

**План лекции:**

1. Циклы паротурбинных установок. Цикл Карно
2. Цикл Ренкина
3. Вопросы для дистанционного освоения лекции

**1. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК. ЦИКЛ КАРНО**

**В современной стационарной теплоэнергетике в основном используются паровые теплосиловые установки.** Теплосиловые установки, в которых в качестве рабочего тела применяется пар, имеют некоторые особенности и преимущества, существенно отличающие их от теплосиловых установок с газообразным рабочим телом.

Наиболее распространенным рабочим телом теплосиловых паровых циклов является вода - самое доступное и дешевое рабочее тело.

Использование рабочего тела, изменяющего свое агрегатное состояние, позволяет осуществить на практике **цикл Карно**.

Как известно, цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм.

Практически осуществление адиабатных процессов не представляет особых трудностей. Отклонения реальных адиабатных процессов расширения и сжатия от изоэнтропы, обусловленные необратимостью процессов истечения, конечно, приводят к уменьшению термического КПД цикла, однако это уменьшение не слишком велико.

**Практическое осуществление изотермических процессов подвода и отвода теплоты в газовых теплосиловых установках сопряжено с непреодолимыми трудностями.** Как было показано, для того чтобы по возможности приблизить реальные процессы к изотермическим, применяют многоступенчатое сжатие воздуха с промежуточным охлаждением (в компрессорах) и ступенчатый подвод теплоты (в газотурбинных установках).

**Совершенно иначе обстоит дело в паросиловых циклах.**

Для потока вещества технически наиболее просто осуществимым процессом подвода или отвода теплоты является изобарный процесс. В процессах с фазовым переходом чистого вещества из жидкого в газообразное состояние при постоянном давлении температура вещества также остаётся постоянной.

**Внутри двухфазной области состояний чистого вещества изобары совпадают с изотермами; следовательно, изобарный процесс подвода теплоты к влажному пару (т.е. парообразование), равно как и изобарный процесс отвода теплоты от влажного пара (т. е. конденсация), легко осуществимые на практике, представляют собой в то же время изотермические процессы.** Отсюда следует, что если использовать влажный пар в качестве рабочего тела и осуществить цикл, составленный из двух адиабат и двух изобар, то это и будет цикл Карно.

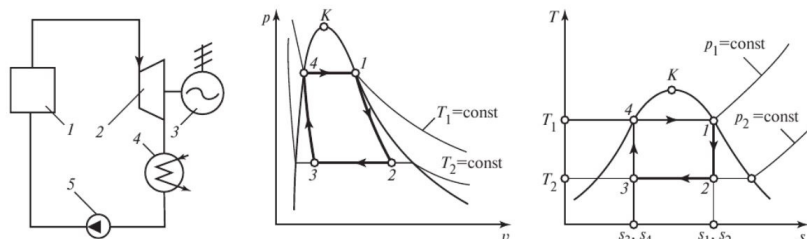


Схема теплосиловой установки, в которой осуществляется цикл Карно на влажном паре, представлена на рисунке. В паровой котел 1 поступает влажный водяной пар малой степени сухости  $x = m_{\text{сухого пара}} / m_{\text{влажного пара}}$ <sup>1</sup>. За счет сгорания топлива в топке котла (уголь, мазут, природный газ и др.) к влажному пару подводится теплота, и степень сухости пара повышается до значений, близких к единице. Процесс подвода теплоты в котле происходит при постоянном давлении  $p_1$  и при постоянной температуре  $T_1$ .

Из котла пар поступает в паровую турбину 2. При расширении в турбине поток пара приобретает значительную кинетическую энергию. На лопатках рабочего колеса турбины эта энергия превращается в кинетическую энергию вращения рабочего колеса и затем в электроэнергию с помощью электрогенератора 5, вращаемого турбиной.

На выходе из турбины влажный пар имеет давление  $p_2$  и соответствующую этому давлению температуру  $T_2$ . Далее пар поступает в конденсатор 4 - теплообменник, в котором с помощью охлаждающей воды от пара отводится теплота, пар конденсируется и, следовательно, степень его сухости уменьшается. Процесс отвода теплоты от пара в конденсаторе осуществляется при постоянном давлении.

