

## Тема: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

1. Назначение и общий принцип работы паросиловой установки.
2. Цикл Ренкина
3. Теплофикационные циклы паросиловых установок

### 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ.

В современной стационарной теплоэнергетике для производства электроэнергии в основном используются паровые теплосиловые турбинные установки. На долю паротурбинных электростанций приходится более 80 % вырабатываемой электроэнергии.

Паросиловая турбинная установка предназначена для преобразования тепла сжигаемого топлива в механическую энергию вращения турбины при помощи пара.

В паровых теплосиловых установках в качестве рабочего тела, как правило, используется водяной пар, что объясняется доступностью и дешевизной воды.

На рис. 1 приведена схема простейшей теплосиловой паротурбинной установки.

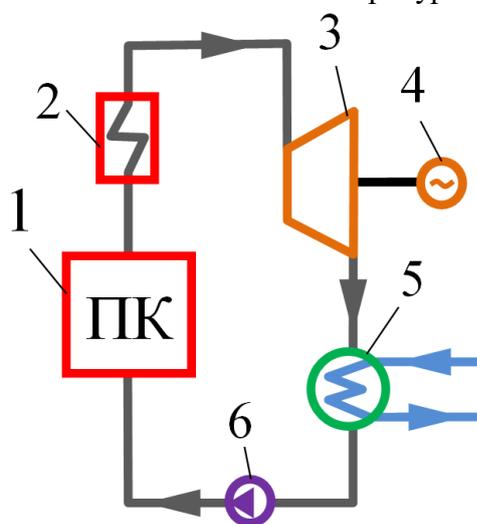


Рис. 1 Принципиальная схема паротурбинной теплосиловой установки:  
1-паровой котел, 2-пароперегреватель, 3-турбина, 4-электрогенератор,  
5-конденсатор, 6-водяной насос

В паровом котле 1 вода нагревается и превращается в пар. Из котла пар поступает в пароперегреватель 2, где он еще больше нагревается. Перегретый пар с параметрами  $p_1$ ,  $T_1$ ,  $h_1$  поступает в паровую турбину 3. При расширении в сопловом аппарате пар приобретает значительную кинетическую энергию, которая в роторе турбины превращается в техническую работу. Механическая энергия турбины превращается в электрическую энергию в электрогенераторе 4. После турбины пар с давлением  $p_2$  и энтальпией  $h_2$  поступает в конденсатор 5, представляющий собой теплообменник, в трубках которого циркулирует охлаждающая вода. В конденсаторе от пара отводится теплота в количестве  $q_2$ , в результате чего пар конденсируется. Конденсат подается насосом 6 в котел, и цикл повторяется вновь.

Характерная особенность паросиловых установок — это фазовое превращение рабочего тела в цикле.

### 2. ЦИКЛ РЕНКИНА

Цикл Ренкина - термодинамический цикл преобразования теплоты в работу с помощью водяного пара. Его предложил шотландский физик Уильям Ренкин в середине 19 века.

Рассмотрим термодинамический цикл теплосиловой паротурбинной установки, представленный на рис. 2 в  $pV$ -,  $Ts$ - и  $hs$ - диаграммах.

Точка 4 соответствует состоянию рабочего тела перед паровым котлом. При постоянном давлении  $p_1 = \text{const}$  в котле происходят нагрев жидкости (процесс 4-5), парообразование (процесс 5-6) и перегрев пара (процесс 6-1).

