

- п.1. Введение в ПТУ
- п.2. Цикл Карно насыщенного пара
- п.3. Цикл Ренкина насыщенного пара
- п.4. Цикл Ренкина с перегревом пара

- п.5. Цикл с промежуточным перегревом пара
- п.6. Регенеративный цикл Ренкина
- п.7. Пеплофикационный цикл
- п.8. Парогазовый цикл

Тема 16. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК (ПТУ)

Тепловые двигатели начинались с *паровых машин* и в ближайшей перспективе *паровые*
 п.1. **Введение в ПТУ** основными тепловыми двигателями для энергетики – для ТЭС.

Паротурбинные ТЭС Бывают:

Конденсационными электрическими станциями (КЭС) Теплоэлектроцентралями (ТЭЦ)

Опр. КЭС – станция в которой турбоагрегат работает с противодавлением меньшим, чем атмосферное и отпускает только электрическую энергию.

Опр. ТЭЦ (Теплоэлектроцентраль) – станция в которой турбоагрегат работает с противодавлением порядка атмосферного и отпускает электроэнергию и тепловую энергию.

Опр. КПД ТЭС - $\eta^{ТЭС} = \eta_t \cdot \eta_{отн.ид.цикла} \cdot \eta_{мех.турбины} \cdot \eta_{эл.генератор} \cdot \eta_{трубопроводов} \cdot \eta_{котла}$

Опр. Брутто КПД - КПД станции без учета расходов энергии на собственные нужды $\eta_{бр}^{КЭС} = \frac{E_{ген}}{Q_{тепло}} = \frac{E_{ген}}{\beta \cdot Q_m}$, $E_{ген}$ - генерируемая мощность, $Q_{тепло}$ - мощность тепловыведения, β - расход топлива Q_m - теплота сгорания топлива.

Схема ПТУ на рис.1 →

п.2. Цикл Карно насыщенного пара

Цикл Карно насыщенного пара, диаграмма рис.2. состоит из процессов
 1-2 – адиабатическое расширение в паровой турбине (ПТ)
 2-3 – изобарно-изотермический отвод теплоты в теплообменнике- конденсаторе (КН);
 3-4 – адиабатическое сжатие в питательном насосе (ПН);
 4-1 – изобарно-изотермический подвод теплоты в котле (КТ).

КПД цикла невысокий из-за ограничения на $T_{макс}$ Пример: Si $T_1=310\text{ C}$, $p_1 \sim 98\text{ атм}$,
 $T_2=30\text{ C}$, T_0

Повышение T ведет к уменьшению участка подвода теплоты и уменьшению работы на единицу массы ПТ => требует увеличения расхода воды, массы теплообменников...
 1820-1872

История паровых двигателей очень велика. вращающийся чайник Аристотеля – тоже паровая машина Папен 17 век. – периодический подъем поршня Севери и Ньюкомен 17,18 век насос для шахт Джеймс Ватт 1769 г. вращение вала паровой машиной Иван Ив. Ползунов 1765 2- цилиндровый ПМ для воздухоудных мехов.

ТЭС оснащаются энергетическими агрегатами:
 газотурбинными ми – КПД до 34 %
 паротурбинными – КПД – до 40%
 парогазовыми КПД – до 60 %
 Газотурбинные агрегаты – более маневренные за счет меньшей массы и габаритов

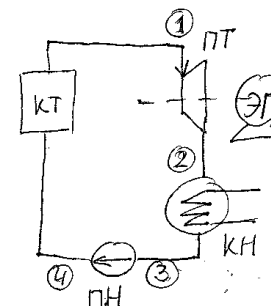


Рис.1. Простейшая схема ПТУ

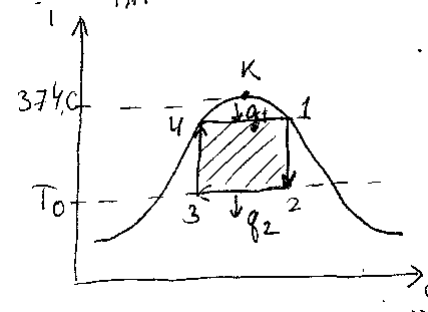


Рис.2. Цикл Карно насыщенного пара

замкнуты. Принята другая последовательность нумерации процессов.

Вопрос. Какова $T_{макс}$ для цикла Карно насыщенного пара? ($T_{критH2O}=374\text{ C}$)

п3. Цикл Ренкина насыщенного пара

Ренкин 1850-е (и Клаузиус) предложили расширить цикл, рис.3.