После конденсатора влажный пар поступает в компрессор 5, в котором он адиабатно сжимается до давления  $p_1$ . Затем влажный пар вновь поступает в котел, и цикл замыкается.

Таким образом, на участке цикла от выхода из компрессора до входа в турбину давление рабочего тела равно  $p_1$ , а на участке цикла от выхода из турбины и до входа в компрессор давление рабочего тела равно  $p_2$ .

Подвод теплоты  $q_1$  к пару в котле осуществляется по изобаре-изотерме 4-1, процесс расширения в паровой турбине - по адиабате 1-2, отвод теплоты в конденсаторе - по изобаре-изотерме 2-3, сжатие пара в компрессоре - по адиабате 3-4. **При расширении по адиабате от состояния вблизи правой пограничной кривой степень сухости пара уменьшается; при адиабатном сжатии в состоянии вблизи левой пограничной кривой влажность пара возрастает.** Отвод теплоты в конденсаторе должен осуществляться до тех пор, пока влажный пар не достигнет состояния, которое определяется следующим условием: при сжатии по адиабате от состояния 3 с давлением  $p_2$  до давления  $p_1$  конечное состояние рабочего тела не должно оказаться за пределами области насыщения.

Термический КПД обратимого цикла Карно, осуществляемого во влажном паре, как и цикла Карно с любым другим рабочим телом, определяется уравнением:

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (1)$$

Поскольку критическая температура воды сравнительно невысока ( $374.15$  °С), невелик и интервал температур между нижней (порядка  $25$  °С) и верхней (не выше  $340 - 350$  °С) температурами цикла, ибо при большем приближении к критической точке резко сужается длина изобарно-изотермического участка 4-1 и степень заполнения цикла уменьшается. Однако даже в этом сравнительно узком интервале предельных температур величина  $\eta_T$  для обратимого цикла Карно, осуществляемого во влажном паре, оказывается весьма значительной:

---

<sup>1</sup> У кипящей жидкости  $x = 0$ , а у сухого насыщенного пара  $x = 1$

$$\eta_T = 1 - \frac{25 + 273.15}{350 + 273.15} = 0.52 \quad (2)$$

С учетом условий работы теплосилового оборудования **практическое осуществление этого цикла нецелесообразно**, так как при работе на влажном паре, который представляет собой поток сухого насыщенного пара со взвешенными в нем капельками воды, условия работы проточных частей турбин и компрессоров оказываются также тяжёлыми, течение - газодинамически несовершенным и внутренний относительный КПД этих машин снижается.

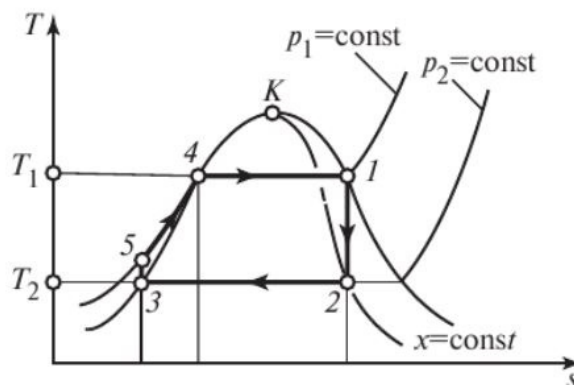
**Компрессор для сжатия влажного пара с малыми давлениями и большими удельными объемами представляет собой весьма громоздкое, неудобное в эксплуатации устройство, на привод которого затрачивается чрезмерно большая энергия.** По этим причинам цикл Карно, осуществляемый на влажном паре, не нашёл практического применения.

