

Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 9. Циклы паротурбинных установок

воскресенье, 21 апреля 2019 г.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина



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.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренк<u>ина</u>



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 .



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина



Максимальное значение $T_1=T_{\kappa p}$, 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.



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл **Ренкина**

 $I_t = 0$ T₁=T_{1,dor} T₂=T_{oc} x=0S

Однако в этом случае получается парадокс – при большом КПД работа цикла равна нулю, а цикл Карно в *Т,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.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина



При меньших значениях температуры $T_1 < T_{\kappa p}$ 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 % ($x_{\kappa,\text{доп}}=0,88$). При больших влажностях пара происходит быстрое разрушение последних ступеней турбины. Если выполнить это ограничение по $T_1=T_{1,\text{доп}}$, КПД цикла Карно будет иметь значение 24 %.

и его разрушению.

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



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Циклы паротурбинных установок



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости Проблемы практической реализации цикла ПТУ были решены в пятидесятых годах XIX века шотладским 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.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина



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



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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.



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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 .



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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.



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Цикл ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в области жидкости Например, при $T_1 = T_0 = 673$ К и $T_2 = T_{00} = 305$ К $\eta_t^{\mathsf{K}} =$ $0,547 > \eta_t^P = 0,41, a$ $\eta_{0i}^{K} = 0.01 < \eta_{0i}^{P} = 0.364,$ при этом затраты работ на привод насосов соответствующих циклов составят: $l_{\rm H}^{\rm K} = 1200$ кДж/кг и $l_{\rm H}^{\rm K} = 1510$ кДж/кг, $l_{\rm H}^{\rm P} = 10 \; \kappa \text{Дж/кг } \text{и} l_{\rm H}^{\rm P} = 12,5 \; \kappa \text{Дж/кг}.$

Физико-технический институт ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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



a

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



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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.

Физико-технический институт Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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;



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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.

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



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

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

Физико-технический институт ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Циклы паротурбинных установок

затрачивается техническая работа.



Физико-технический

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

институт

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

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

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Циклы паротурбинных установок



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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,



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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.



Физико-технический



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок



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 $q_1 = h_1 - h_3$





Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

2' $\dot{x=1}$ 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 $l_T = h_1 - h_2$



2'

Физико-технический

ГОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

 $\dot{x=1}$

институт

Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Работа, затрачиваемая на сжатие конденсата в насосе, с учетом того, что процесс сжатия является адиабатным и одновременно изохорным вследствие несжимаемости жидкости $l_H = h_3 - h_{2'}$ или $l_H = v_{2'}(p_1 - p_2)$ Полезная работа обратимого цикла (площадь цикла в pv- и Tsдиаграммах) равна $l = q_1 - q_2$ или $l = l_T - l_H$





Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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, $t_1 = (535 \div 565)$ °C, $p_2 = (3 \div 5)$ κΠa, $t_{\rm s} = (25 \div 35) \,^{\circ}{\rm C}.$



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок



Циклы паротурбинных установок Схема паротурбинной установки и цикл Ренкина

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 °C.



x=0

Т

Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

x=1

Термический КПД ПТУ характеризует термодинамическое совершенство обратимого цикла 1-2-2'

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.

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Действительный цикл ПТУ



Действительный цикл ПТУ

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.



Действительный цикл ПТУ

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

$$\eta_{\Pi \mathrm{K}} = \frac{q_1}{q'} = \frac{Q_1}{Q'} = \frac{Q_1}{B \cdot Q_{\mathrm{H}}^{\mathrm{p}}},$$

где q' – теплота, выделившаяся при сгорании топлива, отнесенная к 1кг пара, кДж/кг; $Q = B \cdot Q_{\rm H}^{\rm p}$ – тепловой эффект реакции горения топлива, кВт; *B* – массовый расход топлива, кг/с, $Q_{\rm H}^{\rm p}$ – теплота сгорания топлива, кДж кг.



Действительный цикл ПТУ

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

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

 $\eta_{\rm M} = \frac{l_e}{l_i} = \frac{N_e}{N_i}$



Действительный цикл ПТУ

Все потери в ПТУ (без учета потребителя энергии) характеризуются эффективным КПД $\eta_e = \eta_{\Pi K} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{M}$ Все потери в энергетической установке, вырабатывающей электрическую энергию, учитываются электрическим КПД λT

$$\gamma_e = \frac{\iota_{\mathfrak{H}}}{q'} = \frac{N_{\mathfrak{H}}}{B \cdot Q_{\mathfrak{H}}^{\mathfrak{p}}}$$



Действительный цикл ПТУ

$\eta_{\mathfrak{z}} = \eta_{e} \cdot \eta_{\Gamma},$ где $l_{\mathfrak{z}}$ – электрическая работа; $N_{\mathfrak{z}} = l_{\mathfrak{z}} \cdot G$ – электрическая мощность; $\eta_{\mathfrak{z}} = \frac{l_{\mathfrak{z}}}{l_{e}} = \frac{N_{\mathfrak{z}}}{N_{e}}$ – КПД генератора, учитывающий механические и электрические потери в генераторе.