Работа

Охлаждение идет до полностью влажного пара (2-3), насос переводит пар в воду (3-4), поэтому повышение давления почти не требует энергетических затрат, подогрев воды по изобаре (4-5) приводит в состояние влажного насыщенного пара

КПД цикла Ренкина насыщенного пара ниже КПД цикла Карно.

Преимущества: - простота и надежность агрегатов;

- больше работа на единицу расхода РТ (производительность цикла).

Регенерация тепла может повысить КПД, рис.4.

Из-за простоты и надежности применяется в атомной энергетике

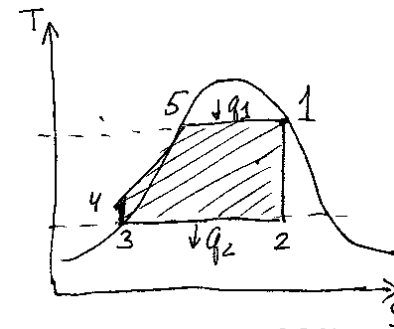


Рис.3. Цикл Ренкина насыщенного пара

Ренкин Уильям Джон (1820-1872) род., учился Эдинбург. 1850 составил таблицы водяных паров 1870 – изучал ударные волны в газах Ввел термины изотермический, адиабатический процесс

п.4. Цикл Ренкина с перегревом пара

Рост КПД возможен при увеличении $T_{\text{макс}}$ за счет перегрева пара выше $T_{\text{насыщ}}$ Рис.5.

Преимущества

1. увеличение среднеинтегральной подвода тепла и => КПД,
2. уменьшение неравновесности (градиентов температур) при передаче Q от газа к пару в котле (пароперегревателе),
3. уменьшение вязкости пара и потерь на трение в турбине.
4. увеличение производительности цикла

Сегодня все ТЭС на органическом топливе работают по циклу Ренкина с перегревом пара

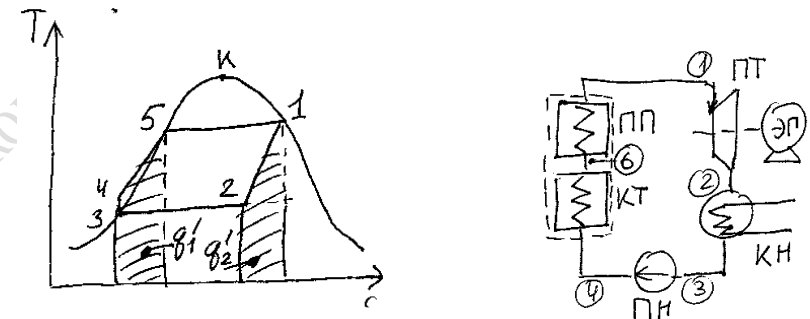


Рис.4. Регенерация теплоты цикла Ренкина насыщенного пара

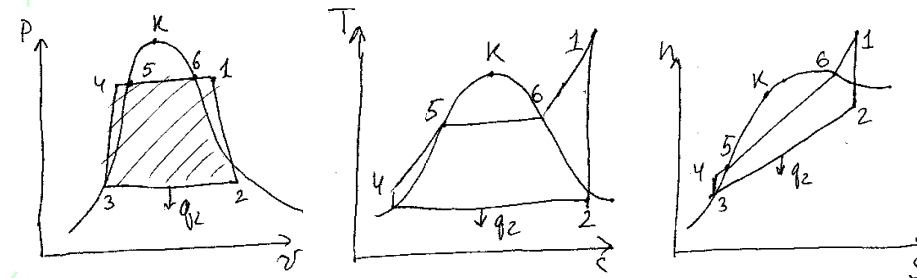


Рис.5. Диаграммы цикла Ренкина с перегревом пара

КПД цикла Ренкина с перегревом
(учитываем 4-1 изобара =>) (*)

h_1 – энт. перед турбиной; h_2 – энт. после турбины; h_3 - энт. воды на входе (вблизи точки кипения). Т.е. всего три определяющих параметра, например, p_1 , T_1 , p_2 (поскольку p_2 определяет энтальпию h_3)

Задача. Найти КПД цикла Ренкина с параметрами $p_1 = 20$ атм, $T_1 = 500$ С, $p_2 = 1$ атм. (исп. h-s диагр.)