## 2. ЦИКЛ РЕНКИНА

Перечисленные выше недостатки, присущие паросиловой установке, в которой осуществляется цикл Карно на влажном паре, могут быть частично устранены, если **отвод теплоты от влажного пара в конденсаторе производить до тех пор, пока весь пар полностью не сконденсируется.**

В этом случае сжатие от давления  $p_2$  до давления  $p_1$  подлежит не влажный пар малой плотности, а вода. По сравнению с удельным объемом влажного пара в точке 3 удельный объем воды весьма мал, а ее сжимаемость пренебрежимо мала по сравнению со сжимаемостью влажного пара. Для перемещения воды из конденсатора в котел с одновременным повышением ее давления применяются **не компрессоры, а насосы**, компактные и простые по устройству, потребляющие весьма мало энергии для своего привода.

Такой цикл предложен в 50-х годах XIX века почти одновременно шотландским инженером и физиком Ренкиным и Клаузиусом; обычно этот цикл называют циклом Ренкина. Схема теплосиловой установки с циклом Ренкина аналогична схеме установки, изображенной выше, с той лишь разницей, что в схеме, работающей по циклу Ренкина, **5 - не компрессор влажного пара, а водяной насос.**



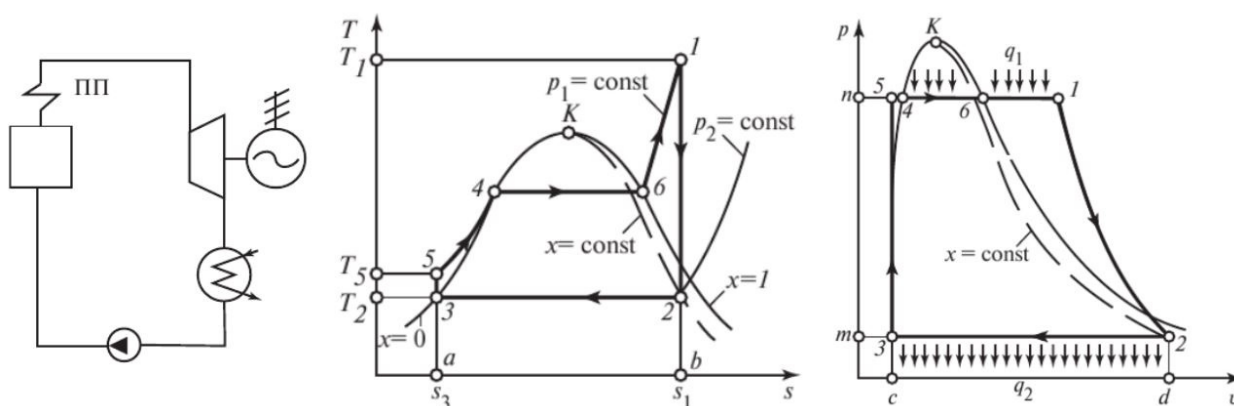
Цикл Ренкина на  $T, s$  - диаграмме изображен на рисунке. Влажный пар в конденсаторе полностью конденсируется по изобаре  $p_2 = \text{const}$  (точка 3). Затем вода сжимается насосом от давления  $p_2$  до давления  $p_1$ ; этот адиабатный процесс изображен вертикальным отрезком 3-5. Длина отрезка 3-5 весьма мала; в области жидкости изобары проходят очень близко друг от друга. Благодаря этому при изоэнтропном сжатии воды, находящейся при температуре  $25^\circ\text{C}$  и давлении насыщения 3.1 кПа, до давления 29 400

кПа температура воды возрастает менее чем на  $1^{\circ}\text{C}$ , и можно с хорошей степенью приближения считать, что в области жидкости изобары воды практически совпадают с левой пограничной кривой.

Малая длина отрезка адиабаты 3-5 свидетельствует о малой работе, затрачиваемой насосом на сжатие воды. Малая работа сжатия по сравнению с работой, производимой водяным паром в процессе расширения 1-2, является важным преимуществом цикла Ренкина.

Из насоса вода под давлением  $p_1$  поступает в котел, где к ней в изобарном процессе подводится теплота. Вначале вода в котле нагревается до кипения (участок 5-4), а затем, при достижении температуры кипения, происходит процесс парообразования (участок 4-1). Сухой насыщенный пар, получаемый в котле, поступает в турбину; процесс расширения в турбине изображается адиабатой 1-2. Отработанный влажный пар поступает в конденсатор, и цикл замыкается.

