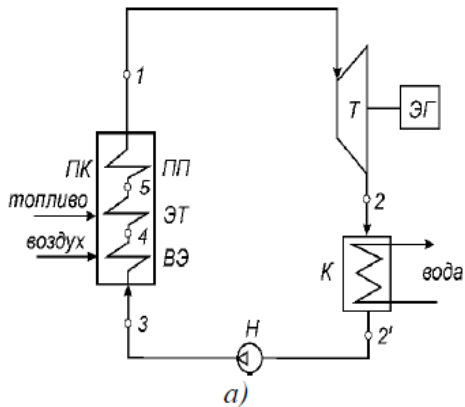


Питательный насос H предназначен для создания необходимого давления рабочего тела в паровом котле и для транспорта его по контуру ПТУ. На привод питательного насоса

затрачивается техническая работа.



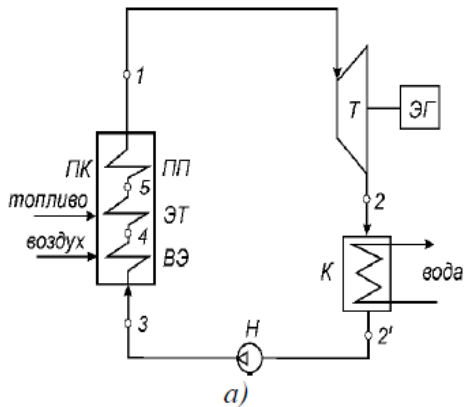
Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости



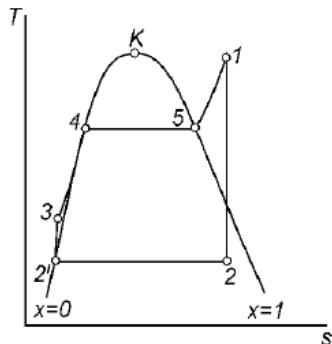
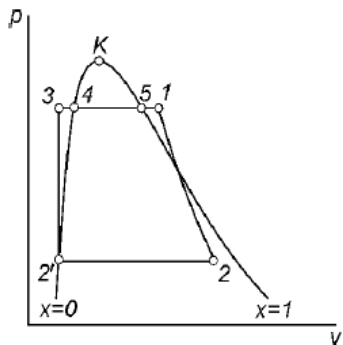
На рисунке паровой котел представлен в виде трех основных элементов подвода теплоты к рабочему телу: в экономайзере **ВЭ** вода нагревается до состояния насыщения,



Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости

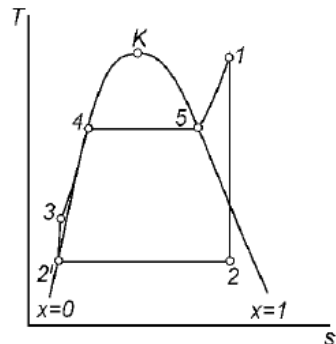
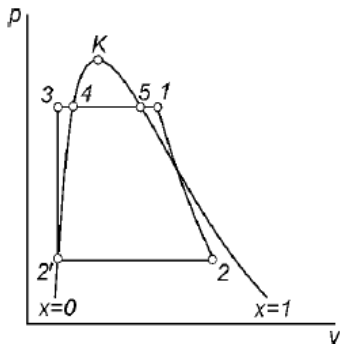


на испарительной поверхности **ЭТ** вода переводится из жидкой фазы в паровую в состоянии насыщения, в пароперегревателе **ПП** получается пар с температурой выше температуры насыщения.



