

# ТНис 10

- Турбины
- Газотурбинные установки (ГТУ)
- Парогазовые установки (ПГУ)
- Циклы прямого преобразования

# Турбины

**Турбина** – это тепловой двигатель, предназначенный для преобразования тепловой энергии рабочего тела в механическую энергию вращения ротора.

В паровых турбинах рабочим телом является водяной пар (реальный газ), а в газовых – продукты сгорания топлива (почти идеальный газ).

# Турбины

Паровые турбины подразделяются на **конденсационные** (типа «К») и **теплофикационные** (типа «Т» и «ПТ»):

- турбины с теплофикационным отбором пара (типа «Т»).

Отбор пара при давлениях 0,7...2,5 бар используется в системах теплофикации (отопления и горячего водоснабжения);

# Обозначение паровых турбин

- турбины типа «П» с регулируемыми отборами пара при давлениях 5...12 бар, предназначенными для производственных нужд;
- турбины типа «ПТ» с двумя отборами пара;
- турбины с противодавлением (типа «Р»), когда отработавший в турбине пар используется для производственных нужд;

Примеры обозначений турбин: К-800-240; ПТ-135-130/7; Р-100-130/15, где первая цифра – мощность в МВт, вторая – давление свежего пара в барах.

# Обозначение паровых турбин

Цифра в знаменателе: теплофикационной турбины – давление регулируемого отбора пара в барах; турбины с противодавлением – давление противодавленческого пара.

По давлению свежего пара турбины бывают:

$p_0 \leq 40$  бар – среднего давления;

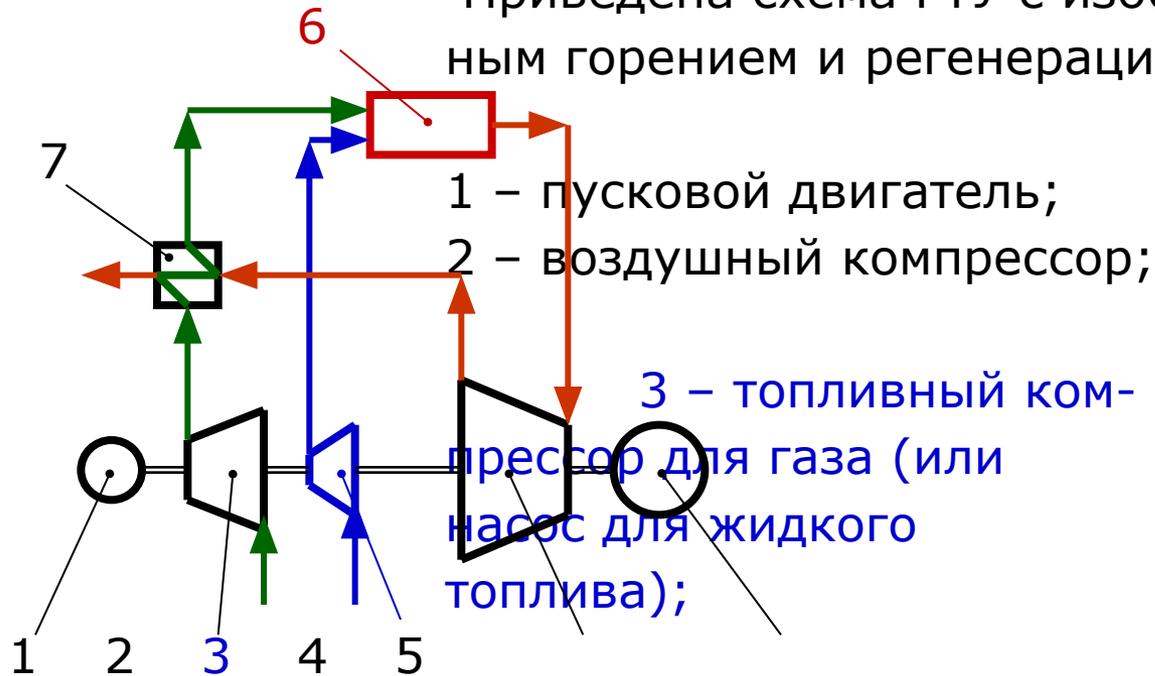
$p_0 \leq 90$  бар – высокого давления;

$p_0 \leq 130$  бар – повышенного давления;

