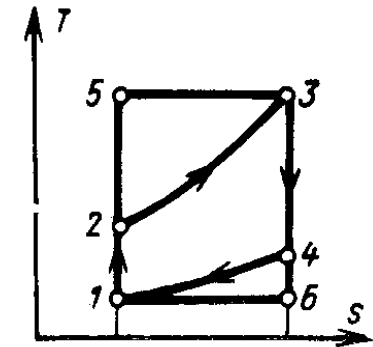


# **ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

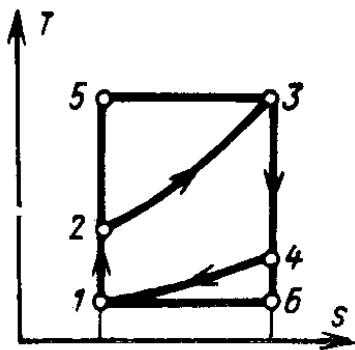
## **Цикл Карно для водяного пара и его недостатки**



Оценивая совершенство какого-либо цикла путем сравнения его с циклом Карно удобно пользоваться коэффициентом заполнения. Эта величина представляет собой отношение площади рассматриваемого цикла в  $Ts$ -диаграмме к площади соответствующего ему цикла Карно.

Например, газовый цикл 1-2-3-4-1 характеризуется коэффициентом заполнения

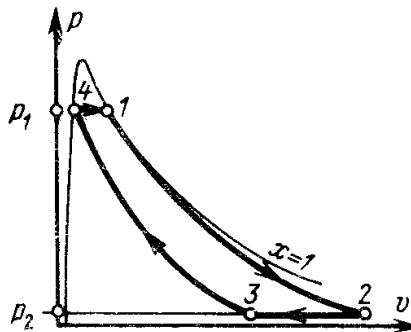
$$j = \frac{\text{пл.}1-2-3-4-1}{\text{пл.}1-5-3-6-1}$$



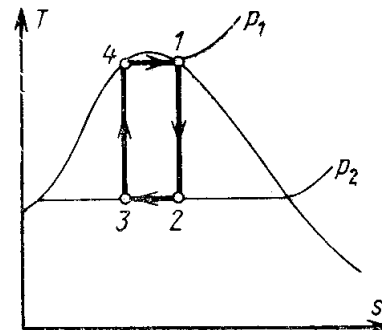
У газовых циклов коэффициент заполнения значительно меньше единицы, потому что изобарные процессы подвода тепла (линия 2-3) и отвода тепла (линия 4-1) осуществляются при переменной температуре.

Если же вместо неконденсирующегося газа в качестве рабочего тела использовать влажный пар какого-либо вещества, то становится возможным доведение коэффициента заполнения цикла до единицы, ибо в области влажного пара изобарные процессы одновременно являются изотермическими.

Рассмотрим вопрос о практической осуществимости на водяном паре цикла Карно, представленную в  $p$ - $J$ - и  $Ts$ -диаграммах.



изобарно-изотермический процесс  
 парообразования 4-1;  
 адиабатное расширение пара 1-2;  
 изобарно-изотермический процесс неполной  
 конденсации 2-3;  
 адиабатное сжатие влажного пара 3-4 с  
 полным превращением его в воду.



При использовании сухого насыщенного пара с параметрами  $p_1=170$  бар и  $t_1=352^\circ\text{C}$  (верхний температурный уровень цикла) конечная влажность его при адиабатном расширении до  $p_2=0,03$  бар по расчёту составляет 41,3%.

Таким образом, двигателю пришлось бы работать в чрезвычайно неблагоприятных гидродинамических условиях очень высокой влажности пара.

На осуществление адиабатного сжатия частично сконденсировавшегося при  $p_2=0,03$  бар отработавшего пара до начального давления  $p_1 =170$  бар с полным превращением его в воду необходимо затратить работу  $l_T = 562$  кДж/кг, что составляет 55,3% всей работы  $l_T =1014$  кДж/кг, совершаемой двигателем.