Теперь перейдем собственно к циклу. Теплота, подводимая к воде и водяному пару в паровом котле (процессы: 3–4 – нагрев воды до кипения, 4–5 – испарение воды, 5–1 – перегрев пара) равна

$$q_1 = h_1 - h_3$$

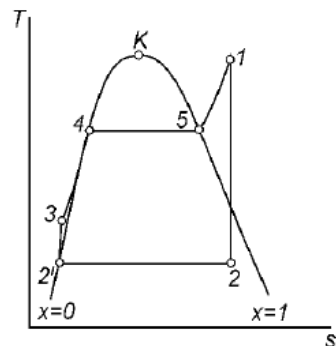
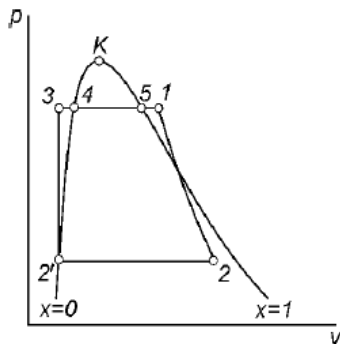


Отводимая теплота от водяного пара при его конденсации в конденсаторе (процесс 2–2') равна

$$q_2 = h_2 - h_{2'}$$

Работа, получаемая в турбине, является внешней работой адиабатного процесса расширения 1–2

$$l_T = h_1 - h_2$$



Работа, затрачиваемая на сжатие конденсата в насосе, с учетом того, что процесс сжатия является адиабатным и одновременно изохорным вследствие несжимаемости жидкости

$$l_H = h_3 - h_{2'} \text{ или } l_H = v_{2'}(p_1 - p_2)$$

Полезная работа обратимого цикла (площадь цикла в p v - и T s -диаграммах) равна

$$l = q_1 - q_2 \text{ или } l = l_T - l_H$$



Термический КПД обратимого цикла Ренкина

$$\eta_t = \frac{l}{q_1}.$$

В практических расчетах можно пренебречь работой насоса, которая вследствие несжимаемости жидкости, мала по сравнению с работой турбины, тогда:

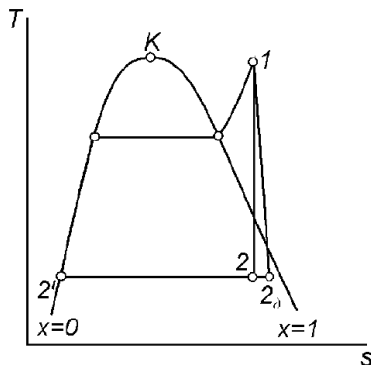
$$q_1 = h_1 - h_{2'}, l = l_T = h_1 - h_2,$$
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_2 - h_{2'}}{h_1 - h_{2'}}, \eta_t = \frac{l}{q_1} = 1 - \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}}.$$



Термический КПД зависит от трех параметров p_1 , t_1 , p_2 . Он увеличивается с повышением давления пара p_1 в паровом котле, с увеличением температуры перегрева пара t_1 и с уменьшением давления пара p_2 в конденсаторе. В современных мощных ПТУ применяются параметры пара $p_1 = (23,5 \div 24)$ МПа, $t_1 = (535 \div 565)$ °С, $p_2 = (3 \div 5)$ кПа, $t_s = (25 \div 35)$ °С.



Переход на более высокие параметры p_1, t_1 определяется уровнем развития металлургии. Использование более низких давлений p_2 ограничено температурой охлаждающей воды, которая в летнее время равна ~ 20 °С.



Термический КПД ПТУ
характеризует термодинамиче-
ское совершенство обратимого
цикла **1-2-2'**

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{N}{Q_1},$$

где $N = l \cdot G = G(h_1 - h_2)$ – мощность
обратимого цикла, кВт; G - массовый расход
пара, кг/с; $Q_1 = q_1 \cdot G = G(h_1 - h_{2'})$ – тепловая
мощность парового котла, кВт.



Внутренний относительный КПД цикла, характеризующий относительное термодинамическое совершенство действительного цикла по сравнению с обратимым, определяется по формуле

$$\eta_{oi} = \frac{l_i}{l} = \frac{N_i}{N} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{h_1 - h_2},$$

где $N_i = l_i \cdot G$ – мощность действительного цикла, кВт.