В отношении термического КПД **цикл Ренкина представляется менее выгодным, чем обратимый цикл Карно**, поскольку степень заполнения цикла (равно как и средняя температура подвода теплоты) для цикла Ренкина оказывается меньше, чем для цикла Карно. Однако с учетом реальных условий осуществления цикла и значительно меньшего влияния необратимости процесса сжатия воды по сравнению со сжатием влажного пара на общий КПД цикла экономичность цикла Ренкина выше экономичности соответствующего цикла Карно во влажном паре. Вместе с тем замена громоздкого компрессора для сжатия влажного пара компактным водяным насосом позволяет существенно снизить затраты на сооружение теплосиловой установки и упростить ее эксплуатацию.



Для того чтобы увеличить термический КПД цикла Ренкина, применяют так называемый перегрев пара в специальном элементе котла - пароперегревателе, где пар нагревается до температуры, превышающей температуру насыщения при данном давлении. В этом случае средняя температура подвода теплоты увеличивается по сравнению с температурой подвода теплоты в цикле без перегрева и, следовательно, термический КПД цикла возрастает.

Для цикла с перегревом процесс расширения пара в турбине 1-2, осуществляемый до того же, что и раньше, давления  $p_2$ , заканчивается внутри двухфазной области в районе более высоких степеней сухости, чем для цикла без пароперегревателя. Благодаря этому условия работы проточной части турбины оказываются более легкими и, следовательно, повышаются внутренний относительный КПД.

**Цикл Ренкина с перегревом пара является основным циклом теплосиловых установок, применяемых в современной теплоэнергетике.**

Теплота  $q_1$ , подводимая к рабочему телу в цикле, изображается площадью а-3-5-4-6-1-b-a. Теплота отводимая в цикле, эквивалентна площади а-3-2-b-a, а работа цикла - площади 3-5-4-6-1-2-3.

Поскольку процессы подвода и отвода теплоты в цикле Ренкина осуществляются по изобарам, а в изобарном процессе подведенная (отведенная) теплота равна разности энтальпий рабочего тела в начале и конце процесса:

$$\begin{aligned} q_1 &= h_1 - h_5 \\ q_2 &= h_2 - h_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $h_1$  - энтальпия перегретого водяного пара на выходе из котла (при давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$ );  $h_5$  - энтальпия воды на входе в котел, т.е. на выходе из насоса (при давлении  $p_2$  и температуре  $T_5$ );  $h_2$  - энтальпия влажного пара на выходе из турбины, т.е. на входе в конденсатор (при давлении  $p_2$  и степени сухости  $x$ ), а  $h_3$  - энтальпия воды на выходе из конденсатора (она равна энтальпии воды на линии насыщения  $h'$  при температуре насыщения  $T_2$ , однозначно определяемой давлением  $p_2$ ).

Для термического КПД цикла применительно к обратимому циклу Ренкина:

$$\begin{aligned} \eta_T &= 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_5} = \frac{(h_1 - h_5) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_5} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_5 - h_3)}{h_1 - h_5} \\ l_{\text{турб}} &= h_1 - h_2 \\ l_{\text{нас}} &= h_5 - h_3 = v_{\text{воды}}(p_1 - p_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Разность  $h_1 - h_2$  представляет собой располагаемый перепад энтальпий, превращаемый в кинетическую энергию потока и затем в работу в турбине, разность же  $h_5 - h_3$  - это техническая работа насоса. Таким образом, работу, производимую в цикле, можно рассматривать как разность работы, полученной в турбине, и работы, затрачиваемой на привод насоса.

