

Круговые процессы (циклы)

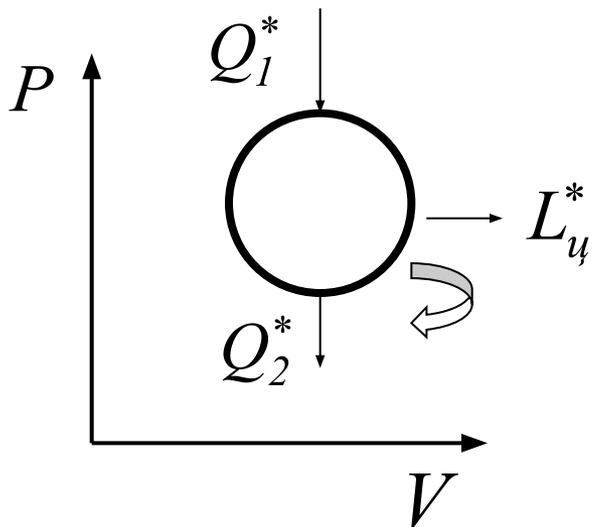
Круговыми процессами называются замкнутые процессы, характеризующиеся возвратом системы (рабочих тел) в исходное состояние, то есть в исходное состояние возвращаются параметры состояния, а значит интегральное изменение любой функции состояния равно нулю:

$$\oint dz = 0 \quad \text{где } z = p; V(v); T; U(u); H(h) \text{ и т.п.}$$

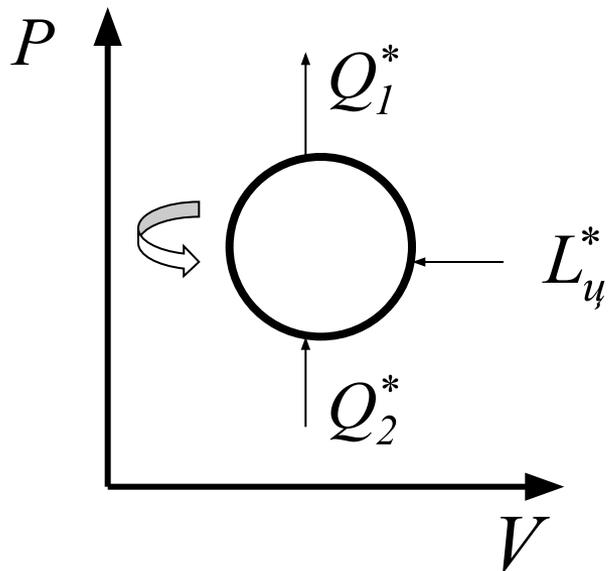
Круговые процессы, как периодически повторяющиеся, реализуются в тепловых машинах (тепловых двигателях и холодильных машинах) и называются циклами.

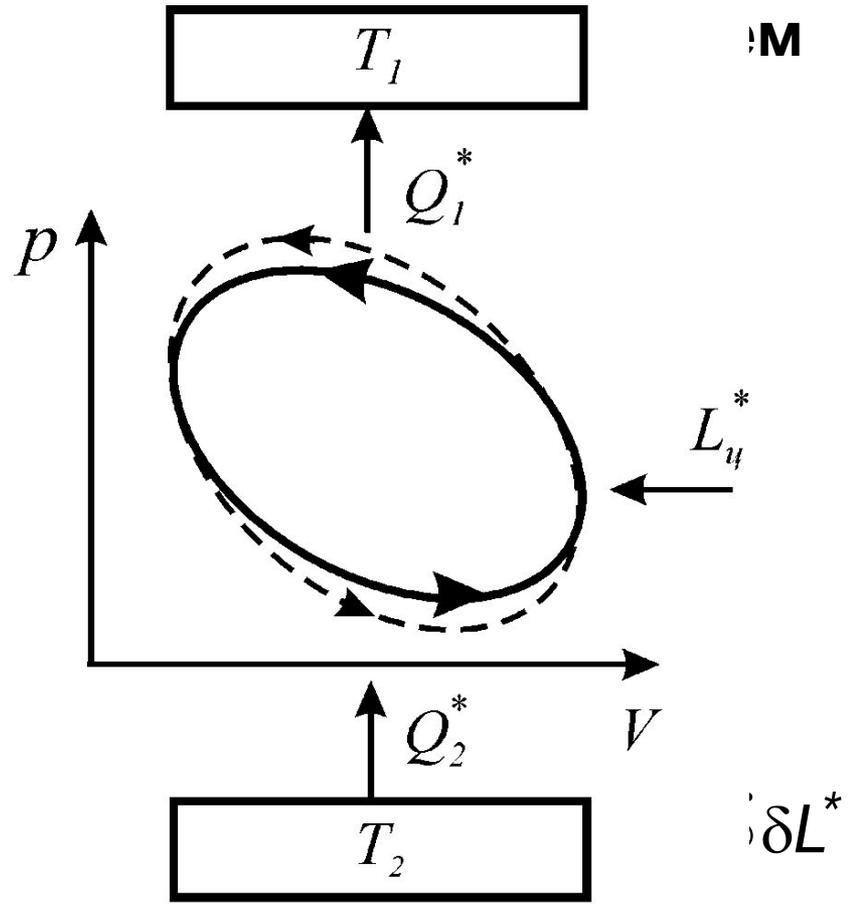
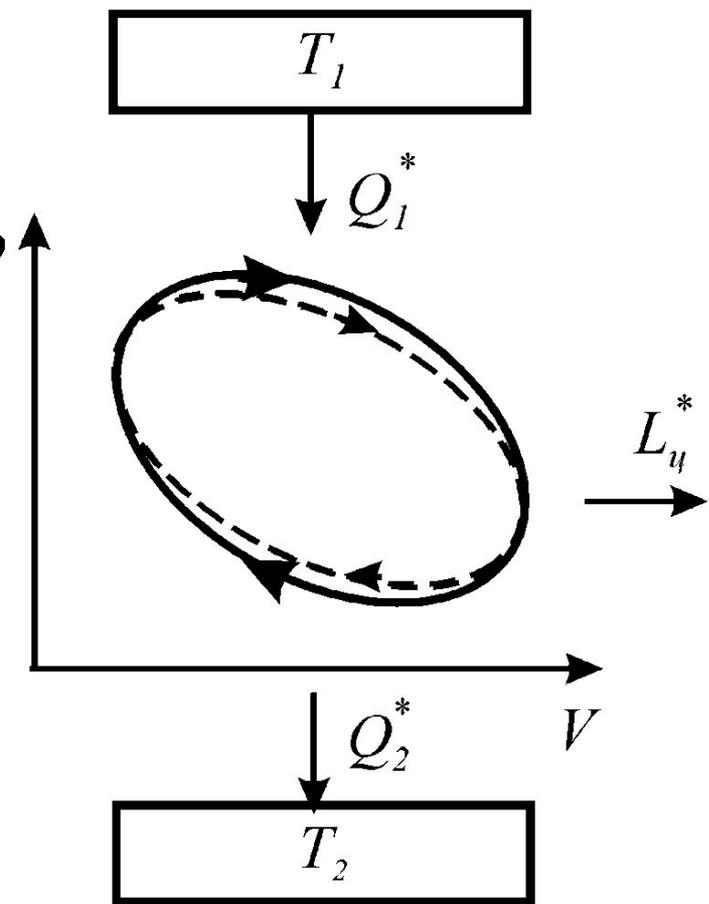
Различают прямые и обратные циклы. Те и другие могут быть обратимые и реальные.

Круговые процессы, в результате реализации которых получена полезная работа, осуществляются в тепловых двигателях, называются *прямыми* циклами и направлены по часовой стрелке.



Круговые процессы, в результате которых происходит охлаждение рабочих тел до температуры ниже температуры окружающей среды, осуществляются в холодильных машинах. Такие циклы называются *обратными* и направлены против часовой стрелки





$$\oint \delta Q^* = |Q_1^*| - |Q_2^*|; \quad \oint \delta L^* = |L_u^*| = |L_{pac.}^*| - |L_{сжс.}^*|$$

Эффективность любого реального теплового двигателя определяется коэффициентом полезного действия (КПД).

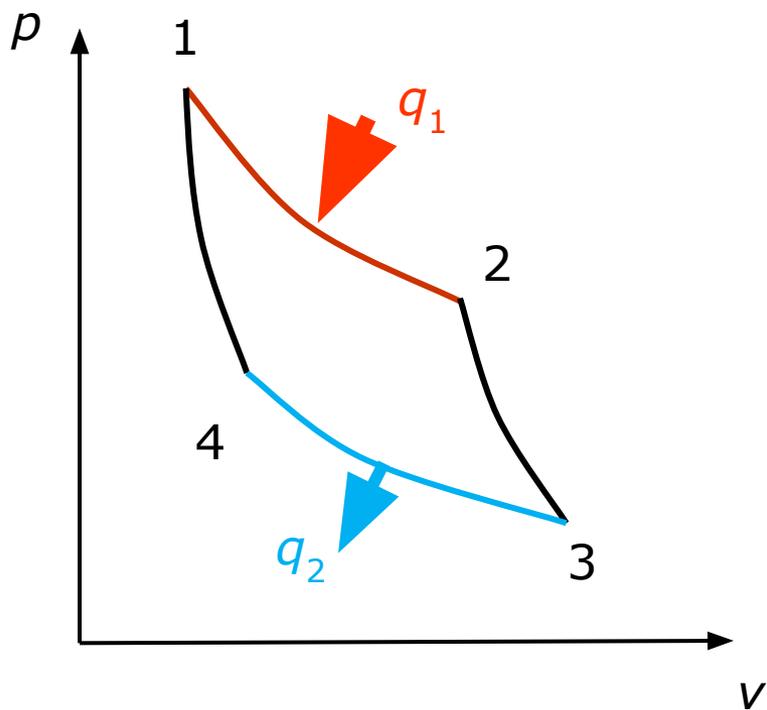
Коэффициент полезного действия реальных циклов тепловых двигателей численно равен отношению полученной работы к подведенному извне количеству теплоты

$$\eta = \frac{|L_{ц}^*|}{|Q_1^*|} = \frac{|Q_1^*| - |Q_2^*|}{|Q_1^*|} = 1 - \frac{|Q_2^*|}{|Q_1^*|}$$

Для обратимого цикла теплового двигателя КПД определяется следующим образом:

$$\eta_{обр.} = \frac{|L_{ц.обр}|}{|Q_{1обр}|}$$

Цикл Карно



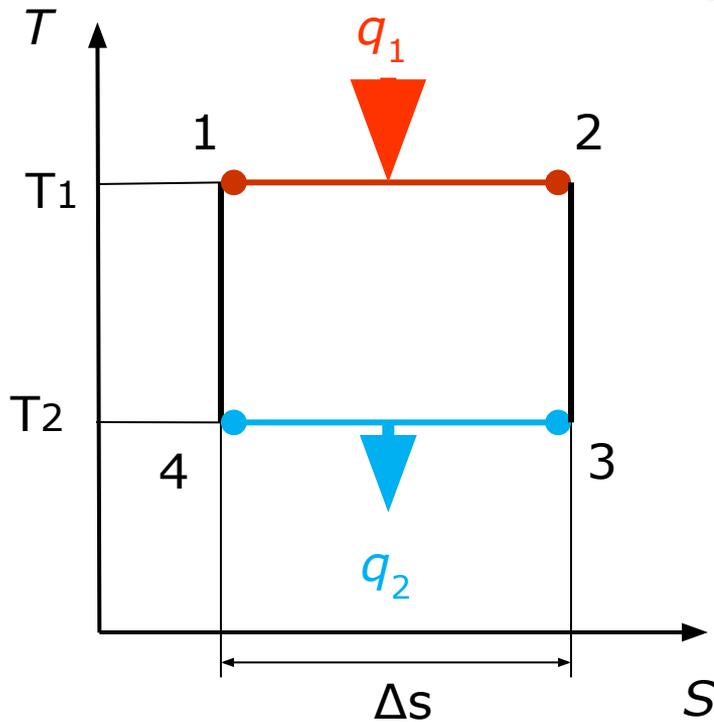
1-2 изотермическое расширение

2-3 адиабатное расширение

3-4 изотермическое сжатие

4-1 адиабатное сжатие

Цикл Карно



$$\begin{aligned}\eta_t &= \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \\ &= 1 - \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1}\end{aligned}$$

Цикл Карно дает максимальное значение термического КПД в заданной диапazоне температур

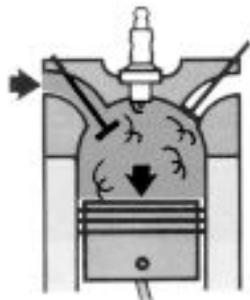
Циклы ДВС

- Масса рабочего тела не меняется
- При подводе теплоты (сжигании топлива) не происходит химических реакций.
- Не происходит побочных потерь теплоты, кроме основной – во время выпуска газов.
- Процессы сжатия и расширения происходят адиабатно.
- Процесс отвода рабочего тела заменяется отводом теплоты через стенки цилиндра
- Все процессы считаются обратимыми
- Рабочим телом принимается идеальный газ

Теоретические циклы ДВС

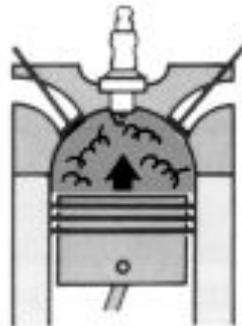


Цикл Отто



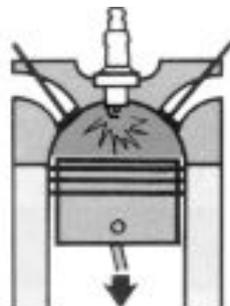
1-й такт: ВПУСК

Открывается впускной клапан
Поршень движется вниз
Цилиндр заполняется **ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСЬЮ**
Закрывается впускной клапан



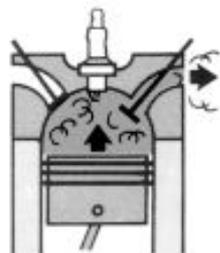
2-й такт: СЖАТИЕ

Клапаны закрыты
Поршень движется вверх
Повышаются давление и температура



3-й такт СГОРАНИЕ-РАСШИРЕНИЕ

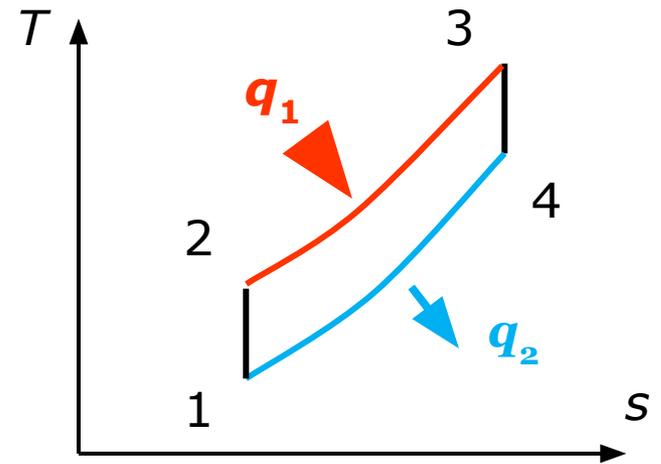
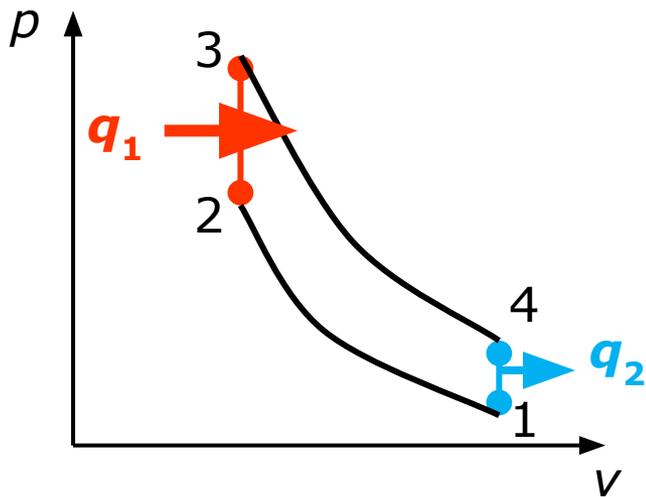
Сгорание.
Расширение.



4-й такт: Выпуск

Открывается выпускной клапан
Поршень движется вверх и выталкивает продукты сгорания,
находящиеся в цилиндре

Цикл Отто



1-2 адиабатное сжатие рабочего тела

2-3 изохорный подвод теплоты

3-4 адиабатное расширение рабочего тела

4-1 изохорный отвод теплоты

от рабочего тела к холодному источнику

Характеристики цикла Отто

- $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

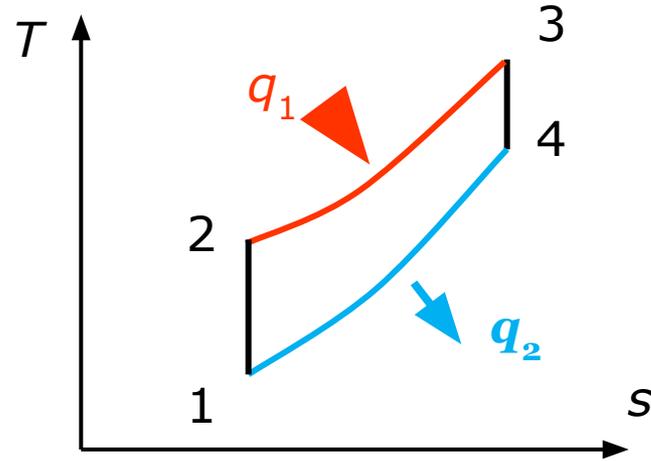
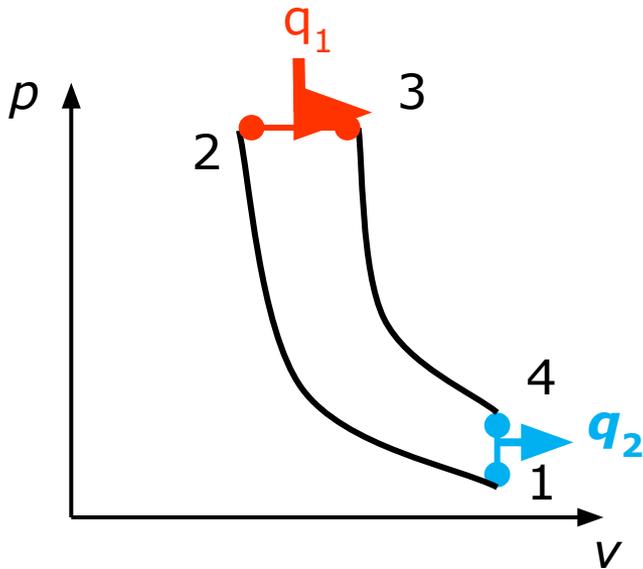
- $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$

- $$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Необходимо отметить

- $\varepsilon = 7..11$
- Во время впуска в цилиндр поступает топливовоздушная смесь
- Топливовоздушная смесь воспламеняется благодаря электрическому заряду
- Сгорание происходит очень быстро
- $\eta_t = 25...30 \%$

Цикл Дизеля



1-2 адиабатное сжатие рабочего тела

2-3 изобарный подвод теплоты

4-5 адиабатное расширение рабочего тела

5-6 изохорный отвод теплоты от рабочего тела к
холодному источнику

Характеристики Цикла Дизеля

-

- $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$

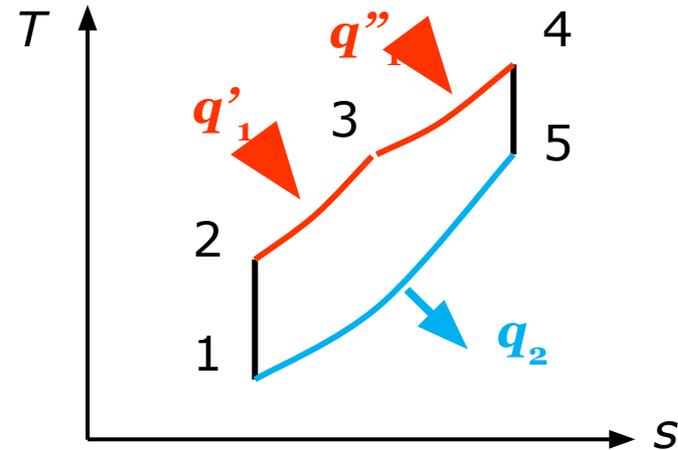
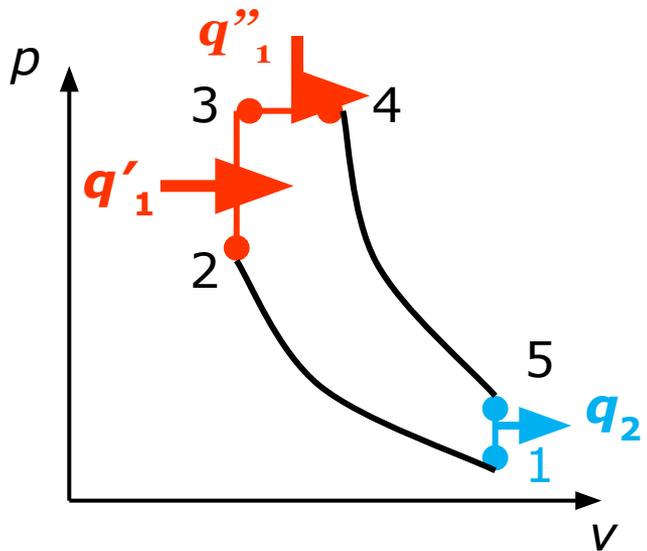
- $\rho = \frac{V_3}{V_2}$

$$\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{p^k - 1}{\kappa(p - 1)}$$

Необходимо отметить

- $\varepsilon = 15 \dots 22$
- Во время впуска в цилиндр поступает воздух
- Топливо воспламеняется путем самовоспламенения
- Сгорание длится столько же, сколько длится процесс впрыскивания
- $\eta_t = 40 \dots 45 \%$

Цикл Тринклера (Сабатэ)



1-2 адиабатное сжатие рабочего тела

2-3 изобарный подвод теплоты

3-4 изохорный подвод теплоты

4-5 адиабатное расширение

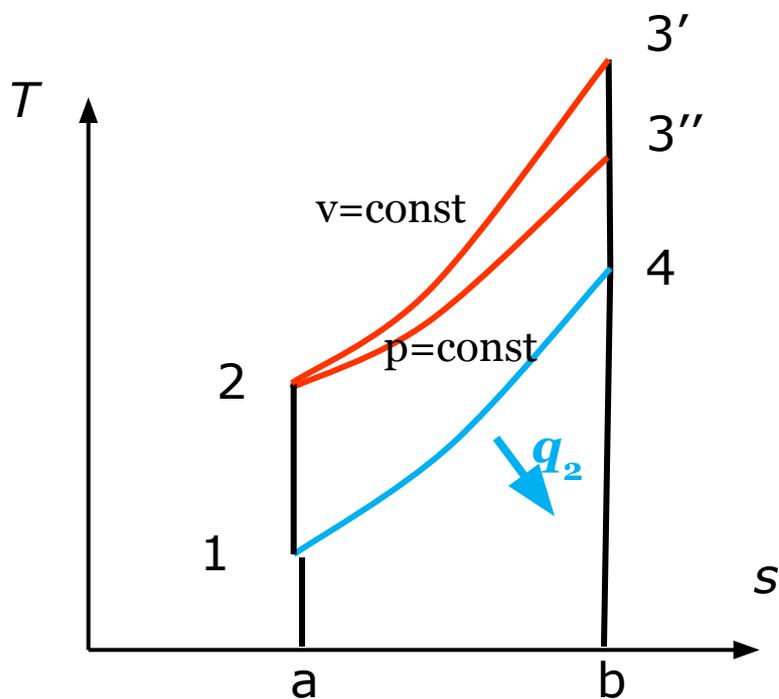
5-6 изохорный отвод теплоты от рабочего тела к
холодному источнику

Характеристики цикла Тринклера-Сабатэ

-
- $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$
- $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$
- $\rho = \frac{v_4}{v_3}$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\lambda \rho^\kappa - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)}$$

Сравнение циклов Отто и Дизеля при $\epsilon = \text{const}$



123'4 – цикл с изохорным
подводом теплоты

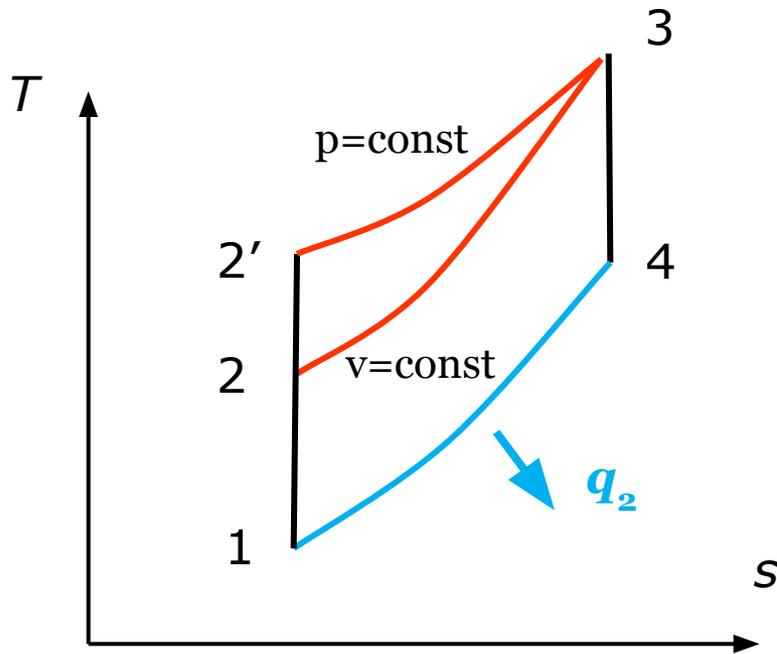
123''4 – цикл с изобарным
подводом теплоты

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$q_1^{\text{отто}} > q_1^{\text{дизеля}}$$

$$\eta_t^{\text{отто}} > \eta_t^{\text{дизеля}}$$

Сравнение циклов ДВС $T_3 = \text{const}$



1234 – цикл с изохорным подводом теплоты

12'34 – цикл с изобарным подводом теплоты

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$q_1^{\text{дизеля}} > q_1^{\text{отто}}$$

$$\eta_t^{\text{дизеля}} > \eta_t^{\text{отто}}$$

Схемы и циклы ГТУ

Типы ГТУ

```
graph TD; A[Типы ГТУ] --> B[по способу сжигания топлива]; A --> C[способ передачи теплоты холодному источнику]; B --> D["p=const"]; B --> E["v=const"]; C --> F[открытые]; C --> G[закрытые];
```

по способу
сжигания
топлива

$p=\text{const}$

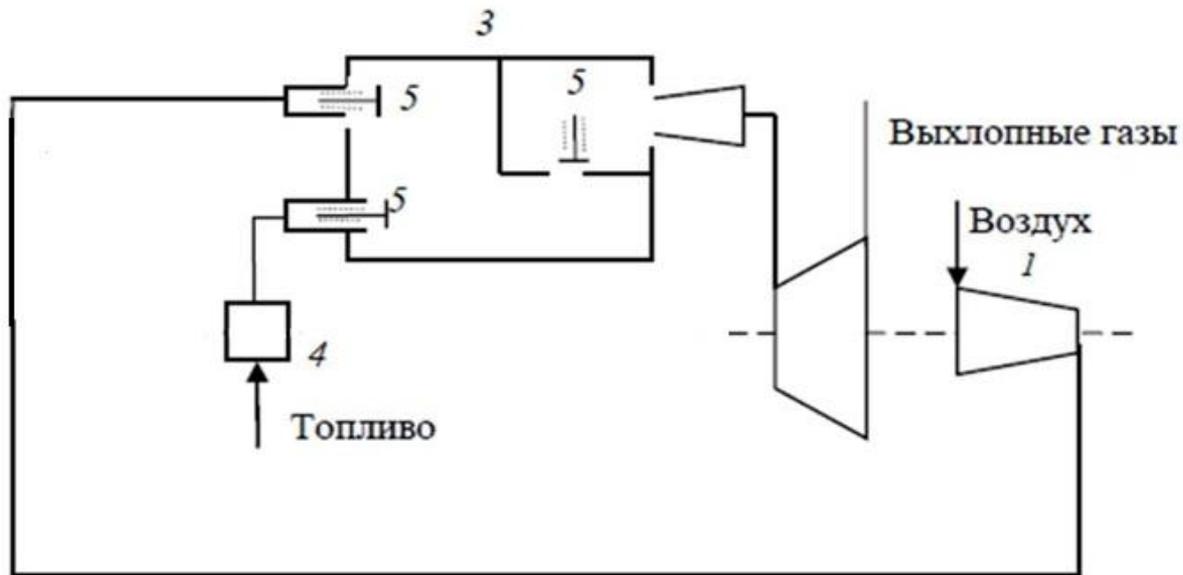
$v=\text{const}$

способ передачи теплоты
холодному источнику

открытые

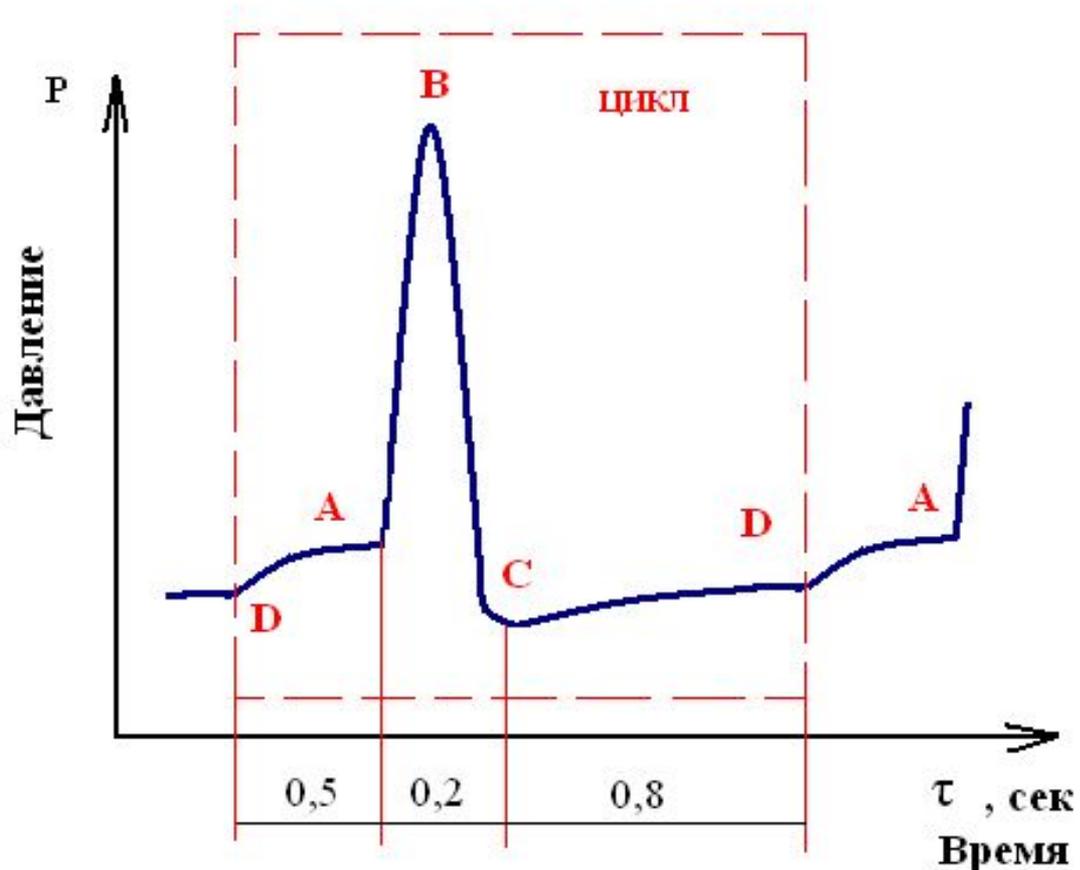
закрытые

Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v = \text{const}$ (импульсная)

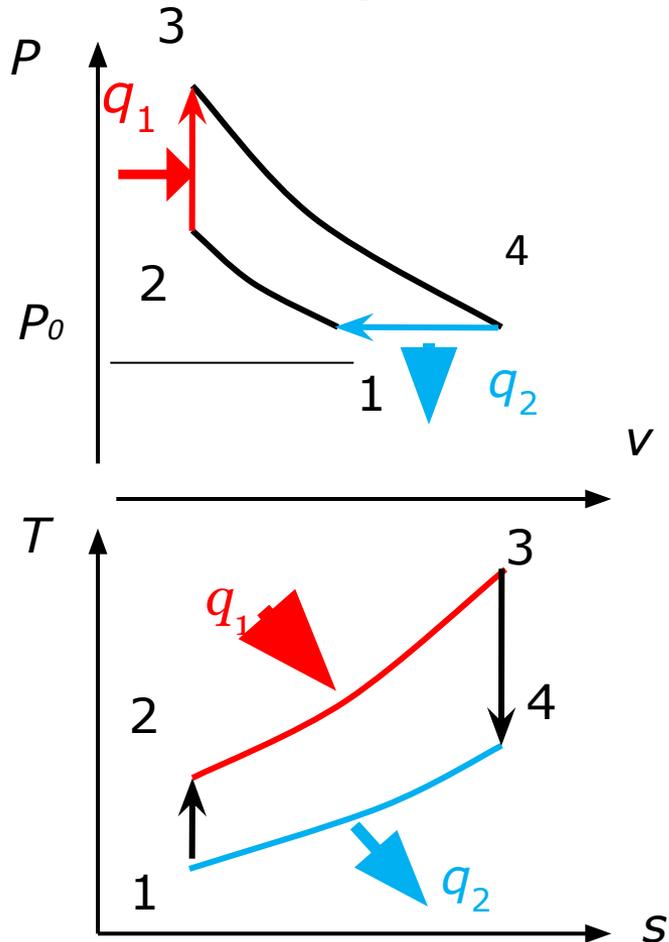


- 1 – компрессор
- 3 – камера сгорания
- 4 – топливный насос
- 5 – клапаны
- 6 – газовая турбина

Изменение давления в зависимости от времени в камере сгорания



Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2-3 изохорный подвод теплоты ($v=\text{const}$)

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

4-1 изобарный отвод теплоты

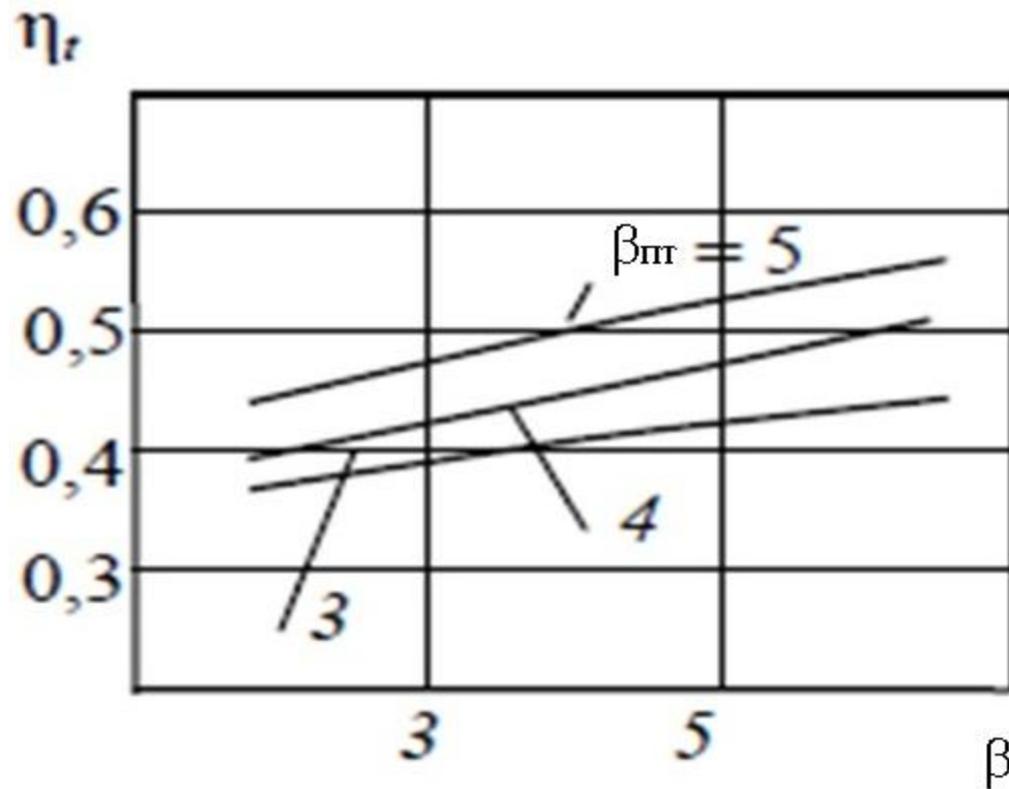
Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

- $$\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$$

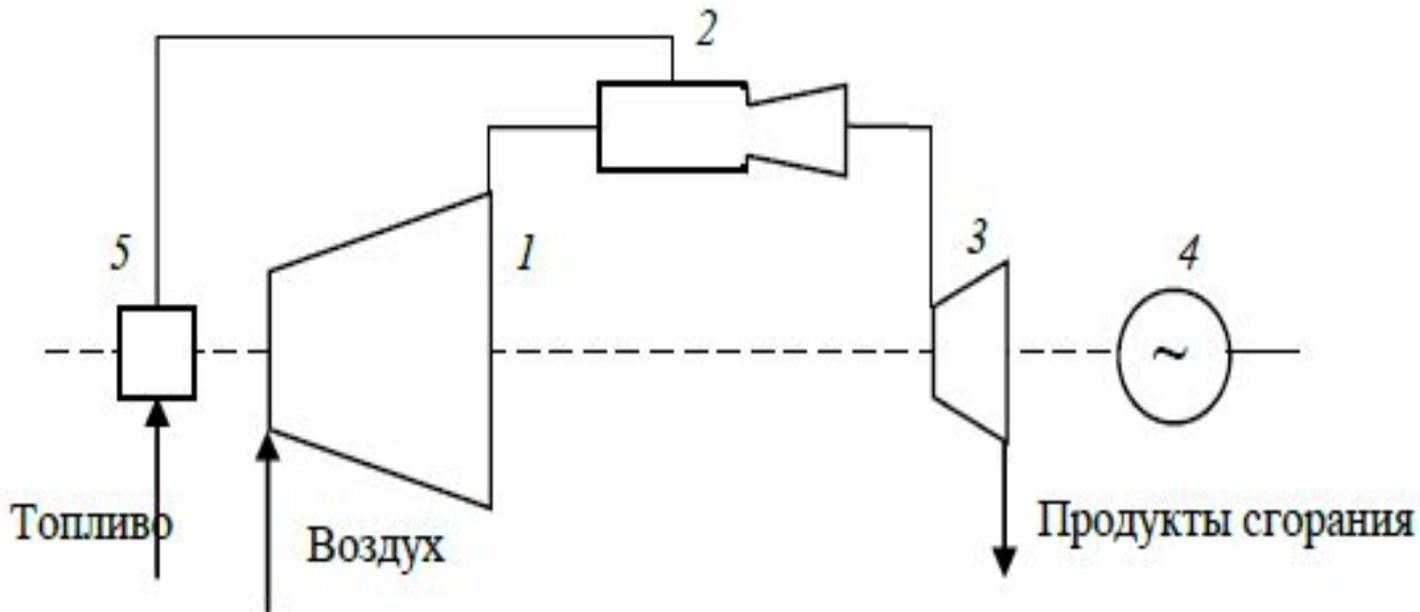
- $$\beta_{\text{пт}} = \frac{p_3}{p_2}$$

- $$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{(k-1)/k}} \frac{k(\beta_{\text{пт}}^{1/k} - 1)}{\beta_{\text{пт}} - 1}$$

Экономичность цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $v = \text{const}$ (импульсная)

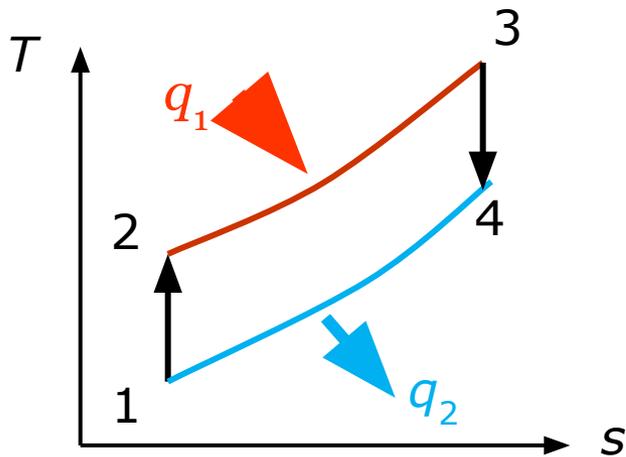
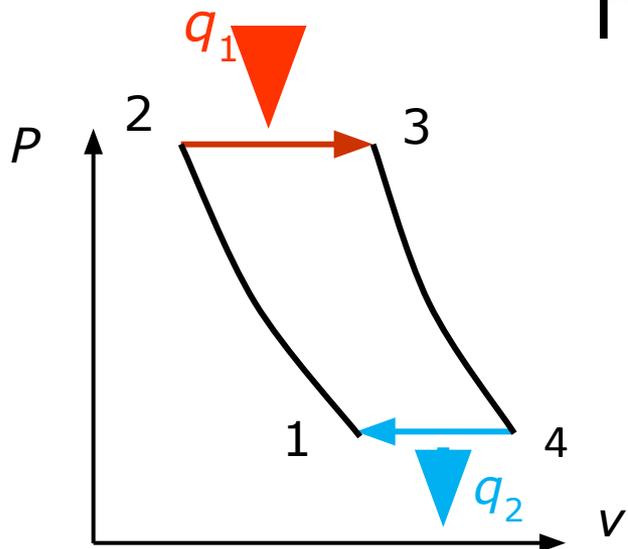


Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$



- 1 – компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 – топливный насос

Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2-3 изобарный подвод теплоты ($p=\text{const}$)

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

4-1 изобарный отвод теплоты

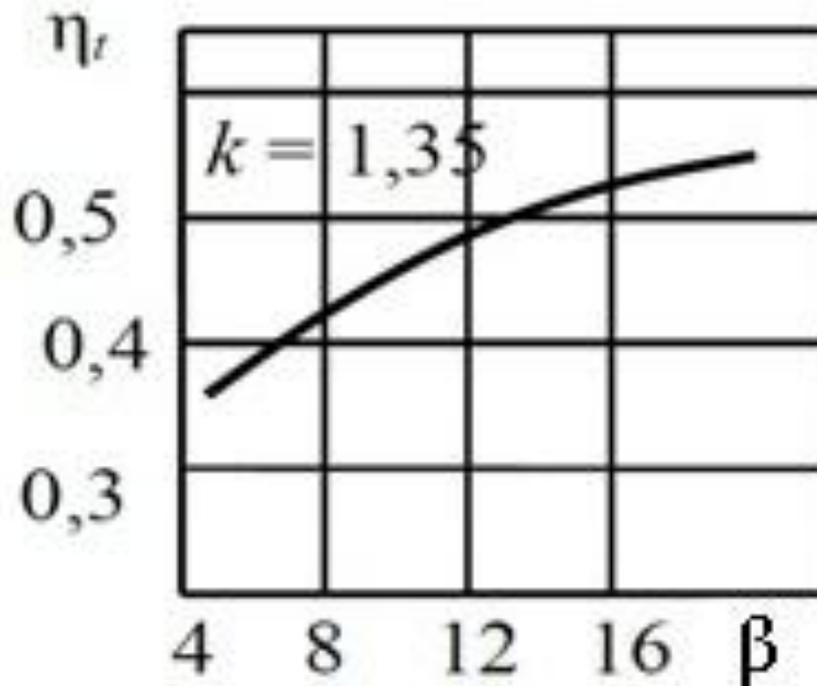
Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$

- $$\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$$

- $$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

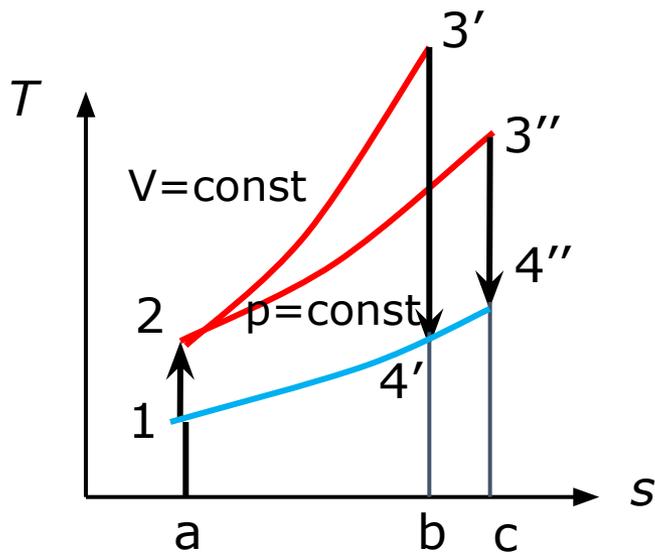
- $$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

Экономичность цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$



Сравнение циклов ГТУ

Условия сравнения:



$$\beta^{v=\text{const}} = \beta^{p=\text{const}}, \text{ то есть}$$

$$q_1^{v=\text{const}} = q_1^{p=\text{const}}$$

$$\text{пл } a123'b = \text{пл } a123''c$$

отведенная теплота разная, то есть

так как

$$\text{пл } a14'b < \text{пл } a14''c$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$\eta_t^{v=\text{const}} > \eta_t^{p=\text{const}}$$

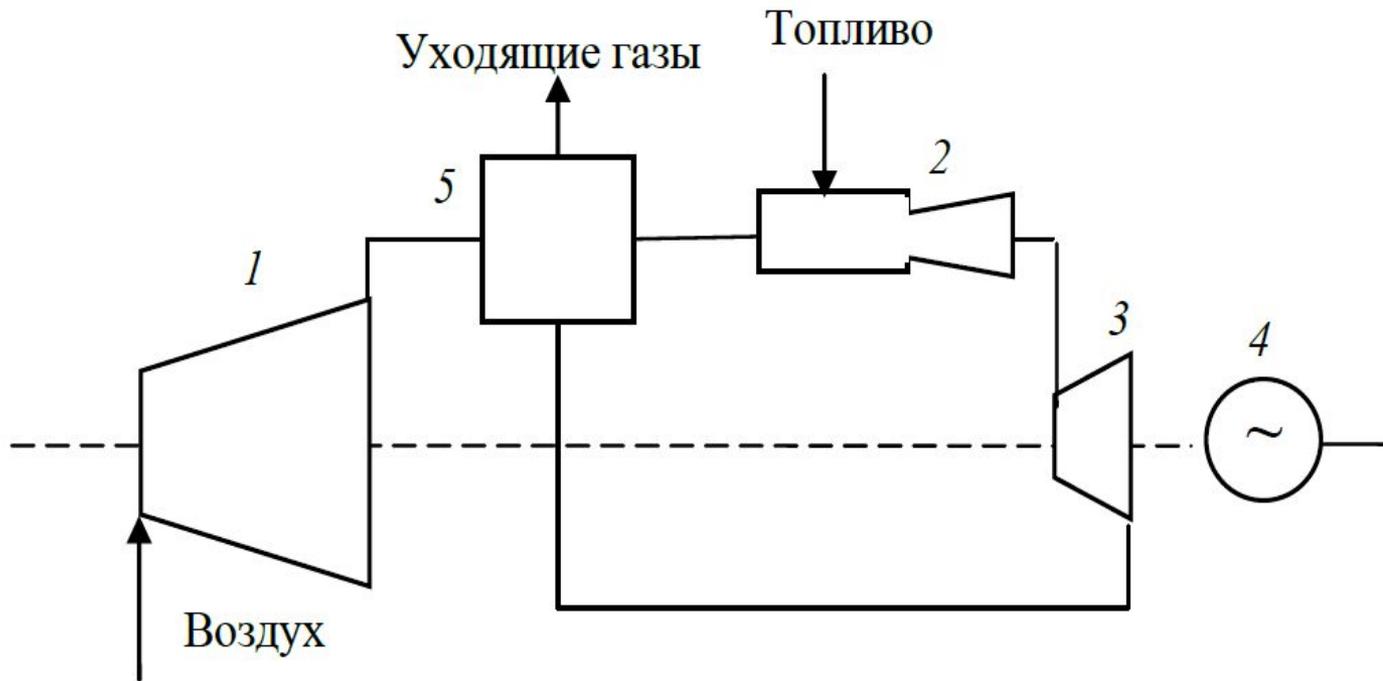
Сравнение циклов ГТУ

Однако, ГТУ с изохорным подводом теплоты не получили широкого распространения.

Недостатки

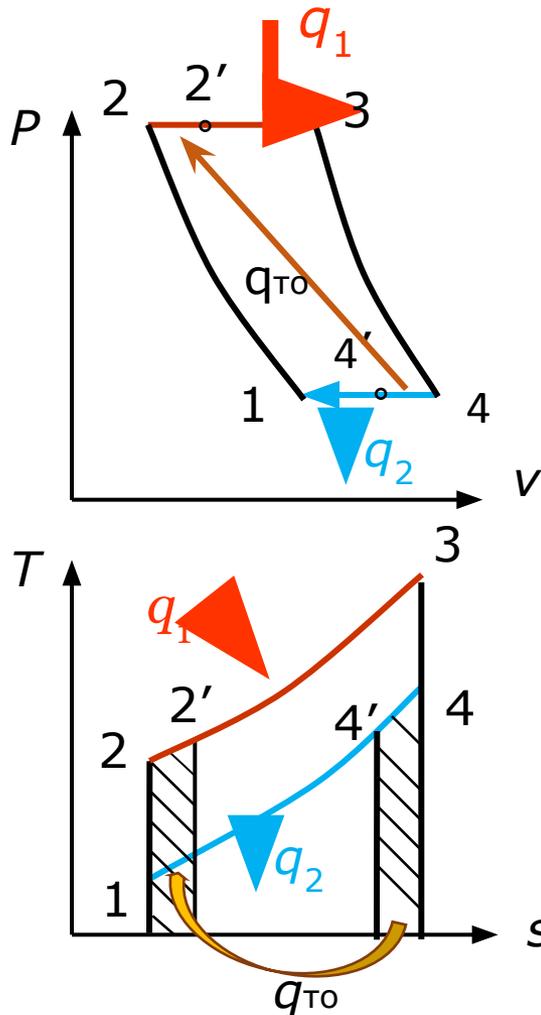
- Сложности в организации изохорного сгорания топлива
- Усложнение конструкции камеры сгорания
- Усиленный износ клапанов

Цикл ГТУ с регенерацией тепла



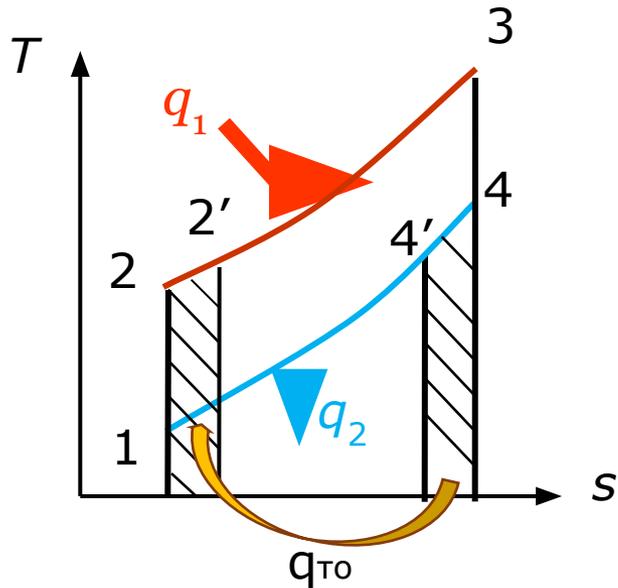
- 1 – воздушный компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 - регенератор

Цикл ГТУ с регенерацией тепла



- 1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре
- 2-2' нагрев воздуха в регенераторе за счет теплоты уходящих газов
- 2'-3 нагрев рабочего тела в камере сгорания при $p=\text{const}$ в процессе подвода тепла при сжигании топлива
- 3-4 адиабатное расширение рабочего тела в турбине
- 4-4' – отвод теплоты от уходящих газов в регенераторе
- 4-1 – охлаждение газов в атмосфере

Характеристики цикла ГТУ с регенерацией тепла



$$\sigma = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_{2'}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(\rho\gamma - 1) - \beta^{\frac{k-1}{k}} (\gamma - 1)}{\gamma\beta^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1)}$$

$$\gamma = \frac{T_{2'}}{T_2}$$