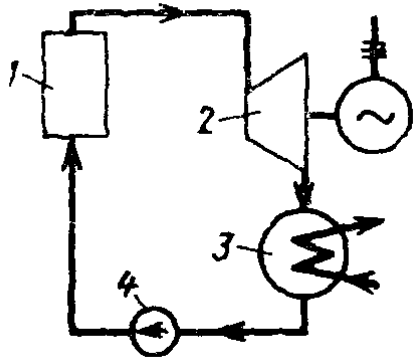
Это означает, что компрессор по своим габаритам был бы соизмерим с самим двигателем, гидродинамические же условия его работы были бы еще тяжелее, чем у последнего (по расчету начальная влажность адиабатного сжатия получается равной 58%, конечная же влажность, как ясно, составляет 100%).



Приведенные данные показывают, что паросиловые установки, в которых нашел бы практическое осуществление цикл Карно, являются бесперспективными.

Поэтому развитие паросиловой техники пошло в другом направлении, связанном с полной конденсацией отработавшего пара и применением перегретого пара.

# Цикл Ренкина



В результате замены парового компрессора насосом, подающим в котел конденсат отработавшего пара, а также введения перегрева пара перед двигателем цикл Карно превращается уже в другой цикл, называемый *циклом Ренкина*.

- 1 – паровой котел с пароперегревателем;
- 2 – паровой двигатель;
- 3 – конденсатор;
- 4 – насос.

Паровой котел представляет собой устройство, в котором производится сжигание топлива и теплота образующихся газообразных продуктов сгорания используется для превращения поступающей в него воды в перегретый (или насыщенный) пар.

Конденсатор представляет собой трубчатый теплообменник, внутренняя поверхность трубок которого охлаждается циркуляционной водой, за счет чего на их наружной поверхности происходит конденсация отработавшего пара.

Скапливающийся внизу конденсат откачивается насосом, который повышает его давление до необходимой величины и подает обратно в котел.

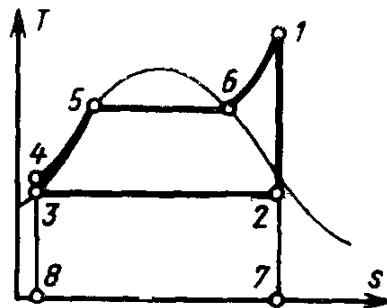
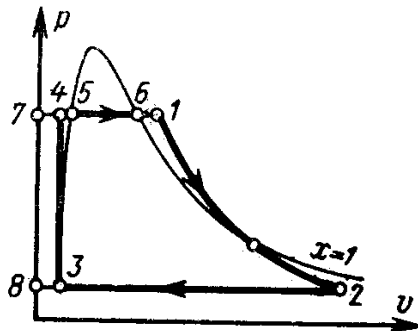
Цикл Ренкина состоит из:

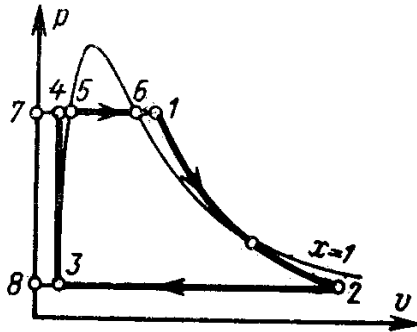
1-2 - адиабатного процесса расширения пара в двигателе;

2-3 - изобарно-изотермического процесса конденсации отработавшего пара в конденсаторе;

3-4 - адиабатного процесса повышения давления воды в насосе;

4-5-6-1 - изобарного процесса парообразования в котле.