Действительный цикл ПТУ

Пределы изменения приведенных выше КПД $\eta_{\Pi K} = 0,9 \div 0,96;$ $\eta_t = 0,4 \div 0,5;$ $\eta_{oi} = 0,8 \div 0,9;$ $\eta_M = 0,97 \div 0,99;$ $\eta_{\Gamma} = 0,99;$ $\eta_{\Im} = 0,35 \div 0,40;$ Уравнение теплового баланса для ПТУ с циклом Ренкина

 $q' = l_3 + q_{\text{пот}}^{\Pi K} + q_{\text{пот}}^K + l_{\text{пот}}^{\Gamma} + l_{\text{пот}}^T,$ где $q_{\text{пот}}^{\Pi K} = q'(1 - \eta_{\Pi K})$ – потери тепла в паровом котле; $q_{\text{пот}}^{\Pi K} = h_{2\partial} - h_{2'}$ – потери тепла в конденсаторе



Физико-технический институт ГОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

$$l_{\rm not}^{\rm I} = l_e (1 - \eta_{\Gamma}) -$$

$$l_{\text{пот}}^{\text{T}} = l_i (1 - \eta_{\text{M}}) -$$

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

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Действительный цикл ПТУ


го в ПК, путем перегрева пара в промежуточном пароперегревателе, что приводит к повышению средней термодинамической температуры подвода тепла и к увеличению η_{t} на (2÷3) %;

Для увеличения электрического КПД применяют:

увеличение параметров пара, вырабатываемо-



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Действительный цикл ПТУ



Действительный цикл ПТУ

 комбинированные циклы (бинарные ПТУ, парогазовые установки, ПТУ с МГДгенератором).

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



Схемы атомных паротурбинных установок

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок



Схемы атомных паротурбинных установок

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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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).



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

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.



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

Альтернативой корпусным реакторам являются канальные реакторы, которые строили только в Советском Союзе под названием РБМК – реактор большой мощности канальный. 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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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 °C, на выходе -322 °C. 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.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок



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



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

Из реактора ЯР вода с температурой 322 °С 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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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 $p_0 = 60$ ат). Поэтому уже при нагреве до 275 °С вода в парогенераторе закипает.



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

Таким образом, в парогенераторе, являющимся связывающим звеном первого и второго контура (но расположенном в реакторном отделении), генерируется сухой насыщенный пар с давлением $p_0 = 60$ ат и температурой $t_0 = 275$ °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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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 сепараторпароперегреватель (СПП).



Схемы атомных паротурбинных установок

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.



Схемы атомных паротурбинных установок

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



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок



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



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

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 °C 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÷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 МПа (65 ат) и 280 °С направляется прямо в паровую турбину (реактор РБМК-1000 в номинальном режиме питает две одинаковые паровые турбины мощностью по 500 МВт каждая).

Физико-технический институт томский политехнический университет Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

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).



Физико-технический институт томский попитехнический университет Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок

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.

Физико-технический институт томский политехнический университет Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

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.



Физико-технический институт томский попитехнический университет Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок

Конденсат, пройдя систему регенеративного подогрева воды, приобретает температуру 165 °C, смешивается с водой, идущей из барабана-сепаратора (280 °C) и поступает к ГЦН, обеспечивающему питание ядерного реактора.

Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок



Схема трехконтурной АЭС на перегретом водяном паре: БН –реактор на быстрых нейтронах, МГДН – магнитогидродинамический насос, ПТ – промежуточный теплообменник, ПГ – парогенератор, ПП – пароперегреватель, ВПП – вторичный пароперегреватель



Схемы атомных паротурбинных установок

61

В трехконтурных АЭС используются реакторы на быстрых нейтронах (БН), в которых уран 238 превращается в ядерное топливо плутоний 239, используемое в тепловых реакторах ВВЭР и РБМК. Активная зона таких реакторов окружена оболочкой из «отвального» топлива тепловых реакторов, которое обогащается за счет интенсивного выброса нейтронов из активной зоны реактора. Поэтому такие реакторы получили название реакторов «размножителей» – бридеров (БНР).



Схемы атомных паротурбинных установок

Интенсивное тепловыделение в таких реакторах не позволяет использовать воду в качестве замедлителя (охладителя) активной зоны реактора. Поэтому в них используется жидкий натрий, который имеет относительно низкую (для металла) температуру плавления (около 100 °C) и относительно высокую (по сравнению с водой) температуру насыщения (кипения) металла (более 800 °С) при низких давлениях (несколько атмосфер).



первом контуре.

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

Высокая теплопроводность жидкого натрия позволяет уменьшить размеры активной зоны реактора. Однако натрий имеет существенный недостаток: он вступает в химическую реакцию с водой с интенсивным выделением тепла и газов. Поэтому первый радиоактивный контур такой АЭС имеет биологическую защиту и передает теплоту водяному контуру ПТУ через промежуточный второй контур с жидким натрием, имеющим давление большее, чем в



Схемы атомных паротурбинных установок

Наличие второго контура с жидким натрием большего давления, чем в первом контуре, исключает контакт радиоактивного натрия с водой.

Исходя из вышеизложенного схема АЭС на быстрых нейтронах имеет трехконтурное исполнение. В первом контуре жидкий натрий отводит теплоту из активной зоны реактора и через промежуточный теплообменник нагревает тоже жидкий натрий второго контура АЭС.



Схемы атомных паротурбинных установок

Теплота жидкого натрия второго контура передается в парогенераторе АЭС воде, в котором получается перегретый водяной пар, поступающий в турбину. Турбина такой АЭС работает на перегретом паре ($P_0 = 13$ МПа, $t_0 \approx 500$ °C). В цикле такой ПТУ может быть использован вторичный перегрев пара, который осуществляется в парогенераторе за счет теплоты жидкого натрия. В таких схемах тепловая экономичность ПТУ близка к экономичности ПТУ на органическом топливе, а их КПД достигает 40%.



Схемы атомных паротурбинных установок

Такие схемы имеют практическое применение: Белоярская АЭС (Россия), Мангышлакская АЭС (Казахстан, выведена из эксплуатации). На последней кроме выработки электроэнергии осуществлялось опреснение морской воды.



Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок



Схема АЭС с ВТГР – высокотемпературным газовым реактором: ГД – газодувка, ПГ – парогенератор, ПП – пароперегреватель ВПП – вторичный пароперегреватель



Схемы атомных паротурбинных установок

Ядерные реакторы могут охлаждаться и газовым теплоносителем. На сегодняшний день наиболее приемлемым газом для охлаждения радиоактивной зоны реактора является гелий. Это инертный газ, что исключает вынос радиации из активной зоны. Свойства гелия позволяют эффективно охлаждать активную зону реактора, работающего как на быстрых, так и на тепловых нейтронах. На сегодняшний день технически возможно нагревание гелия в реакторе до 750 – 950 °C.



Схемы атомных паротурбинных установок

Такие температуры позволяют использовать в АЭС паротурбинный цикл на перегретом водяном паре с вторичным перегревом пара. В отличие от жидкого металла (натрия) такой газовый теплоноситель значительно упрощает схему АЭС. Основным недостатком гелия (и других газовых теплоносителей) является необходимость пропуска большого количества газа через реактор (низкая теплопроводность газов по сравнению с металлами).



Схемы атомных паротурбинных установок

В связи с этим в контуре охлаждения реактора необходимо устанавливать газодувку большой производительности и, соответственно, с большими затратами мощности на ее привод (электрический или турбопривод). У гелия есть еще одно неприятное для технологов свойство это высокая его текучесть. При малейшей неплотности гелий может вытечь из контура охлаждения реактора.



Физико-технический институт Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок Схемы атомных паротурбинных установок

В парогенераторе за счет охлаждения гелия получается перегретый водяной пар второго контура АЭС. Температура пара на выходе из парогенератора может достигать 500 °С, что позволяет использовать серийные ПТУ на перегретом паре с вторичным пароперегревателем (ВПП). ВПП размещается в газоводяном парогенераторе (ПГ). КПД таких АЭС могут превышать 40 %, и на сегодняшний день это наиболее перспективные АЭС.


Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок

Газовые теплоносители могут использоваться и в одноконтурных схемах АЭС. В перспективном будущем, когда произойдет практическое освоение термоядерных реакторов, появится много АЭС с газовым и паровым рабочими телами. В таких АЭС выработка электроэнергии будет происходить непосредственно за счет движущейся плазмы (ТОКАМАК), в высокотемпературных газовых турбинах, и традиционных паротурбинных установках одновременно.



Лекция 9: Циклы паротурбинных установок

Схемы атомных паротурбинных установок

КПД таких АЭС будет выше КПД современных ПТУ, а проблем запасов ядерного топлива для них не существует (дейтерий и тритий присутствуют в воде).