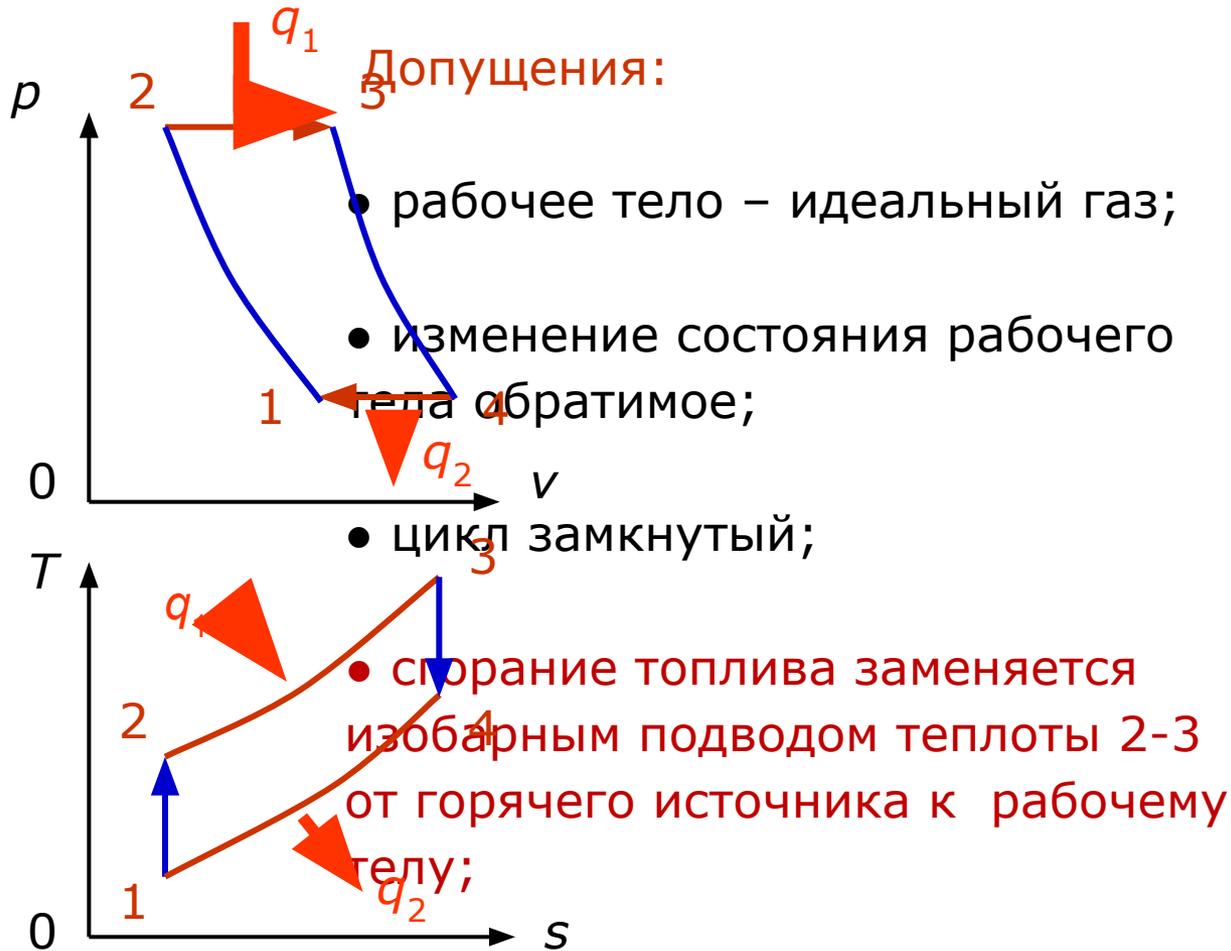
$p_0 > p_{кр}$  – сверхкритического давления.

# Газотурбинная установка (ГТУ)

Приведена схема ГТУ с изобарным горением и регенерацией.



# Цикл ГТУ без регенерации



# Термический КПД цикла ГТУ

- выпуск газов в окружающую среду заменяется изобарным отводом теплоты 4-1 от рабочего тела к холодному источнику.

1-2 адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре;

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине.

Основным показателем цикла является его **термический КПД**:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

# Соотношения между параметрами в процессах

Для адиабатных процессов 3-4 и 1-2 соотношение между параметрами  $p_4 v_4^k = p_3 v_3^k$ ;  $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$ .

Поделив левые и правые части двух последних соотношений, и сократив  $p_4 = p_1$  и  $p_3 = p_2$ , получим:

$$v_4/v_1 = v_3/v_2.$$

В изобарных процессах 2-3 и 4-1 объемы газа изменяются пропорционально температурам

$$T_4/T_1 = v_4/v_1; T_3/T_2 = v_3/v_2.$$

Поэтому в выражении (1) последняя дробь сокращается.

# Окончательное выражение термического КПД цикла ГТУ

Вводим понятие степени сжатия в компрессоре:

$$\beta = p_2/p_1,$$

учитываем, что для адиабатного процесса:

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}.$$

Тогда окончательное выражение термического КПД ГТУ

$$\eta_t = 1 - 1/\beta^{(k-1)/k}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что при увеличении степени повышения давления  $\beta$  термический КПД растет.