Потери тепла в паровом котле (от химического и механического недожога топлива, от теплообмена с окружающей средой, с уходящими газами и др.) характеризуются КПД парового котла

$$\eta_{\text{ПК}} = \frac{q_1}{q'} = \frac{Q_1}{Q'} = \frac{Q_1}{B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}},$$

где q' – теплота, где выделившаяся при сгорании топлива, отнесенная к 1 кг пара, кДж кг;

$Q = B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ – тепловой эффект реакции горения топлива, кВт; B – массовый расход топлива, кг/с,

Q_{H}^{P} – теплота сгорания топлива, кДж кг.



Механические потери (потери на трение между деталями, затраты энергии на привод масляного насоса, осуществляющего смазку) характеризуются механическим КПД

$$\eta_{\text{м}} = \frac{l_e}{l_i} = \frac{N_e}{N_i}$$

где l_e – эффективная работа (на валу турбины), кДж/кг; $N_e = l_e \cdot G$ – эффективная мощность, кВт.



Все потери в ПТУ (без учета потребителя энергии) характеризуются эффективным КПД

$$\eta_e = \frac{l_e}{q'} = \frac{N_e}{Q'} = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^p},$$

$$\eta_e = \eta_{ПК} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m.$$

Все потери в энергетической установке, вырабатывающей электрическую энергию, учитываются электрическим КПД

$$\eta_e = \frac{l_э}{q'} = \frac{N_э}{B \cdot Q_H^p}$$



$$\eta_{\text{э}} = \eta_e \cdot \eta_{\text{Г}},$$

где $l_{\text{э}}$ – электрическая работа;

$N_{\text{э}} = l_{\text{э}} \cdot G$ – электрическая мощность;

$\eta_{\text{э}} = \frac{l_{\text{э}}}{l_e} = \frac{N_{\text{э}}}{N_e}$ – КПД генератора, учитывающий

механические и электрические потери в генераторе.



Пределы изменения приведенных выше КПД

$$\eta_{\text{ПК}} = 0,9 \div 0,96;$$

$$\eta_t = 0,4 \div 0,5;$$

$$\eta_{oi} = 0,8 \div 0,9;$$

$$\eta_{\text{М}} = 0,97 \div 0,99;$$

$$\eta_{\Gamma} = 0,99;$$

$$\eta_{\text{Э}} = 0,35 \div 0,40;$$

Уравнение теплового баланса для ПТУ с циклом Ренкина

$$q' = l_{\text{Э}} + q_{\text{ПОТ}}^{\text{ПК}} + q_{\text{ПОТ}}^{\text{К}} + l_{\text{ПОТ}}^{\Gamma} + l_{\text{ПОТ}}^{\text{T}},$$

где $q_{\text{ПОТ}}^{\text{ПК}} = q'(1 - \eta_{\text{ПК}})$ – потери тепла в паровом котле;

$q_{\text{ПОТ}}^{\text{ПК}} = h_{2\partial} - h_{2'}$ – потери тепла в конденсаторе



$l_{\text{пот}}^{\Gamma} = l_e(1 - \eta_{\Gamma})$ – потери в
электрогенераторе;

$l_{\text{пот}}^{\text{T}} = l_i(1 - \eta_{\text{M}})$ – механические потери в
турбине.

Существуют возможности для уменьшения потерь в паровом котле за счет уменьшения перепада температур между источником тепла и рабочим телом.



Для увеличения электрического КПД применяют:

- увеличение параметров пара, вырабатываемого в ПК, путем перегрева пара в промежуточном пароперегревателе, что приводит к повышению средней термодинамической температуры подвода тепла и к увеличению η_t на $(2\div 3)\%$;
- регенеративный подогрев конденсата, подаваемого в ПК, что приводит к уменьшению q_2 и увеличению η_t и $\eta_{э}$ на $(12\div 15)\%$;



- комбинированные циклы (бинарные ПТУ, парогазовые установки, ПТУ с МГД-генератором).



Познакомимся с принципиальной тепловой схемой турбоустановки – структурной схемой оборудования пароводяного тракта, характеризующей процессы преобразования и использования теплоты.

