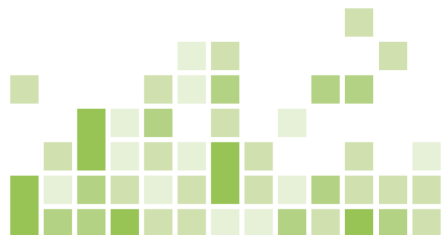




**Физико-технический  
институт**

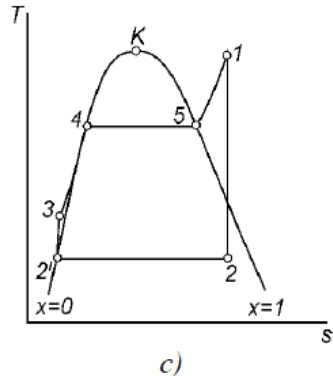
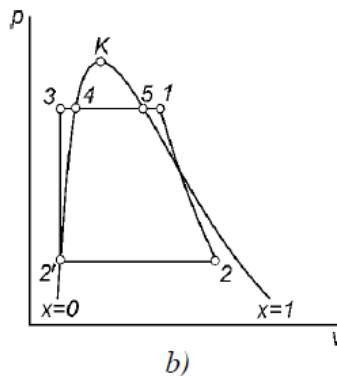
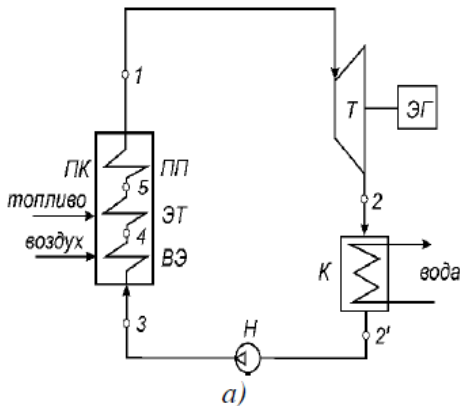
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



## Практическое занятие №8

### Цикл Ренкина

понедельник, 12 июня 2017 г.



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 турбины, тогда:

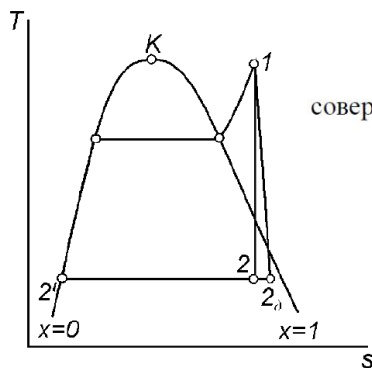
$$q_1 = h_1 - h_{2'}, \quad l = l_T = h_1 - h_2$$

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



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  $\sim 20$  °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

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

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:

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

$$\eta_m = (0.97 \div 0.99), \quad \eta_{\Gamma} = 0.99, \quad \eta_s = (0.35 \div 0.40).$$

Уравнение теплового баланса для ПТУ с циклом Ренкина

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

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,

$l_{ном}^{\Gamma} = l_e(1 - \eta_{\Gamma})$  – 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  $\eta_t$  на (2 ÷ 3) %;
- регенеративный подогрев конденсата, подаваемого в ПК, что приводит к уменьшению  $q_2$  и увеличению  $\eta_t$  и  $\eta_s$  на (12 ÷ 15) %;
- применение комбинированных циклов (бинарные ПТУ, парогазовые установки, ПТУ с МГД генератором).



## Задача №1

Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния:  $p_1 = 2$  МПа,  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить термический к. п. д.



## Задача №2

Определить термический к. п. д. цикла Ренкина, если  $p_1 = 6$  МПа,  $t_1 = 450^\circ$  С и  $p_2 = 0,004$  МПа.



## Задача №3

Паровая турбина мощностью  $N = 12\,000$  кВт работает при начальных параметрах  $p_1 = 8$  МПа и  $t_1 = 450^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. В котельной установке, снабжающей турбину паром, сжигается уголь с теплотой сгорания  $Q_H^P = 25\,120$  кДж/кг. К. п. д. котельной установки равен 0,8. Температура питательной воды  $t_{п.в} = 90^\circ\text{C}$ .

Определить производительность котельной установки и часовой расход топлива при полной нагрузке паровой турбины и условия, что она работает по циклу Ренкина.



## Задача №4

Определить термический к. п. д. цикла Ренкина для следующих параметров

- 1)  $p_1 = 3,5$  МПа;  $t_1 = 435^\circ$  С;  $p_2 = 0,004$  МПа;
- 2)  $p_1 = 9$  МПа;  $t_1 = 500^\circ$  С;  $p_2 = 0,004$  МПа;
- 3)  $p_1 = 13$  МПа;  $t_1 = 565^\circ$  С;  $p_2 = 0,0035$  МПа;
- 4)  $p_1 = 30$  МПа;  $t_1 = 650^\circ$  С;  $p_2 = 0,03$  МПа.