Зависимость КПД цикла Ренкина с перегревом от основных параметров (T_p , p_1 и p_2):

- 1) Рост T_p увеличивает η . Из (*) также \Rightarrow что рост T_p ведет к росту η (вплоть до T_p при бесконечно высокой энтальпии) \Rightarrow при $T_p \nearrow \Rightarrow \eta \nearrow$.
- 2) Влияние p_1 при фиксированных T_p и p_2 проанализируем графически на $h-S$ диаграмме, рис.6. Видно, что η меняется слабо, а q_{in} - сильнее \Rightarrow
 \Rightarrow при $p_1 \nearrow \Rightarrow q_{in} \searrow, \eta \nearrow$

Видно также, что при $p_1 \nearrow$ растет влажность пара в турбине и после нее что *плохо!*
 Поэтому следует повышать T_p перегрева или использовать промежуточный перегрев.

- 3) Рост p_2 сильно уменьшает полезную работу и в меньшей степени подводит теплоты \Rightarrow
 \Rightarrow при $p_2 \nearrow \Rightarrow q_{in} \searrow, \eta \searrow$

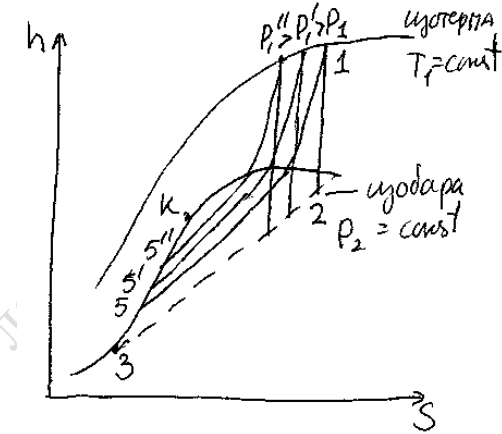


Рис.6. Влияние верхнего давления p_1 на КПД

п.5. Цикл с промежуточным перегревом пара

Присутствие капель воды при работе РТ увеличивает потери на трение, создает условия для кавитации на лопатках турбины, поэтому его целесообразно дополнительно перегревать

- 1) Из диаграммы цикла видно, что во время работы с промежуточным перегревом пар либо сухой перегретый, либо насыщенный с малой влажностью.
- 2) КПД растет т.к. растет среднеинтегральная температура подвода теплоты

Современные ТЭС используют многоступенчатый регенеративный (см п.6) подогрев до 9 ступеней и КПД_{ТЭС} до 40-42 %

Основная характеристика: - коэф. Джоуля-Томсона или дифференциальный дроссель-эффект

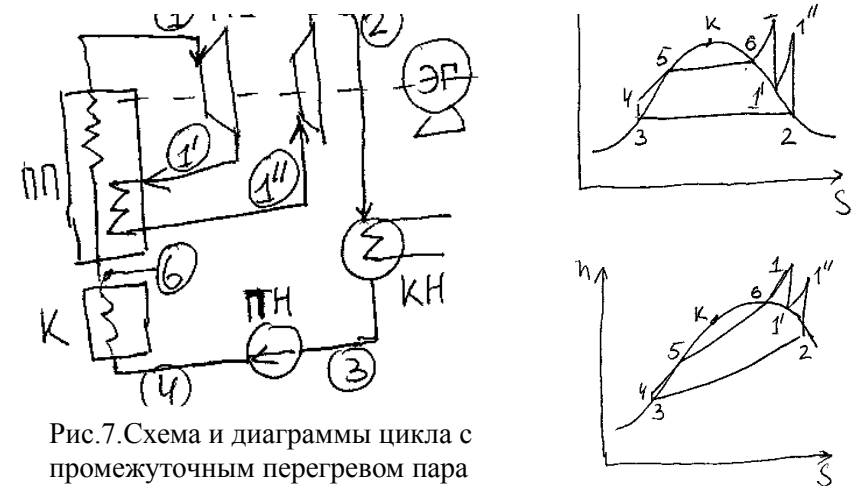


Рис.7. Схема и диаграммы цикла с промежуточным перегревом пара

п.6. Регенеративный цикл Ренкина

Повышение КПД ПТУ возможно прежде всего за счет регенерации теплоты, поскольку возможности повышения ограничены, также ограничена возможность изотермического подвода тепла (многоступенчатость для ГТУ)
 Обычно введение регенерации повышает КПД до 10-15%.
 Имеются и другие эффекты регенерации на конструкцию турбин...

Простая многоступенчатая регенерация, - диаграмма и схема приведены на рис.8,9.