Принципиальные схемы турбоустановок включают структурную схему турбины, схемы конденсационного устройства (в части тракта рабочего тела), регенеративного подогрева воды, включения теплофикационной установки и некоторые другие.



Простейшая схема ПТУ была показана выше. Применительно к атомным электростанциям эта схема имеет свои особенности. Аналогом парового котла в ПТУ ТЭС является ядерный реактор АЭС. Сама ПТУ АЭС принципиально не отличается от ПТУ ТЭС: она также содержит паровую турбину, конденсатор, систему регенерации, питательный насос, конденсатоочистку. Так же, как и ТЭС, АЭС потребляет громадное количество воды для охлаждения конденсаторов.



Практически вся мировая атомная энергетика базируется на корпусных реакторах. Как следует из самого названия, их главной особенностью является использование для размещения активной зоны толстостенного цилиндрического корпуса.

В свою очередь корпусные реакторы выполняют с водой под давлением (в английской транскрипции PWR – pressed water reactor, в русской ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор), и кипящие (BWR – boiling water reactor).



В водо-водяном реакторе циркулирует только вода под высоким давлением. В кипящем реакторе в его корпусе над поверхностью жидкости образуется насыщенный водяной пар, который направляется в паровую турбину. В России реакторы кипящего типа не строят. В корпусных реакторах и теплоносителем, и замедлителем является вода.



Альтернативой корпусным реакторам являются каналные реакторы, которые строили только в Советском Союзе под названием РБМК – реактор большой мощности каналный. Такой реактор представляет собой графитовую кладку с многочисленными каналами, в каждый из которых вставляется как бы небольшой кипящий реактор малого диаметра. Замедлителем в таком реакторе служит графит, а теплоносителем – вода.



Особенности тепловой схемы одноконтурной ПТУ связаны с радиоактивностью паров. В схеме таких ПТУ должны выполняться условия:

- 1) включение в тепловую схему испарителя для получения нерадиоактивного пара, подаваемого на уплотнения турбины;
- 2) использование промежуточного водяного контура между греющим паром и сетевой водой тепловых сетей.



Реакторы типа ВВЭР используют для строительства двухконтурных АЭС. Как следует из названия, такая АЭС состоит из двух контуров. Первый контур расположен в реакторном отделении. Он включает реактор, через который с помощью ГЦН прокачивается вода под давлением 15,7 МПа (160 ат). На входе в реактор вода имеет температуру 289 °С, на выходе – 322 °С. При давлении в 160 ат вода может закипеть только при температуре 346 °С и, таким образом, в первом контуре двухконтурной АЭС всегда циркулирует только вода без образования пара.