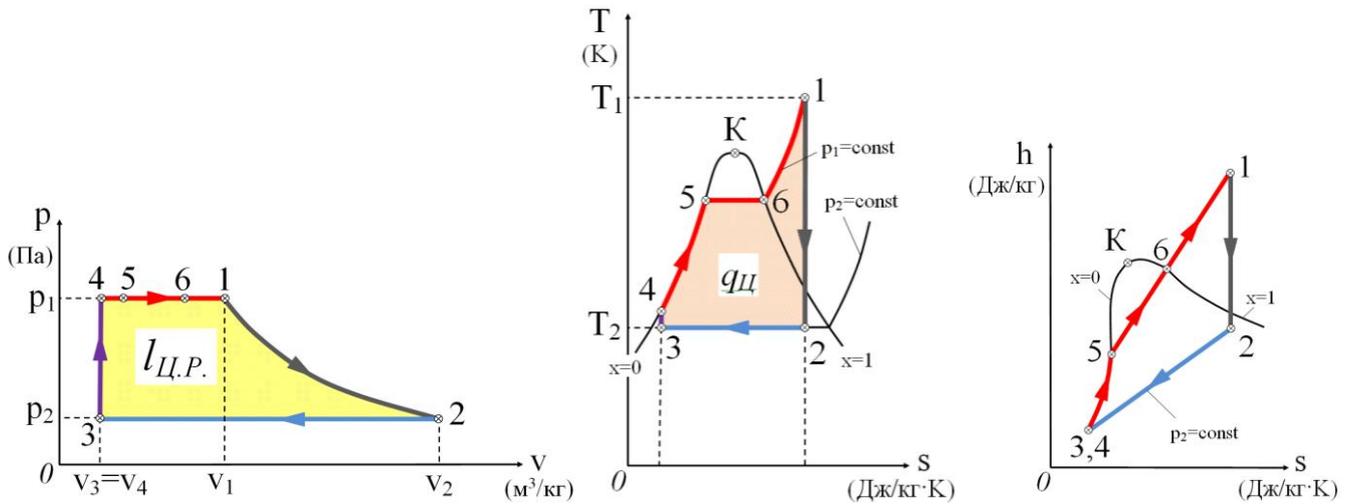


Рис. 2. Цикл Ренкина в  $p$ - $v$ -,  $T$ - $s$ - и  $h$ - $s$ -координатах.

Теплота  $q_1$  подведенная к 1 кг рабочего тела в изобарном процессе, равна разности энтальпий в конечной и начальной точках процесса:

$$q_1 = h_1 - h_4 \quad (1)$$

В паровой турбине осуществляется адиабатный процесс расширения 1-2. В результате перегретый пар превращается в сухой насыщенный, а затем во влажный с параметрами точки 2.

Техническая работа расширения в турбине определяется:

$$l_T = h_1 - h_2 \quad (2)$$

После турбины происходит конденсация пара при постоянном давлении (процесс 2-3).

На участке 2—3 остаются постоянными давление  $p_2$  и температура  $T_2$ , т.к. изобары в области влажного пара являются одновременно и изотермами. При этом от рабочего тела отводится количество теплоты:

$$q_2 = h_2 - h_3. \quad (3)$$

Процесс подачи конденсата в котел насосом изображается изохорой 3—4, так как вода практически несжимаема. Точки 3 и 4 на  $T$ - $s$ - и  $h$ - $s$ -диаграммах не совпадают, но это отклонение столь мало, что им пренебрегают, т.е.  $h_4 = h_3$

Образованный таким образом термодинамический цикл называется *циклом Ренкина*.

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_{ц.р.} = \frac{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)}{(h_1 - h_3)} \quad (4)$$

Можно принять, что энтальпия  $h_3$  воды в точке 3 равна энтальпии  $h_K$  конденсата (кипящей воды) при давлении  $p_2$ , т.е.  $h_3 = h_K$ .

Тогда можно записать:

$$\eta_{ц.р.} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_K} \quad (5)$$

Из приведенной формулы следует, что термический КПД цикла Ренкина определяется значениями энтальпий пара до турбины  $h_1$  и после нее  $h_2$ , и энтальпии воды  $h_K$  при температуре конденсации пара  $T_2$  и давлении  $p_2$ . Поэтому при определении значения  $\eta_{ц.р.}$  цикла паротурбинной установки удобно пользоваться  $h$ - $s$ -диаграммой.

Для повышения термического КПД паротурбинной установки следует расширить пределы рабочего процесса, а именно повысить давление  $p_1$  и температуру перегретого пара  $T_1$  и понизить давление  $p_2$  пара за турбиной. На современных тепловых электростанциях начальное давление  $p_1 = 13... 16$  МПа (применяется также сверхкритическое давление, равное 24 МПа), температура пара  $t_1 = 535...565^\circ\text{C}$ . Давление пара за турбиной  $p_2 = 3...5$  кПа. Так как с увеличением давления  $p_1$  при постоянном предельном значении температуры  $T_1$  повышается влажность пара в конце процесса расширения (на  $hs$ -диаграмме процесс сдвигается влево), то применяют промежуточный перегрев пара. Давление промежуточного перегрева выбирают так, чтобы работа цикла  $l_T$  при этом увеличивалась в большей степени, чем расход теплоты  $q_1$  (с учетом дополнительного расхода на промежуточный перегрев пара).

### 3. ТЕПЛОФИКАЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Эффективность топлива, сжигаемого в паросиловой установке, можно повысить, если удаляемую теплоту (а она составляет не менее половины количества теплоты, подведенной от источника с более высокой температурой) использовать для отопления и горячего водоснабжения или для различных технологических процессов. При этом паросиловая установка работает по так называемому теплофикационному циклу.

Теплофикационный цикл паросиловой установки - термодинамический цикл, в котором подведенная теплота расходуется не только на совершение механической работы и получение электроэнергии, но часть теплоты используется для отопления, горячего водоснабжения потребителей и другие технологические нужды.

В конденсационных электростанциях, предназначенных для выработки только электрической энергии, охлаждающая вода после конденсатора имеет температуру  $20...35^\circ\text{C}$ , и использовать теплоту этой воды практически сложно. Ввиду низкой температуры она называется низкопотенциальной теплотой.

Для нужд отопления, горячего водоснабжения и т. п. температура воды должна быть не менее  $80...100^\circ\text{C}$ . Этого можно достигнуть, если повысить давление пара  $p_2$  выходящего из турбины. Давление пара за турбиной должно быть  $0,10...0,15$  МПа, в то время как на станциях без отпуска теплоты потребителям давление  $p_2 = 3...5$  кПа.

Такие турбины называют турбинами с ухудшенным вакуумом. Если давление  $p_2$  выше атмосферного, то турбины называют турбинами с противодавлением.

Станция, одновременно вырабатывающая электрическую энергию и теплоту для внешнего теплоснабжения, называется теплоэлектроцентралью (ТЭЦ). Схема такой станции изображена на рис.3. Диаграмма теплофикационного цикла в  $Ts$ -координатах показана на рис. 4.

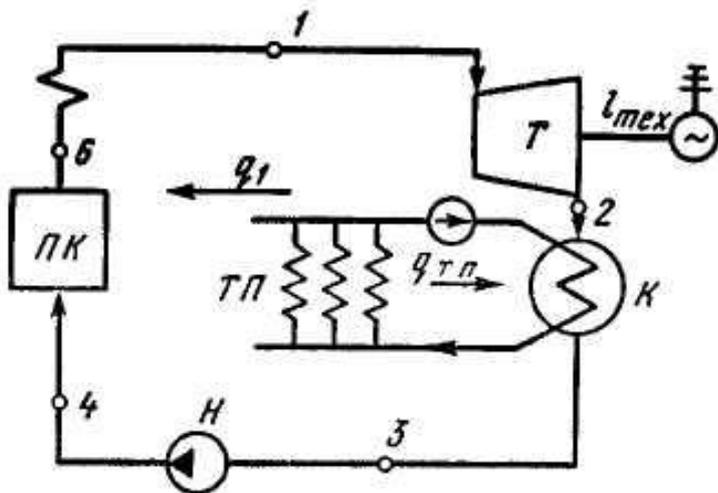


Рис. 3. Схема ТЭЦ без регулируемого отбора пара из турбины:  
ПК — паровой котел; Т — паровая турбина;