Особенности:

- 1) Уменьшение работы на 2-2'-3 ведет к увеличению расхода РТ на ед. мощности
- 2) Но растет КПД (расчет по $h-S$ диаграмме)
- 3) Снижаются требования к нижним ступеням турбины (более низкие параметры)

Применяют также *регенеративные схемы с отбором РТ*, схема на рис.10.
 Диаграмма цикла не может быть изображена стандартным образом т.к. РТ делится (процессы различные для различных частей РТ, требуется свой цикл для каждой массовой доли РТ)

Особенности сходны с регенеративным циклом, рассмотренным ранее.

- 1) КПД растет
- 2) В связи с уменьшением массы РТ на нижних ступенях турбины, уменьшаются их массогабаритные характеристики
- 3) уменьшается неравномерность подогрева РТ (т.к. падает ΔT в теплообменниках)

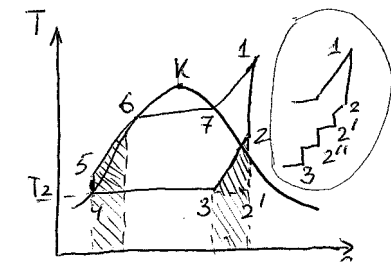


Рис.8. Диаграмма цикла с многоступенчатой регенерацией

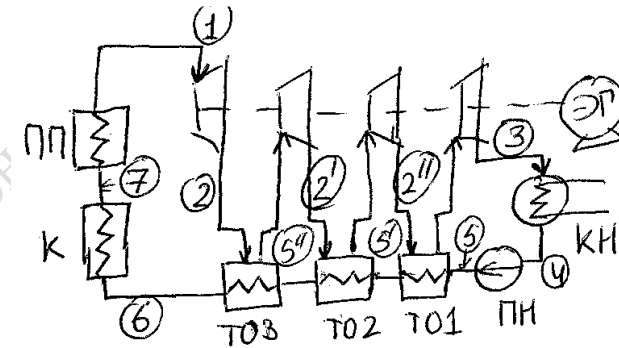


Рис.9. Схема многоступенчатой регенерации теплоты

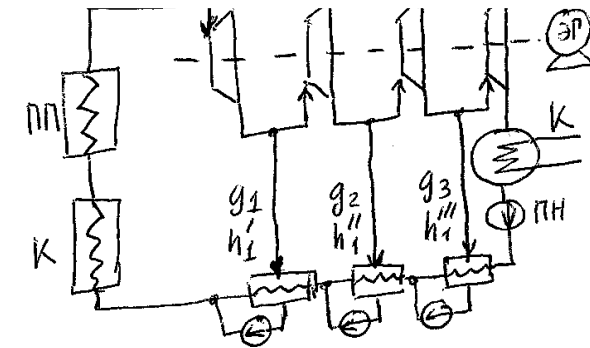


Рис.10. Каскадная схема регенеративного подогрева с отбором РТ

Для расчета КПД регенеративного цикла с отбором РТ обращаем внимание на то, что в схеме рис.10 по существу реализуется 4 отдельных внутренних цикла с массовыми расходами РТ g_1, g_2, g_3 и ($G - g_1 - g_2 - g_3$). Для каждого цикла можно построить диаграмму, определить подвод и отвод тепла и КПД. Подвод тепла, очевидно, определяется полным подводом q_1 и пропорционален массовым расходам внутренних циклов.

$$q_1' = q_1 g_1$$

$$q_1'' = q_2 g_2 \text{ и т.д.}$$

Задача. Показать, что КПД такой системы определится через КПД внутренних циклов

П7. Теплофикационный цикл

При сложной рекуперации реальный КПД ПТУ не превосходит 35-40 %.
Радикальным решением является использование сбросное теплоту для технических и коммунально-бытовых нужд.
Т.е. охлаждающая вода из конденсатора пропускается через отопительные приборы.

Поскольку требования на бытовую воду $T_{\text{бытовая}} > 70 \text{ C}$, то $T_{\text{пара}} \sim 100 \text{ C}$, а давление $p_{\text{пара}} \sim 1 \text{ атм}$. Поэтому турбина работает с противодавлением $\sim 1 \text{ атм}$.

Штриховкой обозначена потеря работы цикла за счет высокой температуры в КН

Регулируемый промежуточный отбор тепла

Чтобы избавиться от жесткой связи между $Q_{\text{электричество}}$ и $Q_{\text{тепло}}$ используют регулируемый промежуточный отбор тепла, рис.12.

Расход пара G выбирается в зависимости от необходимой теплофикационной нагрузки.

На практике в ТЭЦ одновременно *регулируемый* + *нерегулируемый* отбор теплоты. Последний используется для осуществления *регенеративных циклов*

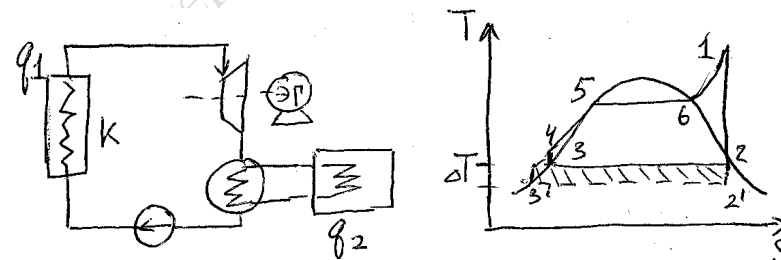
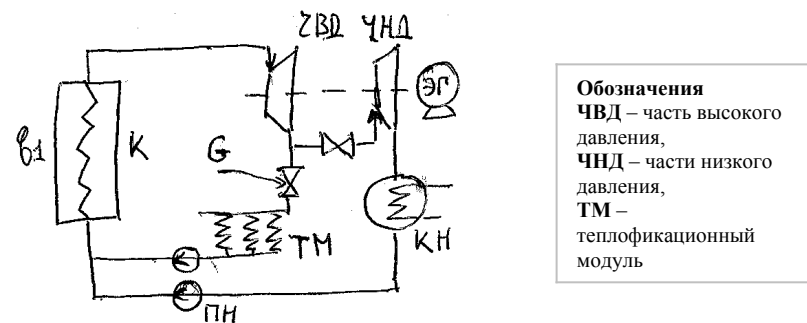


Рис.11.Схема и диаграмма простого теплофикационного цикла



Обозначения
ЧВД – часть высокого давления,
ЧНД – части низкого давления,
ТМ – теплофикационный модуль

Рис.12.Схема теплофикационного цикла с регулируемым промежуточным отбором тепла

П8. Парогазовые циклы

Опр. ПГУ (парогазовая установка) – энергетическая установка ТЭС в которой одновременно применяется два РТ - пар и газ.

ПГУ имеют Паротурбинную часть (ПТЧ) и Газотурбинную часть (ГТЧ)

Особенности и преимущества

- 1) КПД ПГУ достигает 60 % (при 30-40 % для ГТУ и ПТУ),
- 2) Потребление воды на единицу мощности меньше (в соотв. с КПД),
- 3) Компактность,
- 4) Более высокая экологичность установки (в соотв. с КПД).

ПРАКТИКА

Задача 6.1 (Теплотехника Баскакова)

Задача 6.3 (Теплотехника Баскакова)

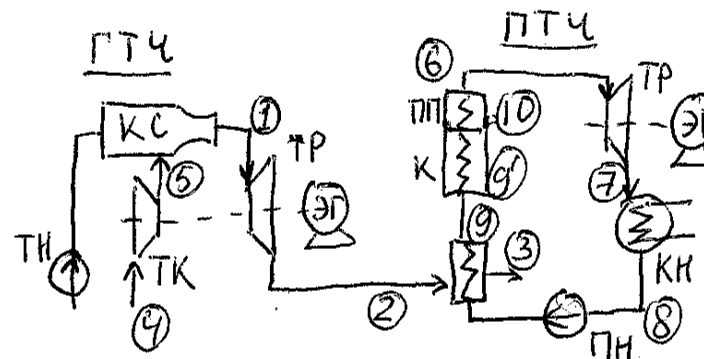


Рис.13.Схема простейшей ПГУ

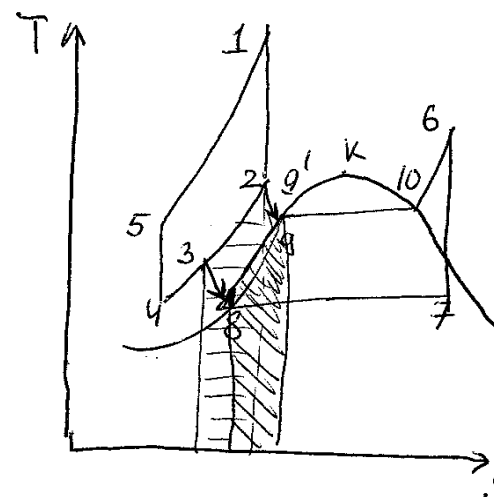


Рис.14.Циклы простейшей ПГУ.
(Совмещение циклов – условное ввиду различных РТ в циклах)