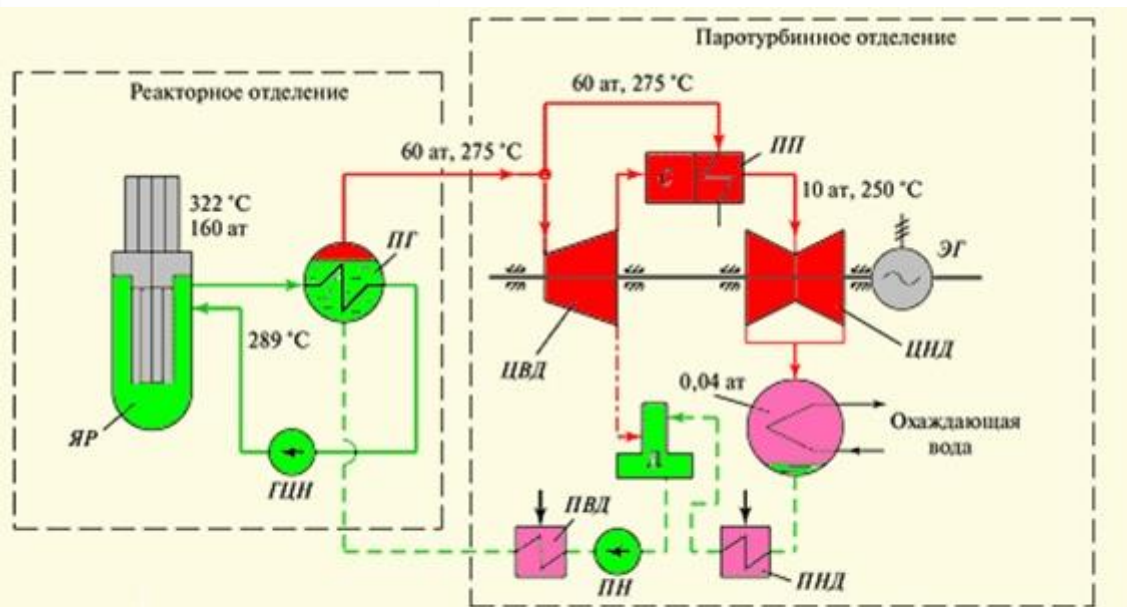


Схема двухконтурной АЭС с водо-водяным реактором типа ВВЭР (приведенные цифры относятся к ВВЭР-1000)



Из реактора ЯР вода с температурой $322\text{ }^{\circ}\text{C}$ поступает в парогенератор. Парогенератор – это горизонтальный цилиндрический сосуд (барабан), частично заполненный питательной водой второго контура; над водой имеется паровое пространство. В воду погружены многочисленные трубы парогенератора ПГ, в которые поступает вода из реактора.



С помощью питательного насоса ПН и соответствующего выбора турбины в парогенераторе создается давление существенно меньшее, чем в первом контуре (для реактора ВВЭР-1000 и турбины мощностью 1000 МВт это давление свежего пара $p_0 = 60 \text{ ат}$). Поэтому уже при нагреве до $275 \text{ }^\circ\text{C}$ вода в парогенераторе закипает.



Таким образом, в парогенераторе, являющимся связывающим звеном первого и второго контура (но расположенном в реакторном отделении), генерируется сухой насыщенный пар с давлением $p_0 = 60 \text{ ат}$ и температурой $t_0 = 275 \text{ }^\circ\text{C}$ (свежий пар). Если говорить строго, то этот пар — влажный, однако его влажность мала (0,5 %). И сейчас мы отмечаем первую особенность АЭС — низкие начальные параметры и влажный пар на входе в турбину.



Этот пар направляется в ЦВД паровой турбины. Здесь он расширяется до давления примерно 1 МПа (10 ат). Выбор этого давления обусловлен тем, что уже при этом давлении влажность пара достигает 10 – 12%, и капли влаги, движущиеся с большой скоростью, приводят к интенсивной эрозии и размывам деталей проточной части паровой турбины.

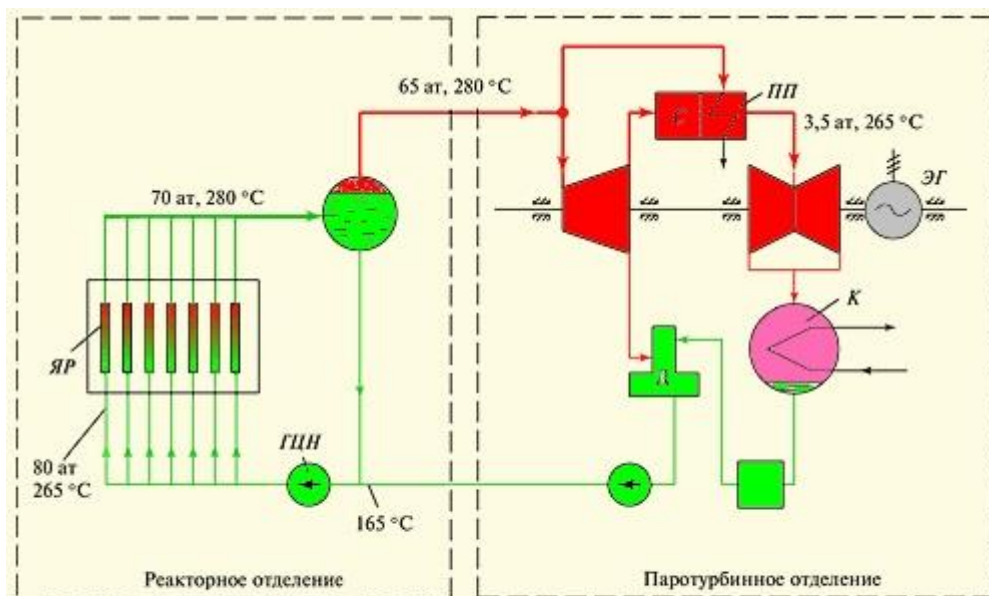
Поэтому из ЦВД пар направляется в сепаратор-пароперегреватель (СПП).