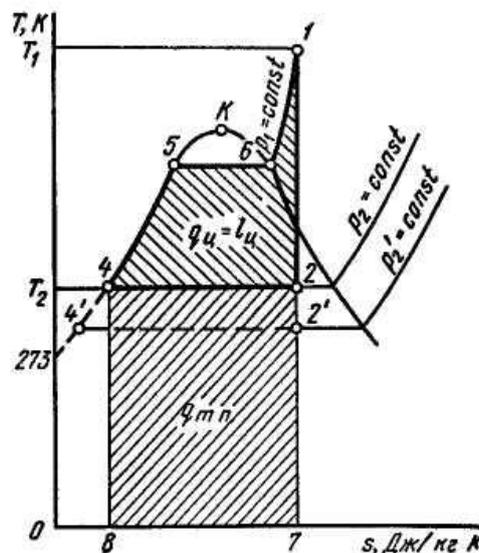


Рис. 4. Диаграмма теплофикационного

На принципиальной схеме (рис.3) цифры соответствуют наиболее характерным точкам на диаграмме (рис.4). Количество теплоты, которое можно использовать для отопления технологических процессов различных производств и т. д., определяют площадью 2-4-8-7-2. Уменьшение полезной работы вследствие повышения давления за тепловой машиной равно площади 2-2'-4'-4-2. Поэтому термический КПД такого цикла ниже, чем у конденсационной установки, но общее использование теплоты значительно больше.

Характеристикой теплосиловых установок, вырабатывающих электрическую и тепловую энергию (ТЭЦ), служит коэффициент использования теплоты:

$$\eta_{и.т.} = \frac{l_{э} + q_2}{q_1} \quad (6)$$

где  $l_{э}$  — работа цикла, используемая до получения электрической энергии;

$q_2$  — теплота, отпускаемая потребителю;

$q_1$  — подвод теплоты от источника.

Теоретически  $\eta_{и.т.}$  может иметь значение, равное единице, а в реальных условиях коэффициент использования теплоты достигает величины 0,6... 0,8.

Существенный недостаток тепловых станций, работающих по схеме, изображенной на рис. 3 заключается в том, что электрическая мощность и тепловая мощность (количество отпускаемой теплоты за единицу времени) не являются независимыми друг от друга. В то же время графики выдачи тепловой и электрической энергии могут не совпадать во времени. Поэтому на ТЭЦ применяют конденсационные турбины с промежуточными регулируемым отборами пара при давлениях, необходимых для потребителей теплоты (рис. 5). При этом часть пара с давлением  $p_{отб}$  отбирается из промежуточных ступеней турбины и направляется потребителям.

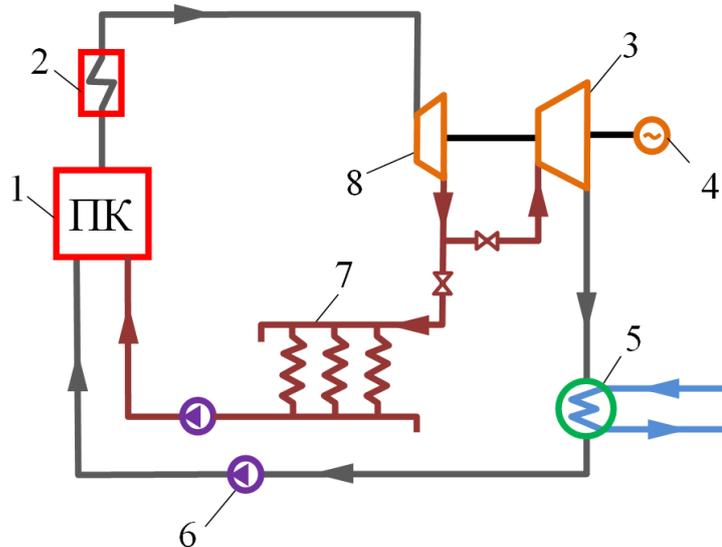


Рис. 5. Схема установки ТЭЦ с регулируемым отбором пара: 1-паровой котел; 2-пароперегреватель, 3 и 8-ступени паровой турбины; 4-электрогенератор, 5-конденсатор, 6- водяной насос; 7-тепловой потребитель

Отбор называется регулируемым, поскольку система регулирования обеспечивает независимость параметров отбираемого пара от расхода пара через турбину.

Отпускаемые потребителю теплота и электрическая энергия у турбин с регулируемым отбором пара могут изменяться независимо друг от друга. При необходимости предусматривается два или три регулируемых отбора с разными параметрами пара. При этом, как правило, для технологических потребностей, отбирается пар при более высоком давлении, а для систем отопления и горячего водоснабжения — при более низком. Кроме регулируемых отборов, осуществляются также нерегулируемые отборы пара, предназначенные для регенеративного подогрева воды после конденсатора.