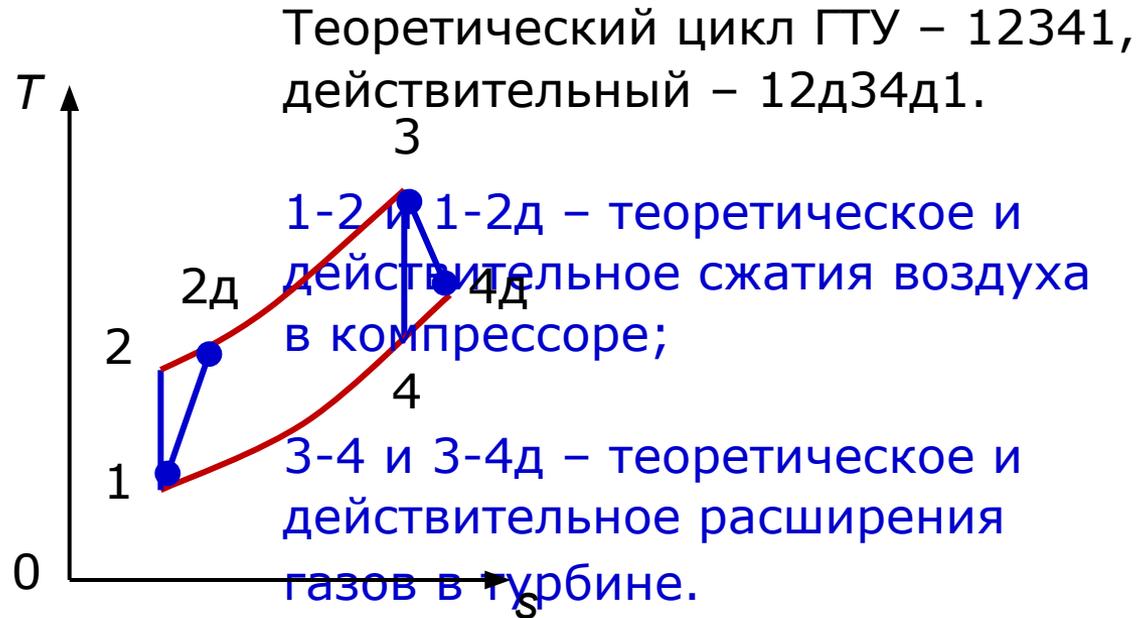
# ГТУ с регенерацией теплоты уходящих газов

В простейшей схеме ГТУ без регенерации основными являются потери с уходящими газами ( $T_4=400$  °С и выше).

Поэтому все ГТУ бывают с регенерацией теплоты уходящих газов для подогрева сжатого в компрессоре воздуха перед подачей его в камеру сгорания.

На вышеприведенной схеме была изображена именно такая газотурбинная установка.

# Учет необратимости в ГТУ



# Учет необратимости в ГТУ

Необратимые потери в ГТУ учитываются **внутренними относительными КПД**

компрессора:

$$\eta_k = (T_2 - T_1) / (T_{2д} - T_1)$$

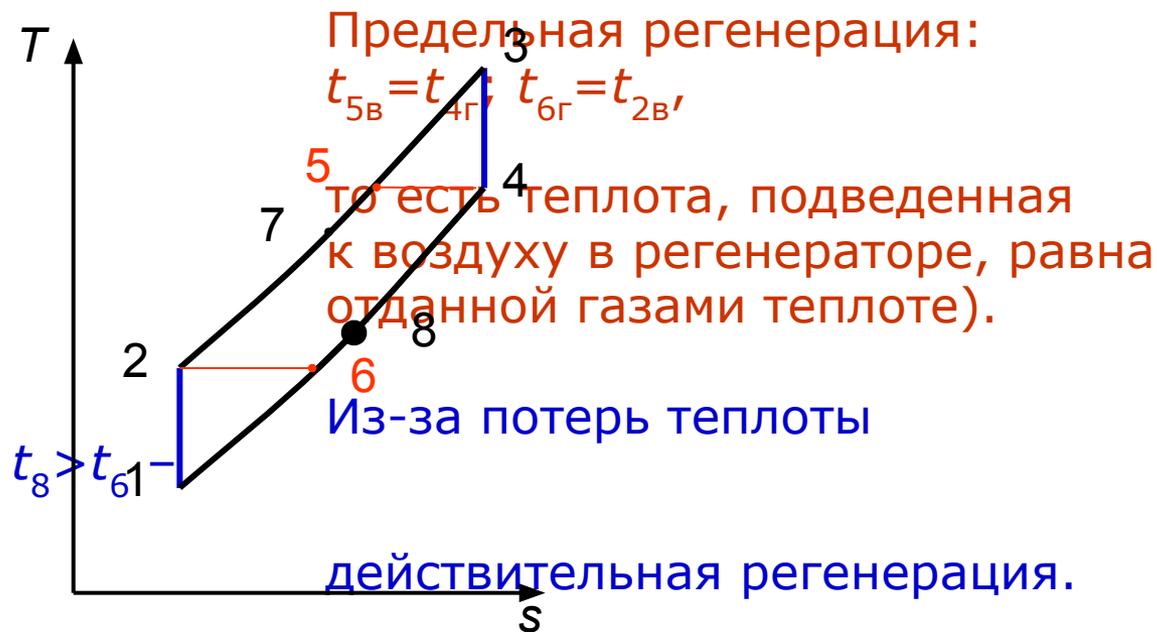
и турбины:

$$\eta_T = (T_3 - T_{4д}) / (T_3 - T_4)$$

Индикаторная  
работа ГТУ, Дж/кг:

$$l_i = c_p (T_3 - T_4) \eta_{\delta}^{(3)} \frac{c_p (T_2 - T_1)}{\eta_{\hat{e}}}$$

# ГТУ с регенерацией



Степень регенерации:

$$\sigma = \frac{T_7 - T_2}{T_5 - T_2} = \frac{T_4 - T_8}{T_4 - T_6}$$

Регенерация повышает КПД газотурбинной установки, то есть снижает удельный расход топлива.