В сепараторе С от пара отделяется влага, и он поступает в пароперегреватель ПП, где его параметры доводятся до значений 10 ат, 250 °С. Таким образом, пар на выходе из СПП является перегретым, и эти параметры выбраны такими, чтобы получить допустимую влажность на выходе турбины, где угроза эрозии еще большая, чем за ЦВД. Пар с указанными параметрами поступает в ЦНД. Расширившись в ЦНД, пар поступает в конденсатор К, а из него в конденсатно-питательный тракт.



Важно отметить, что во втором контуре циркулирует нерадиоактивная среда, что существенно упрощает эксплуатацию и повышает безопасность АЭС.



**Схема одноконтурной АЭС с каналным реактором РБМК
(приведенные цифры относятся к РБМК-1000)**



На рисунке показана одноконтурная схема, реализованная в России с реакторами РБМК-1000 на трех АЭС. Здесь и через реактор, и через паротурбинную установку циркулирует одно и то же рабочее тело.

Питательная вода с параметрами 80 ат и 265 °С из раздаточного коллектора с помощью ГЦН подводится к многочисленным (в РБМК-1000 их 1693) параллельным технологическим каналам, размещенным в активной зоне ядерного реактора ЯР.



На выходе из каналов пароводяная смесь с паросодержанием $14\div 17\%$ собирается в коллекторе и подается в барабан-сепаратор (у РБМК-1000 их четыре). Барабан-сепаратор служит для разделения пара и воды. Образующийся пар с параметрами $6,4\text{ МПа}$ (65 ат) и $280\text{ }^\circ\text{C}$ направляется прямо в паровую турбину (реактор РБМК-1000 в номинальном режиме питает две одинаковые паровые турбины мощностью по 500 МВт каждая).



Пар, получаемый в реакторе и в сепараторе, является радиоактивным вследствие наличия растворенных в нем радиоактивных газов, причем именно паропроводы свежего пара обладают наибольшим радиоактивным излучением. Поэтому их прокладывают в специальных бетонных коридорах, служащих биологической защитой. По этой же причине пар к турбине подводится снизу, под отметкой ее обслуживания (пола машинного зала).



Пар, расширившийся в ЦВД до давления 0,35 МПа (3,5 ат), направляется в СПП (на каждой турбине энергоблока с реактором РБМК-1000 их четыре), а из них – в ЦНД (на каждой турбине их также четыре) и в конденсаторы. Конденсатно-питательный тракт такой же, как у обычной ТЭС. Однако многие его элементы требуют биологической защиты от радиоактивности.



Это относится к конденсатоочистке и водяным емкостям конденсатора, где могут накапливаться радиоактивные продукты коррозии, подогревателям регенеративной системы, питаемым радиоактивным паром из турбины, сборникам сепарата СПП. Одним словом, и устройство, и эксплуатация одноконтурных АЭС, особенно в части машинного зала, существенно сложнее, чем двухконтурных.



Конденсат, пройдя систему регенеративного подогрева воды, приобретает температуру $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, смешивается с водой, идущей из барабана-сепаратора ($280\text{ }^{\circ}\text{C}$) и поступает к ГЦН, обеспечивающему питание ядерного реактора.