На  $pJ$  - диаграмме:

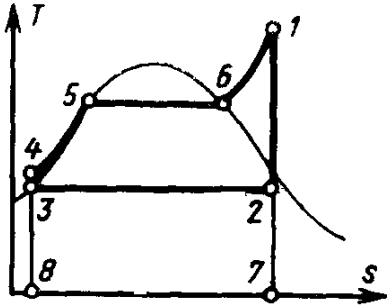
площадь  $1-2-8-7-1$  – техническая работа двигателя  $l_T$ ;

площадь  $3-4-7-8-3$  – техническая работа, затраченная на привод насоса  $l_H$ ;

площадь цикла  $1-2-3-4-1$  – их разность, т.е.

полезная работа цикла  $l_0$ , совершаемая над внешним объектом (над генератором).

На Ts-диаграмме:



площадь 4-5-6-1-7-8-4 – тепло  $q_1$ , получаемое рабочим телом от горячего источника (газообразных продуктов сгорания топлива),

площадь 2-3-8-7-2 – тепло  $q_2$ , отдаваемое рабочим телом холодному теплоприемнику (циркуляционной воде конденсатора),

площадь цикла 1-2-3-4-5-6-1 – их разность  $q_1 - q_2$ , т.е. полезное тепло, превращаемое в работу  $I_0$ .



Поскольку математически работа двигателя  $l_T$  положительна, а работа, затраченная на привод насоса  $l_H$ , отрицательна, полезная работа цикла может быть представлена как алгебраическая сумма этих работ:

$$l_0 = l_T + l_H = i_1 - i_2 - (i_4 - i_3)$$

Предполагая, что вода несжимаема, т.е., что в точках 3 и 4 удельные объемы ее одинаковы ( $J_3 = J_4 = J'_2$ ), получаем:

$$l_H = -(i_4 - i_3) = - \int_{p_3}^{p_4} J dp = - \int_{p_2}^{p_1} J dp = -J'_2(p_1 - p_2)$$

и тогда  $l_0 = i_1 - i_2 - J'_2(p_1 - p_2)$

Тепло, подводимое к рабочему телу от горячего источника

$$q_1 = i_1 - i_4 = i_1 - i_3 - J'_2(p_1 - p_2)$$

а термический к.п.д. цикла Ренкина

$$h_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2 - J'_2(p_1 - p_2)}{i_1 - i_3 - J'_2(p_1 - p_2)}$$

Величина  $i_3$  представляет собой энтальпию кипящей воды при давлении  $p_2$ , которую следует обозначить буквой  $i'_2$ .

Тогда

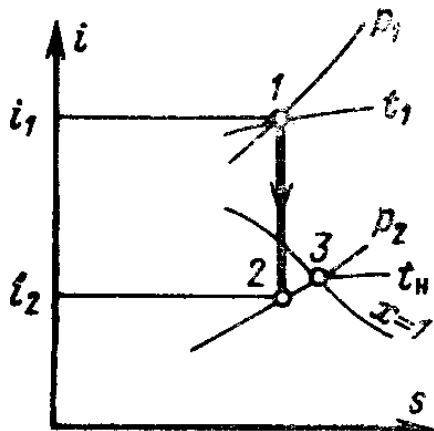
$$h_T = \frac{i_1 - i_2 - J_2(p_1 - p_2)}{i_1 - i'_2 - J_2(p_1 - p_2)}$$

Таково выражение для термического к. п. д. цикла Ренкина с учетом затраты работы на привод насоса.

При анализе работы паросиловых установок с невысоким начальным давлением можно пренебречь затратами работы на привод насоса:

$$h_T = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}$$

Величину термического к.п.д. цикла Ренкина удобно определять графо-аналитическим методом с помощью  $i$ - $s$ -диаграммы:



Помимо термического к.п.д. показателем эффективности цикла Ренкина может служить теоретический удельный расход пара, т.е. количество пара, теоретически расходуемое на единицу работы:

$$d_0 = \frac{1}{i_1 - i_2}, \text{ кДж/кг, или } d_0 = \frac{3600}{i_1 - i_2}, \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$