# Процессы цикла ГТУ с регенерацией

Процессы цикла ГТУ с регенерацией теплоты уходящих газов для подогрева воздуха:

1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре;

2-7 – изобарный нагрев воздуха в регенераторе;

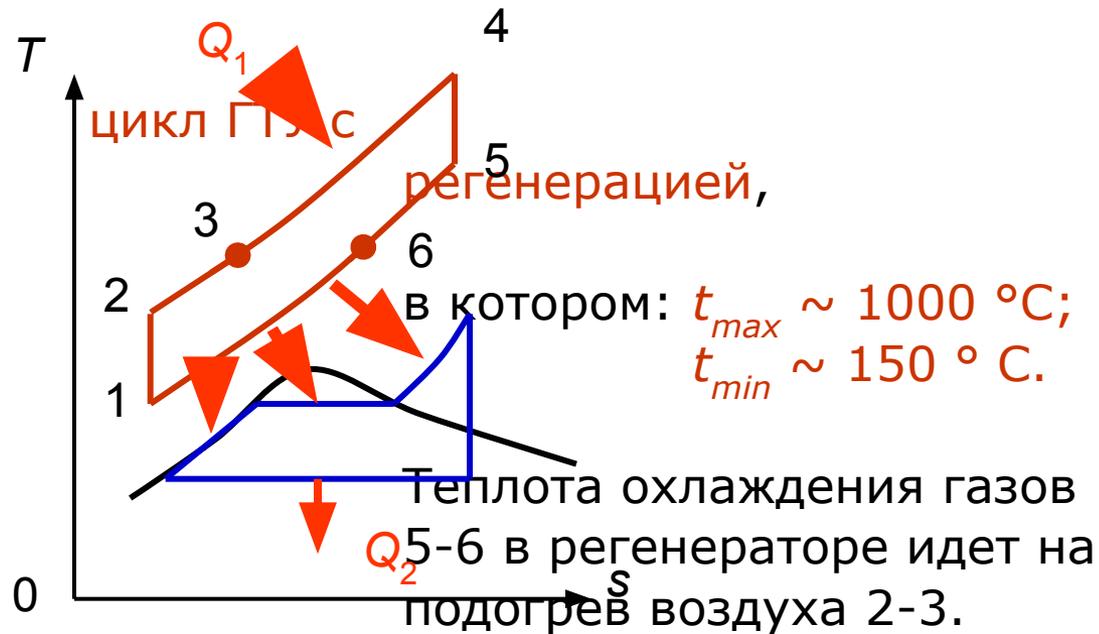
7-3 – изобарный подвод теплоты  $q_1$  в камере сгорания;

3-4 – адиабатное расширение газа в турбине;

4-8 – изобарное охлаждение газа в регенераторе;

8-1 – изобарный отвод теплоты  $q_2$  от газа к окружающему воздуху.

# Цикл парогазовой установки (ПГУ)



1234561 -

Оставшаяся теплота газов используется для генерации пара в паротурбинной установке.

# Диапазон температур в ПГУ

Цикл ПТУ изображен синим цветом.

В цикле ПТУ:  $t_{max} \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{min} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В цикле ПГУ:  $t_{max} \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{min} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

поэтому КПД ПГУ выше отдельных ГТУ и ПТУ,  
то есть комбинированный цикл экономичнее.

Для генерации 1 кг пара необходимо иметь  $m$  кг газа.

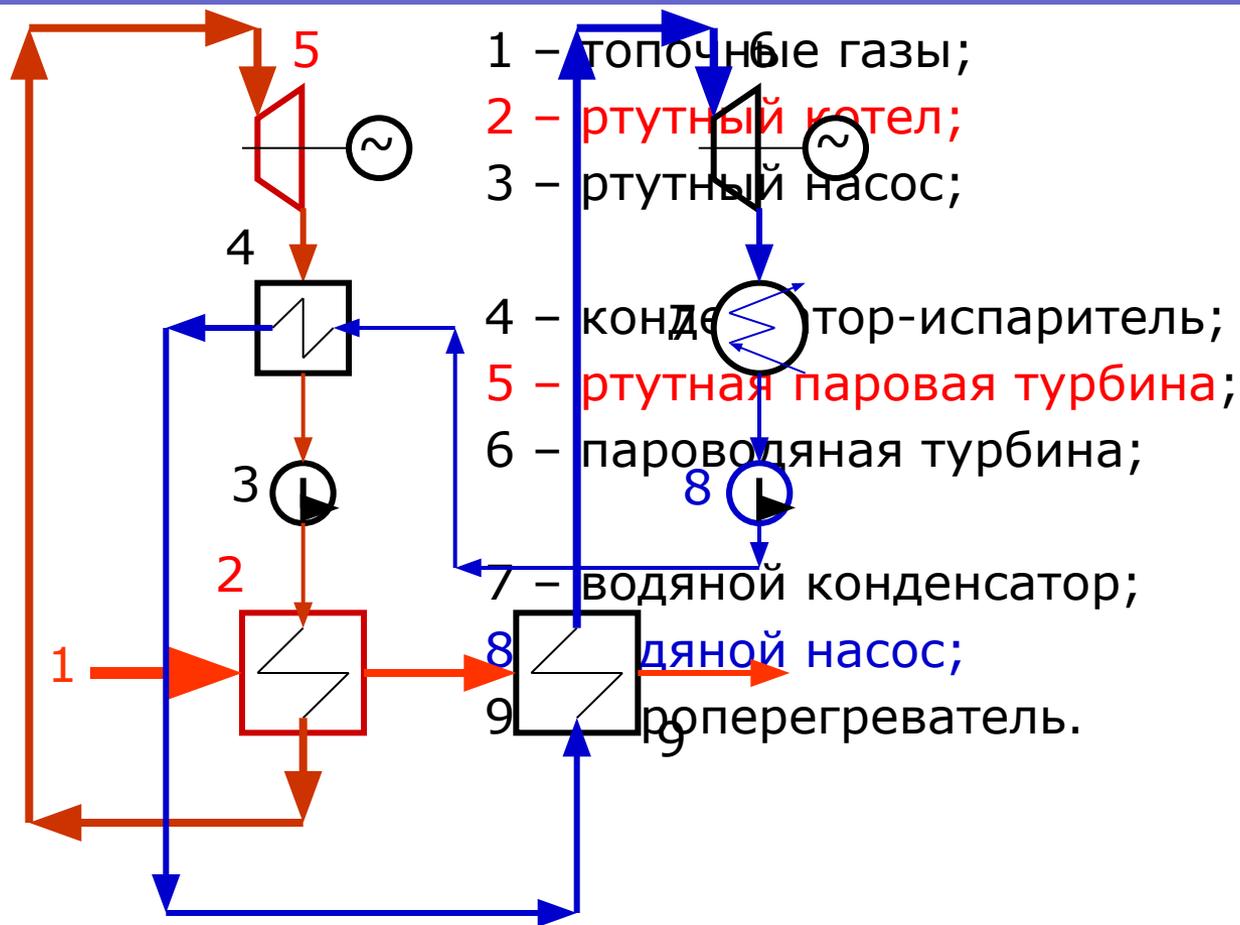
## К бинарному циклу

Повышение начальных параметров пара в цикле Ренкина ограничено критическими параметрами водяного пара  $p_{кр} \sim 221$  бар,  $t_{кр} \sim 374$  °С.

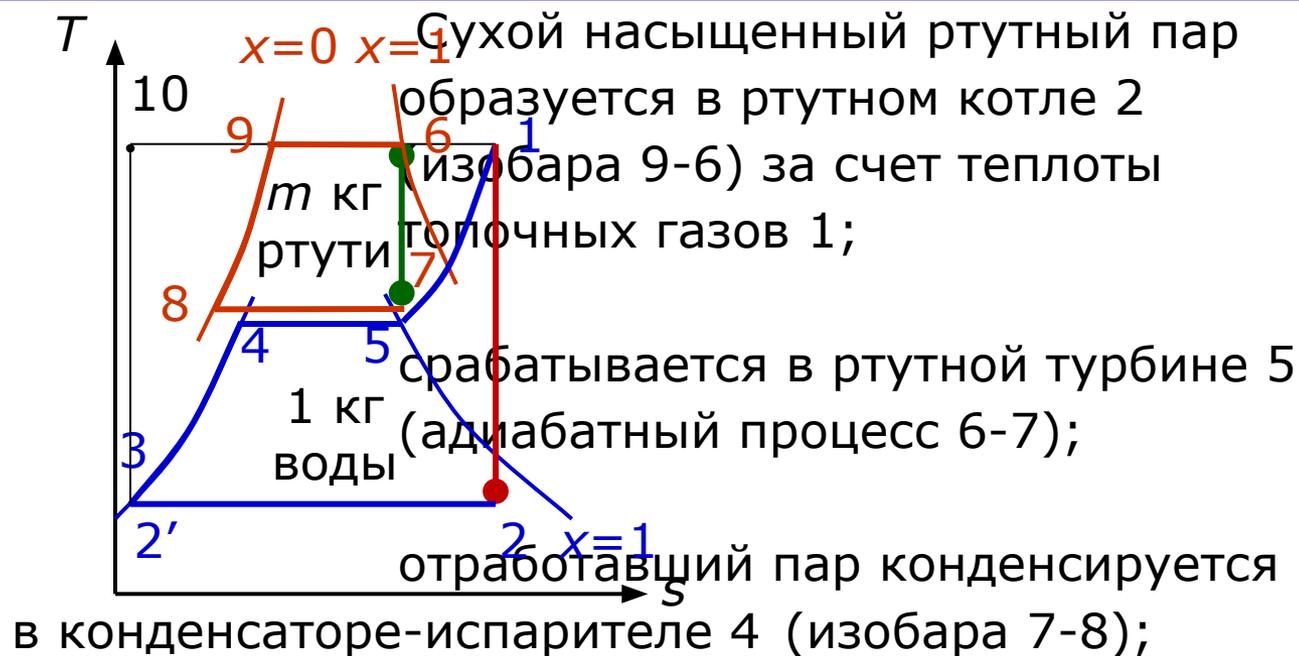
Несмотря на перегрев пара до  $t_1 \sim 550$  °С и высокое давление острого пара  $p_1 \sim 240$  бар, по термическому КПД цикл Ренкина значительно уступает циклу Карно.

Если взять в качестве второго рабочего тела бинарного цикла ртутный пар ( $p_{кр} \sim 1500$  бар,  $t_{кр} \sim 1480$  °С), то при температуре насыщения  $t_H \sim 550$  °С его давление насыщения будет не высоким ( $p_H = 14,5$  бар).

# Схема бинарной ртутно-водяной ПТУ



# Цикл бинарной ртутно-водяной ПТУ



за счет теплоты конденсации ртутного пара вода нагревается до  
 температуры насыщения (изобара 3-4) и превращается в пар  
 (изобарно-изотермический процесс 4-5);

# Процессы водяного пара

конденсат ртутного пара насосом 3 снова подается в котел 2, а сухой насыщенный водяной пар за счет теплоты топочных газов перегревается в пароперегревателе 9 (изобара 5-1);

перегретый водяной пар срабатывается в паровой турбине 6 (адиабатное расширение 1-2);

отработавший водяной пар конденсируется в конденсаторе 7 (изобарно-изотермический процесс 2-2').

Так как скрытая теплота парообразования ртути в несколько раз ниже таковой для воды, да еще воду надо нагреть до температуры насыщения; поэтому расход ртутного пара через конденсатор-испаритель должен быть в  $m$  раз больше:  $m = (h_{5в} - h_{3в}) / (h_{7рт} - h_{8рт})$ .

# Термический КПД бинарного цикла

Наряду с бинарным циклом в  $Ts$ -диаграмме показан цикл Карно 1-2-3-10 в том же диапазоне температур.

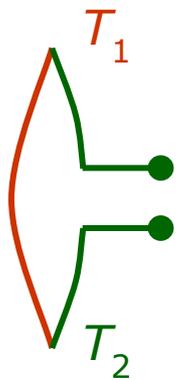
Полнота заполнения бинарного цикла много больше, чем цикла Ренкина для водяного пара, поэтому **термический КПД бинарного цикла** ближе к таковому цикла Карно:

$$\eta_{t\hat{a}} = \frac{L_{\delta\delta} + L_{\hat{a}}}{Q_1} = \frac{m(h_{6\delta\delta} - h_{7\delta\delta}) + (h_{1\hat{a}} - h_{2\hat{a}})}{m(h_{6\delta\delta} - h_{8\delta\delta}) + (h_{1\hat{a}} - h_{5\hat{a}})}$$

Теплота  $(h_{1\hat{a}} - h_{5\hat{a}})$  ~~только на перегрев водяного пара~~, так как нагрев воды до температуры насыщения и испарение ее происходит за счет теплоты конденсации ртутного пара.

Несколько ртутно-водяных ПТУ мощностью 2...20 МВт были построены в 20-х 30-х годах, но из-за вредности и сложности они не получили широкого распространения.

# Прямое преобразование теплоты в электроэнергию



На рисунке изображен **термоэлектрический преобразователь**, в основу действия которого положен эффект немецкого физика Зеебека.

В цепи из двух разных проводников возникает разность потенциалов  $\Delta E$ , если спаи этих проводников находятся в средах с разной температурой ( $T_1$  – **горячий спай**,  $T_2$  – **холодный**).

Разность потенциалов пропорциональна  $\Delta T$  спаев, что широко используется для измерения температур (термопары: медь-константан, хромель-копель и др.).

# Термоэлектрические преобразователи

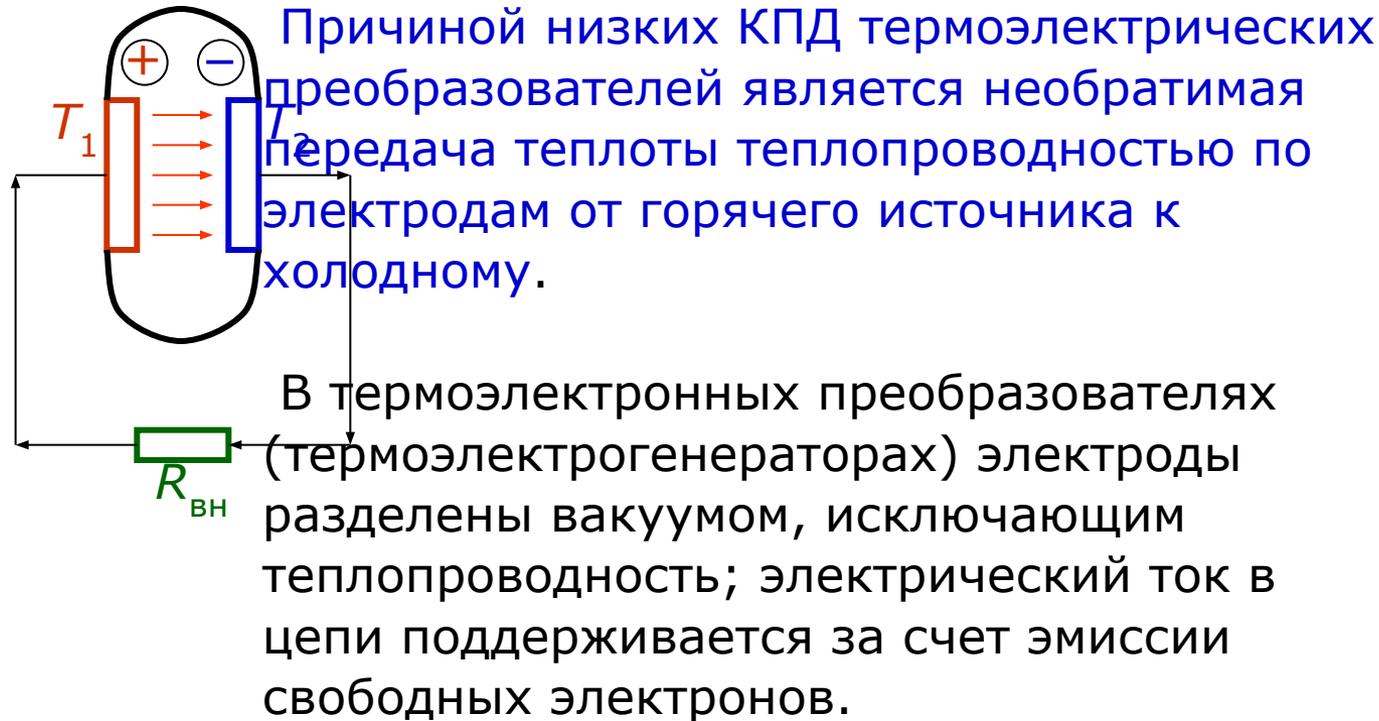
Если термоэлектрическая цепь замкнута на электрическую лампочку или нагреватель, то в цепи возникнет ток.

Итак, термоэлектрический эффект можно использовать для производства электроэнергии.

Академик Иоффе в 1929 году указал на перспективность применения для этой цели полупроводников; например, термоэлектродгенератор на базе  $\text{MnSi}_2$  при  $\Delta T = 1000 \text{ K}$  имеет КПД преобразования около 10 %.

Полупроводники на основе боридов и карбидов могут дать КПД до 20 %.

# Термоэлектрические преобразователи



# Принцип действия

Металлы в нагретом состоянии испускают (эмиттируют) свободные электроны со своей поверхности.

При  $T_1 \gg T_2$  эмиссия электронов с горячего электрода будет интенсивнее, поэтому холодный электрод будет иметь отрицательный заряд и между пластинами возникнет разность потенциалов.

Если цепь замкнуть на внешнее сопротивление, то в цепи пойдет электрический ток.

Эмиссию можно назвать «испарением» электронов с поверхности эмиттера за счет подвода к нему теплоты.

# Термический КПД

Накопление электронов на поверхности холодного электрода – «конденсация» электронов с выделением теплоты.

Термический КПД термоэлектронного преобразователя:

$$\eta_t = N/Q_1,$$

где  $N$  – электроэнергия, отданная потребителю, Вт;  
 $Q_1$  – теплота, подведенная от горячего источника, Вт.

Последнее время термоэлектронные преобразователи привлекают к себе все большее внимание.

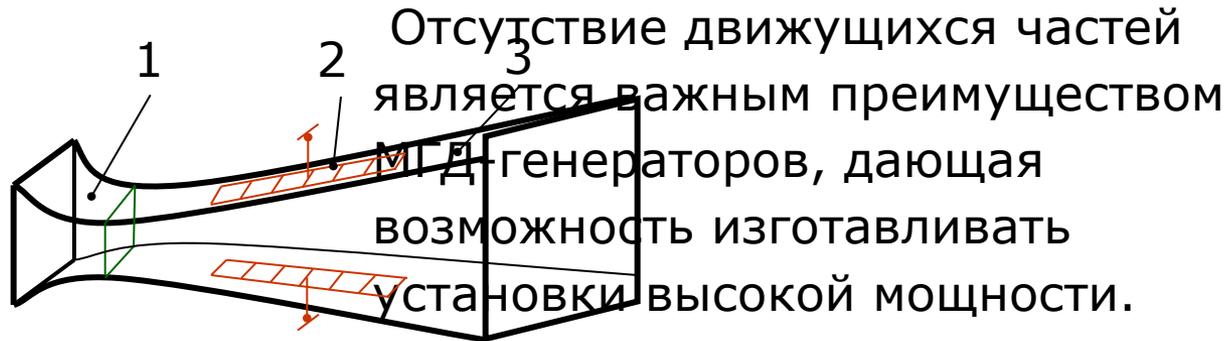
# МГД-установки

**МГД-генераторы (магнитогидродинамические)** можно условно отнести к прямым преобразователям тепловой энергии в электрическую.

В них теплота от продуктов сгорания передается газообразному рабочему телу, которое затем расширяется в комбинированном сопле, приобретая значительную кинетическую энергию; а уже потом последняя преобразуется в электроэнергию в канале МГД-генератора.

Было бы правильнее назвать их установками без машинного преобразования теплоты в электроэнергию, так как в них нет движущихся частей.

# Канал МГД-генератора



Рабочим телом является газ с ионизирующими добавками (щелочными металлами, например, калием или цезием); газ нагревается до столь высоких температур, что частично ионизируется, то есть переходит в состояние плазмы.

Затем этот электропроводящий газ расширяется в сопле 1, разгоняясь до скорости порядка 1000 м/с и поступает в канал 3 МГД-генератора.

# Генерирование электроэнергии

В канале с помощью специальной магнитной системы создается магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны оси канала.

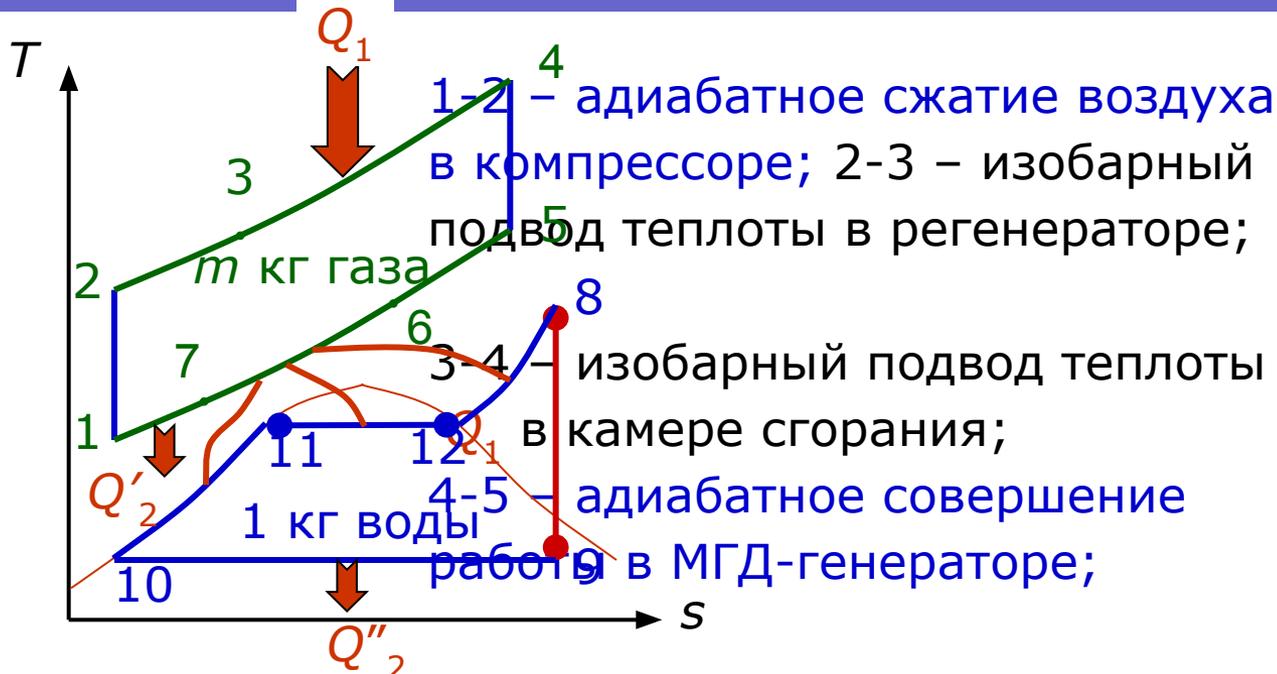
При пересечении проводником (плазмой) силовых линий магнитного поля в объеме МГД-установки генерируется **электроэнергия**, которая отводится с помощью электродов 2, подключенных к потребителю электроэнергии.

Отсутствие движущихся частей позволяет повысить температуру газа на входе в МГД-генератор до порядка 2500 °С, которая в несколько раз превышает таковую в ПТУ и ГТУ; это позволяет повысить **термический КПД установки до ~70 %**, что значительно выше, чем в паро- и газотурбинных установках.

# Схема МГД-установки



# Цикл МГД-установки



5-6 – изобарный отвод теплоты от газов в регенераторе;  
6-7 – изобарный отвод теплоты от газов в парогенераторе;  
7-1 – изобарный отвод теплоты  $Q'_2$  от газов в окружающую среду.

# Термический КПД

На выходе из регенератора газ имеет высокую температуру, поэтому его теплота используется в пароводяном цикле Ренкина 8-9-10-11-12-8 для нагрева воды до температуры насыщения, генерации пара и его перегрева.

По аналогии с бинарным ртутно-водяным циклом расход газа в цикле МГД находится по уравнению теплового баланса, кг/с:

$$m = \frac{h_{8i} - h_{10a}}{h_{6a} - h_{7a}}$$

Термический КПД цикла МГД:

$$\eta_t = \frac{ml - l}{Q_1} = \frac{m(l_{a0} - l_{ae}) + l_{i0}}{Q_1} = \frac{m[(h_{4a} - h_{5a}) - (h_{2a} - h_{1a}) + (h_{8i} - h_{9i})]}{m(h_{4a} - h_{3a})}$$