



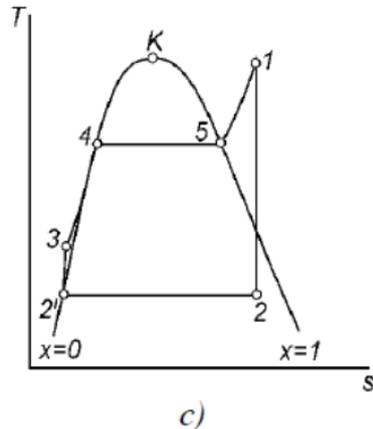
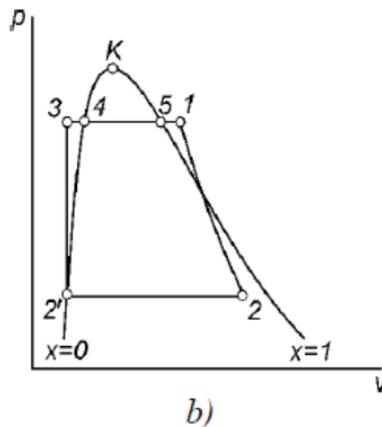
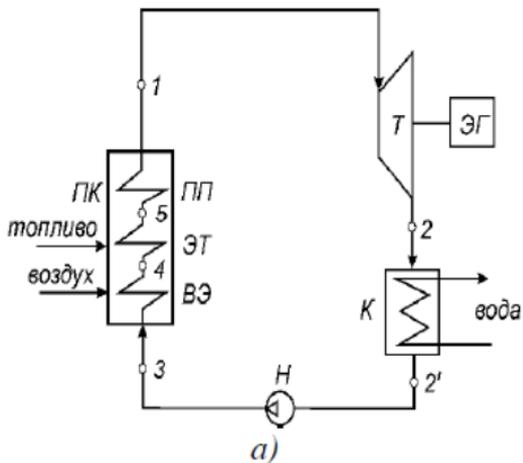
**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 8. Циклы газотурбинных и паротурбинных установок

14 марта
2016



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



Теплота, подводимая к воде и водяному пару в паровом котле (процессах: 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

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



Полезная работа обратимого цикла (площадь цикла в $p\nu$ - и Ts -диаграммах) равна

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

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 турбиной, тогда:

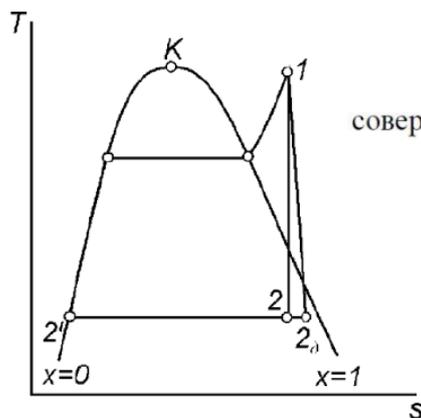
$$q_1 = h_1 - h_{2'}, \quad l = l_T = h_1 - h_2$$

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



Термический КПД зависит от трех параметров p_1 , t_1 , p_2 . Термический КПД 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 термодинамическое 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

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

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

$$\eta_{ПК} = \frac{q_1}{q'} = \frac{Q_1}{Q'} = \frac{Q_1}{B \cdot Q_n^p},$$



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

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

$$\eta_m = \frac{l_e}{l_i} = \frac{N_e}{N_i},$$

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

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

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

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

$$\eta_s = \frac{l_s}{q'} = \frac{N_s}{B \cdot Q_n^p},$$

$$\eta_s = \eta_e \cdot \eta_{Г},$$

где l_s – электрическая работа; $N_s = l_s \cdot G$ – электрическая мощность;

$\eta_{Г} = \frac{l_s}{l_e} = \frac{N_s}{N_e}$ – КПД генератора, учитывающий механические и

электрические потери электрического тока в генераторе.



Пределы изменения приведенных выше КПД следующие:

$$\eta_{ПК} = (0.9 \div 0.96), \quad \eta_t = (0.4 \div 0.5), \quad \eta_{oi} = (0.8 \div 0.9),$$

$$\eta_m = (0.97 \div 0.99), \quad \eta_G = 0.99, \quad \eta_s = (0.35 \div 0.40).$$

Уравнение теплового баланса для ПТУ с циклом Ренкина

$$q' = l_s + q_{ном}^{ПК} + q_{ном}^K + l_{ном}^Г + l_{ном}^T,$$

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

$q_{ном}^K = h_{2\delta} - h_{2'}$ – потери тепла в конденсаторе,

$l_{ном}^Г = l_e(1 - \eta_G)$ – потери в электрогенераторе,

$l_{ном}^T = l_i(1 - \eta_m)$ – 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 за счет промежуточного перегрева пара в промежуточном пароперегревателе, что приводит к увеличению средней термодинамической температуры подвода тепла и к увеличению η_t на (2 ÷ 3) %;
- регенеративный подогрев конденсата, подаваемого в ПК, что приводит к уменьшению q_2 и увеличению η_t и η_s на (12 ÷ 15) %;
- применение комбинированных циклов (бинарные ПТУ, парогазовые установки, ПТУ с МГД генератором).



Принципиальная тепловая схема турбоустановки – это структурная схема оборудования пароводяного тракта, характеризующая 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 др.

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.



Образование пара происходит в корпусе реактора блока АЭС с РБМК-1000. В барабан-сепараторе (БС) происходит разделение острого пара и воды. Острый пар подается на цилиндр высокого давления (ЦВД) турбины и двухступенчатый пароперегреватель (ПП2).