Если пренебречь значением работы насоса вследствие ее малости по сравнению с располагаемым перепадом энтальпий, срабатываемым в турбине, т.е. считать, что  $h_5 = h_3$ , то уравнение (4) можно записать в следующем виде:

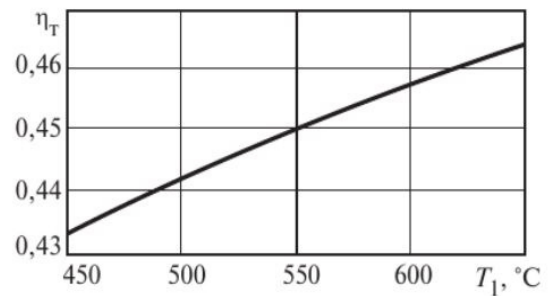
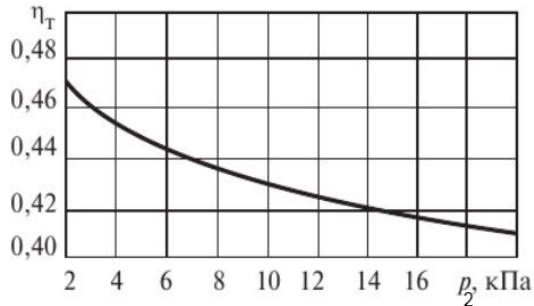
$$\boxed{\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}} \quad (5)$$

Это соотношение вполне приемлемо для примерных расчетов циклов паросиловых установок низкого давления. Для установок высокого давления значением работы насоса пренебрегать нельзя.

**Выясним, как зависит термический КПД цикла Ренкина от параметров водяного пара.**

При одном и том же значении начальных параметров пара ( $p_1$  и  $T_1$ ) снижение давления в конденсаторе  $p_2$  будет приводить к росту  $\eta_T$ : поскольку в двухфазной области давление однозначно связано с температурой, уменьшение  $p_2$  означает уменьшение температуры отвода теплоты в цикле  $T_2$  таким образом, температурный интервал цикла расширяется и термический КПД растет.

Обычно в современных теплосиловых установках давление в конденсаторе  $p_2$  определяется температурой охлаждающей воды и равно 3.5-4 кПа; давлению 4 кПа соответствует температура насыщения  $T_2 = 28.6$  °С. Дальнейшее снижение давления в конденсаторе нецелесообразно, во-первых, потому, что **при более глубоком разрежении возрастает удельный объем пара, поступающего из турбины в конденсатор, вследствие чего размеры конденсатора и последних ступеней турбины увеличиваются**. Во-вторых, при более глубоком разрежении температура влажного пара в конденсаторе получается более низкой (при давлении 3 кПа температура насыщения воды равна 23,8 °С, а при давлении 2 кПа - соответственно 17,2 °С), вследствие чего разность температур конденсирующегося пара и омывающей конденсатор охлаждающей воды становится слишком малой, **что приводит к увеличению размеров конденсатора**.



Термический КПД цикла Ренкина зависит также и от начальных параметров пара ( $p_1$  и  $T_1$ ). С ростом температуры перегрева пара при одном и том же давлении термический КПД цикла увеличивается, так как возрастает средняя температура подвода теплоты в цикле. Если верхняя температура в цикле  $T_1$  постоянна, то повышение давления пара  $p_1$  также приводит к росту термического КПД цикла: чем выше  $p_1$  тем больше степень заполнения цикла и выше средняя температура подвода теплоты.

Однако по мере роста  $p_1$  при той же температуре перегрева влажность пара на выходе из турбины возрастает, что влечет за собой уменьшение КПД турбины. Поэтому при увеличении начального давления желательно также увеличить температуру пара перед турбиной.

Из сказанного выше очевидно, что чем выше давление пара  $p_1$  и температура  $T_1$  тем выше термический КПД цикла Ренкина.

### 3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. Изобразите цикл Карно на влажном паре на T-s диаграмме.
Ответ:
2. Почему на практике большее распространение получил цикл Ренкина, а не термодинамически более эффективный цикл Карно на влажном паре.
Ответ:
3. Нарисуйте принципиальную схему паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина с однократным перегревом пара и T-s диаграмму такого цикла.
Ответ:
4. Запишите формулу КПД паросилового цикла Ренкина.
Ответ:
5. Нарисуйте зависимость КПД цикла Ренкина от давления пара в конденсаторе.
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: