

## Газовые циклы

### Лекция 14

Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Индикаторная диаграмма и цикл двигателя. Циклы с подводом теплоты при постоянном объеме, постоянном давлении и со смешанным подводом теплоты. КПД циклов. Сравнение циклов ДВС. Термодинамический анализ коэффициента полезного действия циклов по средним температурам подвода и отвода теплоты. Удельная объемная работа. Удельный расход теплоты и топлива.

Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Принципиальная схема и цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. Термический КПД идеального цикла. Действительный цикл и его КПД. Методы повышения КПД циклов ГТУ. Отношение работы компрессора к работе турбины. Повышение начальной температуры газа перед турбиной. Оптимальная степень повышения давления. Регенерация теплоты в цикле. Многоступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты в цикле. Замкнутые схемы ГТУ. Рабочие тела замкнутых схем. Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме.

Циклы реактивных двигателей. Схема, цикл и термический КПД прямоточного и турбореактивного двигателя. Схема и цикл ракетного двигателя.

# Методы анализа эффективности циклов

$$l_{\text{ц}} = q_1 + q_2 = q_1 - |q_2|$$

$$\eta_i = \frac{l_{\text{д}}}{q_1} = \frac{D \cdot l_{\text{д}}}{D \cdot q_1} = \frac{N_{\text{д}}}{Q_1} = \eta_t \cdot \eta_{oi}$$

$D$  – расход                       $N$  – мощность

$$\eta_{oi} = \frac{l_{\text{д}}}{l_{\text{ц}}} \text{ – внутренний КПД}$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q'} \text{ – эффективный КПД}$$

$N_e$  – что получил потребитель

$Q'$  – общие затраты топлива

$\eta_{\text{м}}$  – механический

$\eta_{\text{ЭГ}}$  – электрогенератора

$$\eta_e = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{ЭГ}}$$

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

Удельный расход теплоты

$$q_e = \frac{Q'}{N_e} = \frac{BQ^p}{N_e} = \frac{1}{\eta_e}$$

$Q^p$  – теплотворная способность топлива

$B$  – расход топлива

Удельный расход топлива

$$B_e = \frac{B}{N_e} = \frac{BQ^p}{N_e} = \frac{1}{\eta_e \cdot Q^p}$$

$$q_e = B_e \cdot Q^p$$

Оценка по эксергетическому КПД

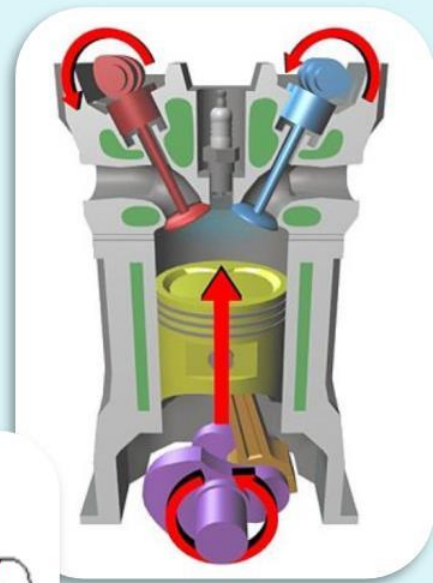
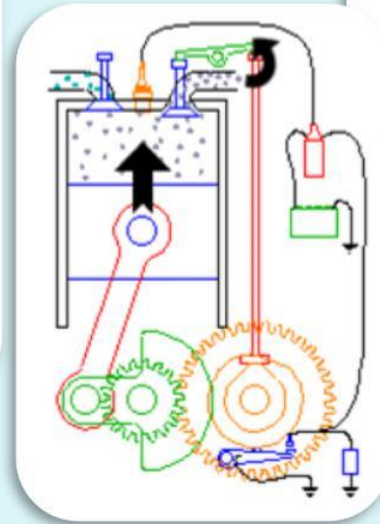
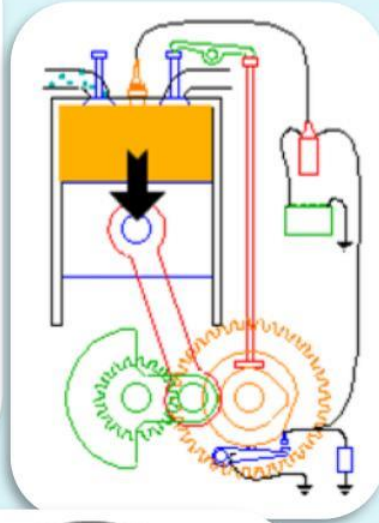
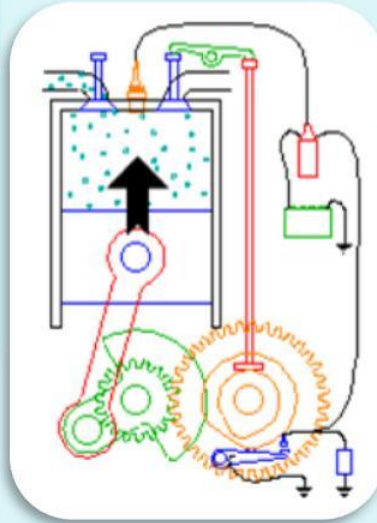
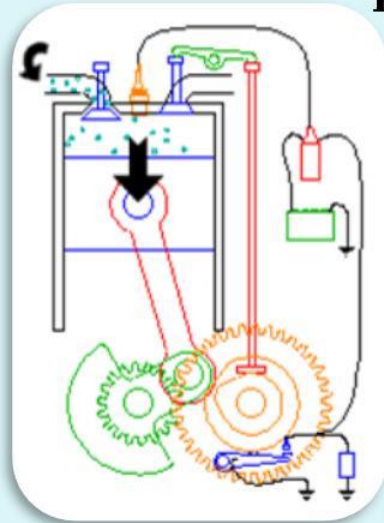
$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{|\Delta ex_{\text{потерь}}|}{ex_{\text{подведенной}}}$$

Для упрощения:

1. **Количество рабочего тела в цикле ДВС будем считать неизменным и равным расходу воздуха - малый процентный массовый расход топлива по отношению к расходу воздуха;**
2. **Свойства рабочего тела - соответствуют свойствам идеального двухатомного воздуха с постоянными изобарными и изохорными теплоемкостями;**
3. **Процесс выхлопа отработавших газов и процесс забора новой порции воздуха взаимно компенсируют друг друга (их нет) - оба эти процесса идут практически при постоянном давлении окружающей среды в противоположных направлениях;**
4. **Процесс отвода теплоты от рабочего тела в окружающую среду (выпуск) заменим изохорным процессом охлаждения рабочего тела до температуры окружающей среды - будем считать цикл замкнутым, а охлаждение рабочего тела осуществляется прямо в цилиндре при закрытых клапанах до температуры окружающей среды;**
5. **Процессы расширения и сжатия рабочего тела соответствуют адиабатным процессам - процессы быстротечны;**
6. **Процессы подвода теплоты к рабочему будем считать в зависимости от типа двигателя изохорными или изобарными.**

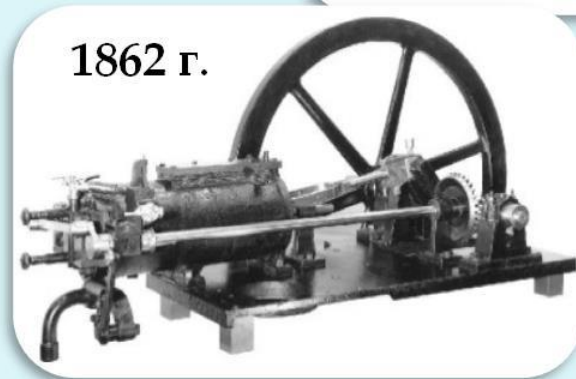
# Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

## Цикл Отто – подвод теплоты при $V=const$ ( карбюраторные двигатели)



Четыре такта:

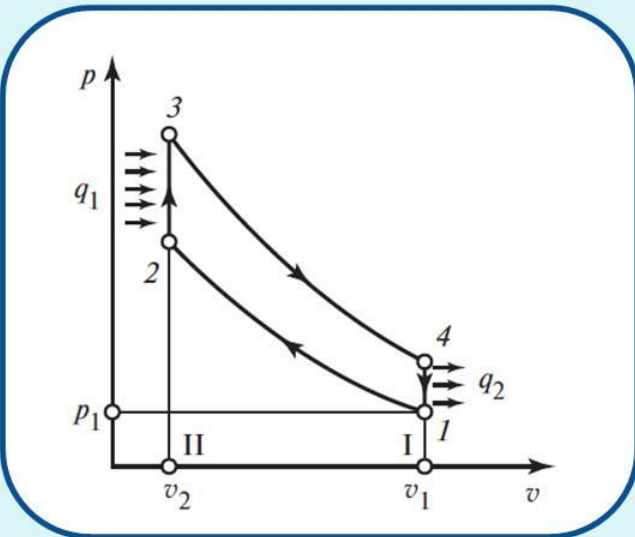
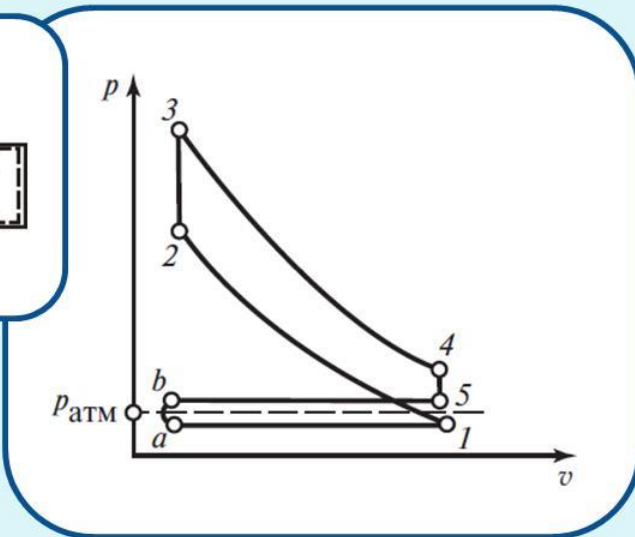
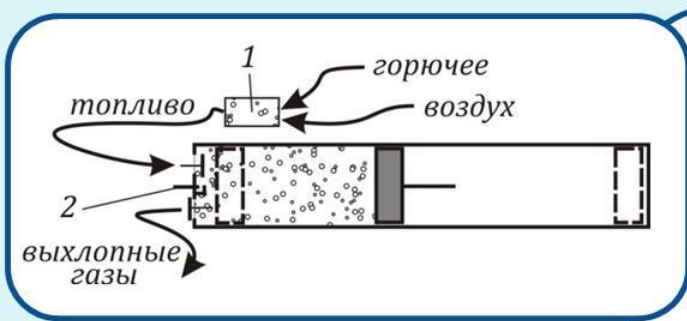
1. Впуск
2. Сжатие
3. Рабочий ход
4. выпуск



1862 г.



Николаус Август Отто (нем. *Nicolaus August Otto*, 1832 - 1891) - немецкий инженер и изобретатель-самоучка, известен в качестве изобретателя двигателя внутреннего сгорания. Приоритет Отто неоднократно, но безуспешно оспаривался, в частности, Кристианом Райтманом, Альфонсом Бо де Роша и Феличе Маттеуччи.



$$l_{ц} = q_1 + q_2 = q_1 - |q_2|$$

$$q_1 = \bar{c}_v (T_3 - T_2)$$

$$|q_2| = \bar{c}_v |T_1 - T_4| = \bar{c}_v (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{\bar{c}_v (T_4 - T_1)}{\bar{c}_v (T_3 - T_2)}$$

$$c_v = const$$

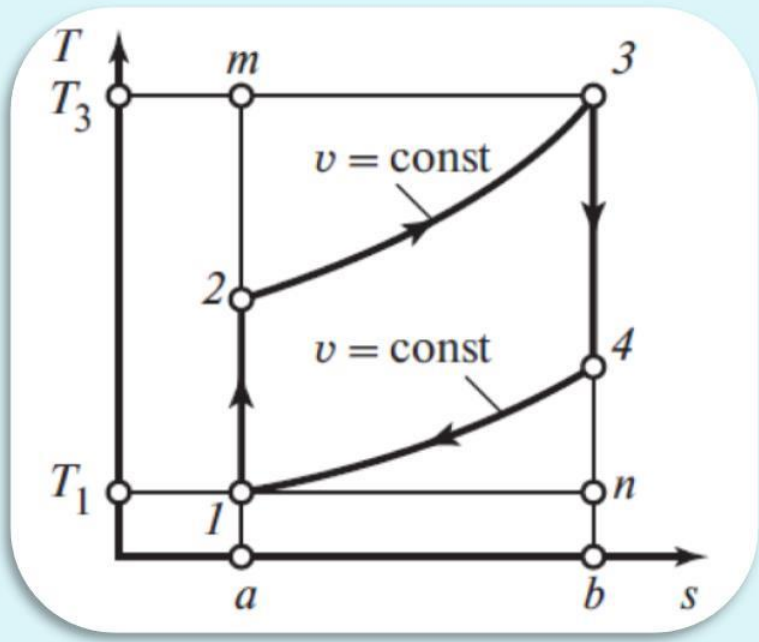
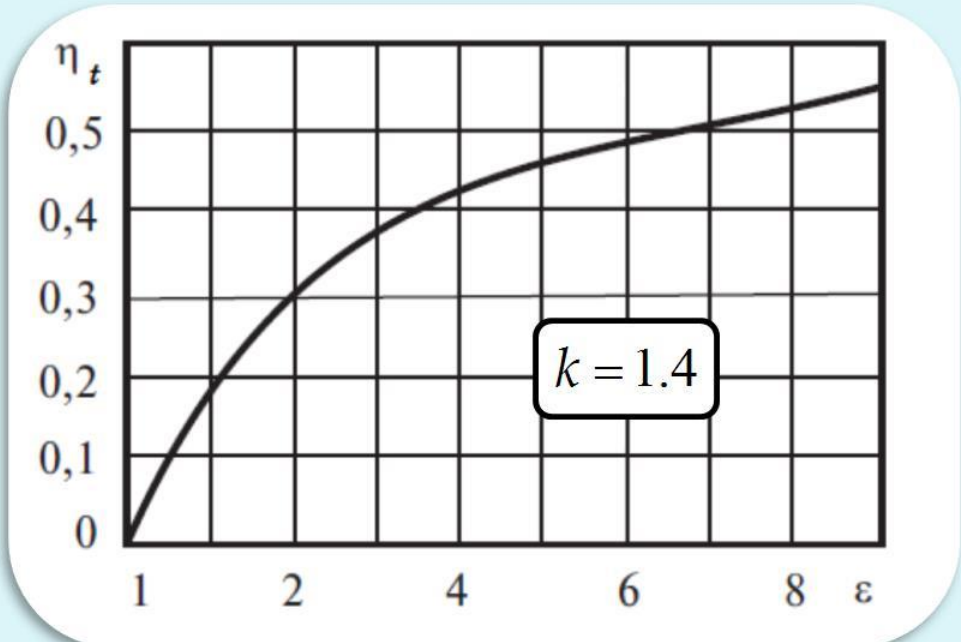
$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \left| \varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \right| = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

$$\left. \begin{array}{l} pv = RT \\ p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \\ p_4 v_4^k = p_3 v_3^k \\ v_2 = v_3 \\ v_1 = v_4 \end{array} \right\} \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

**ε - степень сжатия**



В 1859 г. французским изобретателем Э. Ленуаром создан двигатель с циклом сжигания топлива (светильного газа) в камере сгорания при атмосферном давлении. Термический КПД  $\approx (3-4 \%)$ .

Применение предварительного сжатия воздуха резко увеличивает термический КПД двигателя. Впервые мысль о предварительном сжатии воздуха перед подачей его в камеру сгорания была высказана С. Карно еще в 1824 г.

Впервые схема двигателя со сжатием воздуха и сгоранием при постоянном объеме была предложена в 1862 г. Бо де Роше; впоследствии Отто построил двигатель, в котором был осуществлен этот цикл.

**Только легко летучие компоненты.**

**Нельзя реализовать большие степени сжатия (подготовленная смесь взрывается)**

$$\varepsilon < 7 \div 12$$

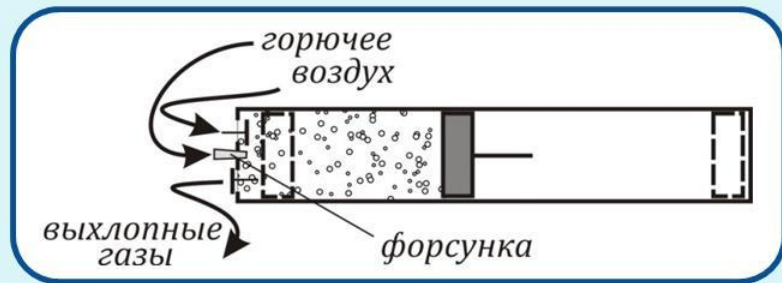
# Цикл Дизеля подвод теплоты при $p=const$

$$\varepsilon = 15 \div 16$$

Рудольф Кристиан Карл Дизель (нем. Rudolf Christian Karl Diesel; 1858 - 1913)  
— немецкий инженер и изобретатель, создатель дизельного двигателя.



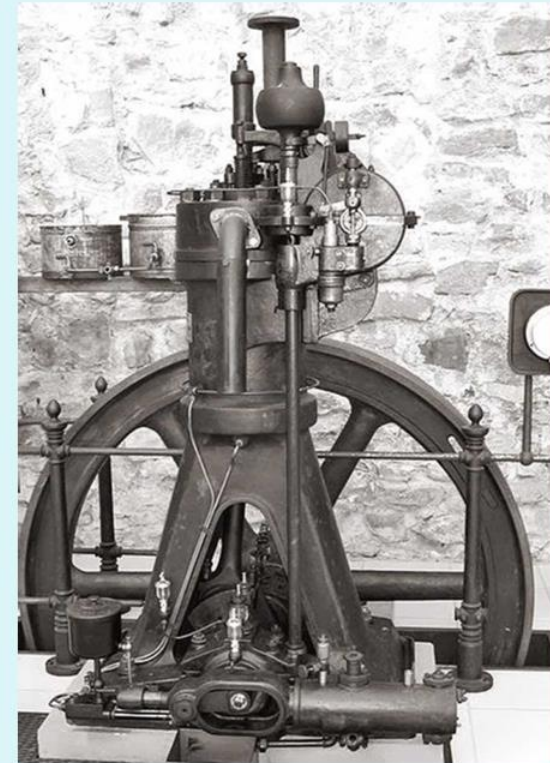
В 1897 году был готов первый рабочий дизель.



**Достоинство** - двигатель Дизеля, не нуждающийся в карбюрировании и может работать на более низкосортном топливе.

**Основными недостатками** двигателя Дизеля по сравнению с двигателем Отто являются:

- необходимость затраты работы на привод устройства для распыления топлива;
- относительная тихоходность, обусловленная более медленным сгоранием топлива.



Степень расширения

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

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

$$l_{\text{ц}} = q_1 + q_2 = q_1 - |q_2|$$

$$q_1 = \bar{c}_p (T_3 - T_2)$$

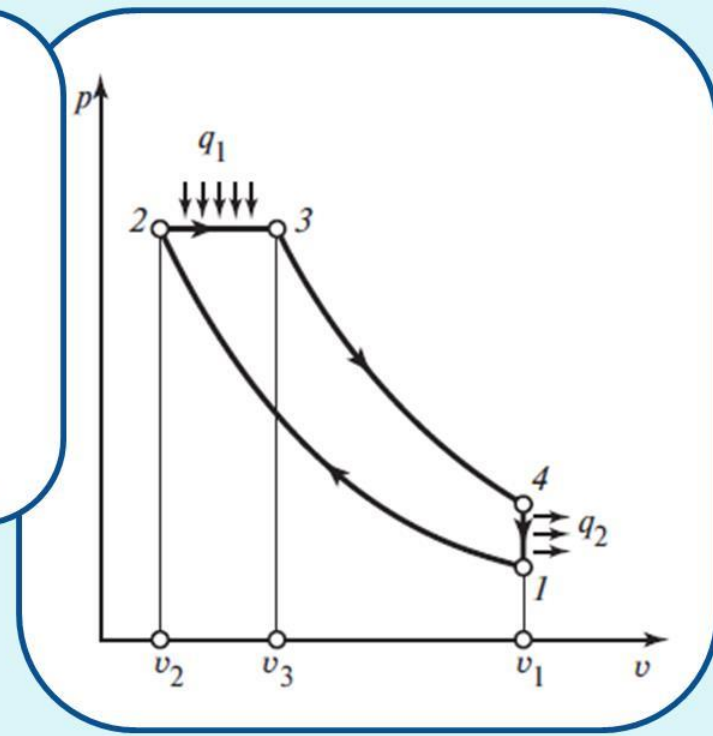
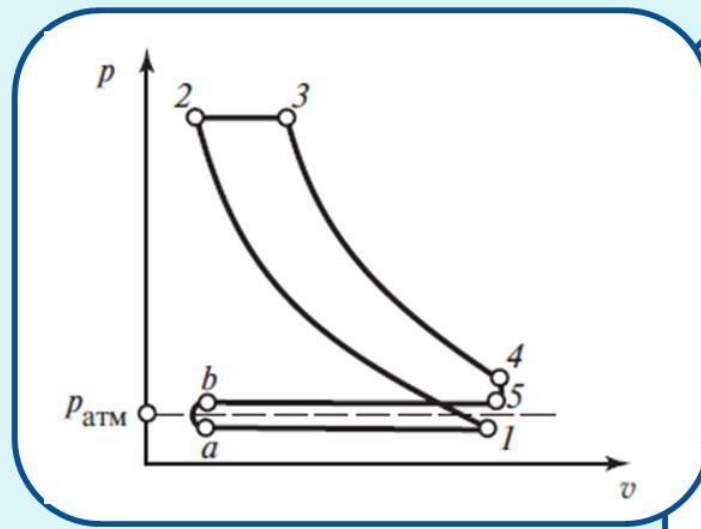
$$|q_2| = \bar{c}_v |T_1 - T_4| = \bar{c}_v (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{\bar{c}_v (T_4 - T_1)}{\bar{c}_p (T_3 - T_2)}$$

$$c_p = \text{const}$$

$$c_v = \text{const}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$



$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho$$

$$pv = RT$$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

$$p_4 v_4^k = p_3 v_3^k$$

$$p_2 = p_3$$

$$v_1 = v_4$$

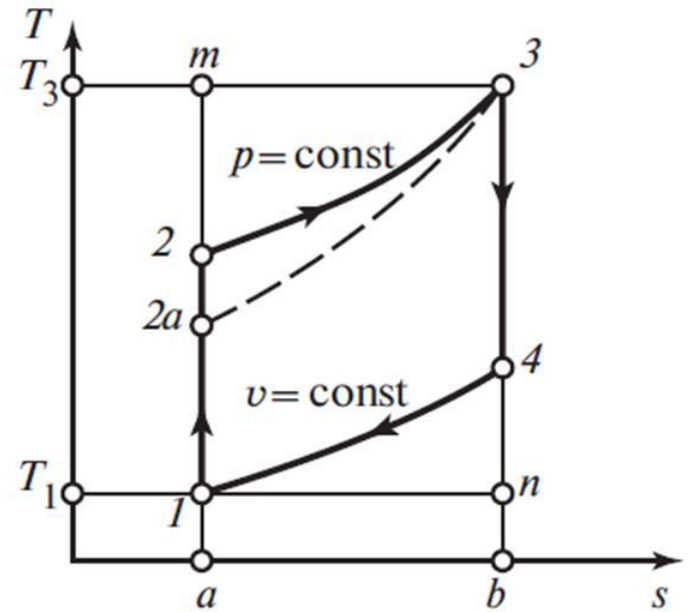
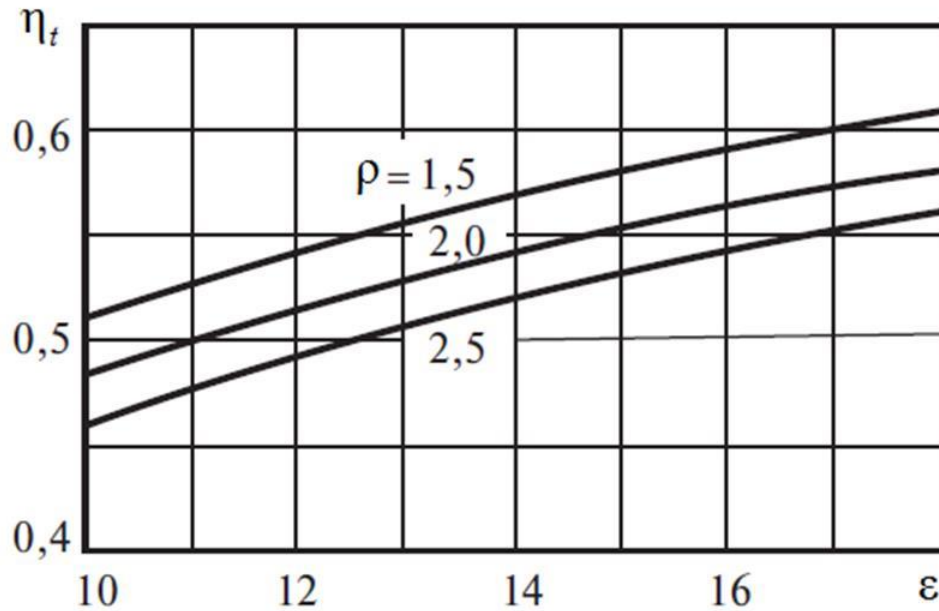
$$\left. \begin{array}{l} p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \\ p_4 v_4^k = p_3 v_3^k \\ p_2 = p_3 \\ v_1 = v_4 \end{array} \right\} \frac{p_4}{p_1} = \left( \frac{v_3}{v_2} \right)^k = \rho^k \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \rho^k$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

$\rho$  - степень предварительного расширения



## Сравнение циклов Отто и Дизеля



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1} \cdot \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$

Если принять, что степень сжатия в обоих циклах одна и та же, то очевидно, что термический КПД цикла Отто выше термического КПД цикла Дизеля.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$

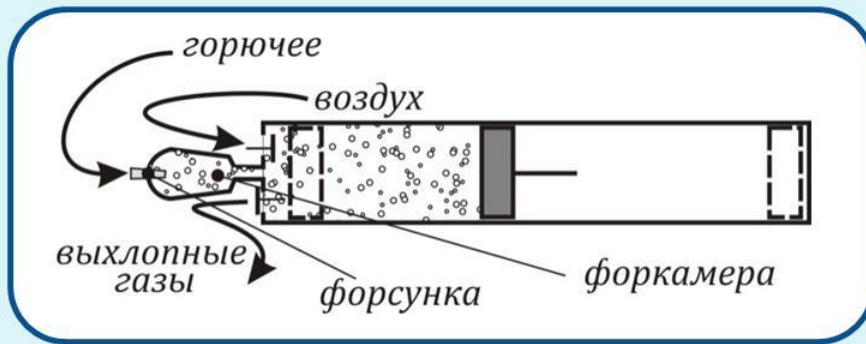
При условии одинаковой наивысшей температуры цикла  $T_3$  термический КПД цикла Дизеля выше термического КПД цикла Отто.

При равных работах цикла  $l_{ц} = q_1 - q_2$  и максимальном давлении легко заметить, что теплота  $q_2$  в цикле Отто больше, чем в цикле Дизеля, а термический КПД меньше.

## Цикл Тринклера (Зейлигера, Сабатэ)

Густав Васильевич Тринклер (1876 – 1957) – русский и советский учёный и изобретатель, создатель бескомпрессорного дизельного двигателя.

В России Тринклер считается создателем Цикла Тринклера. Однако в большинстве других стран мира этот цикл не связывают с именем Тринклера, а называют Seiliger cycle (например, в Германии, Голландии) и Sabathe cycle (в Италии).



Быстрый подъем давления –  
быстрое сжигание и  
«расширение» индикаторной диаграммы = увеличение КПД

# Конструктивные особенности: степени

сжатия,

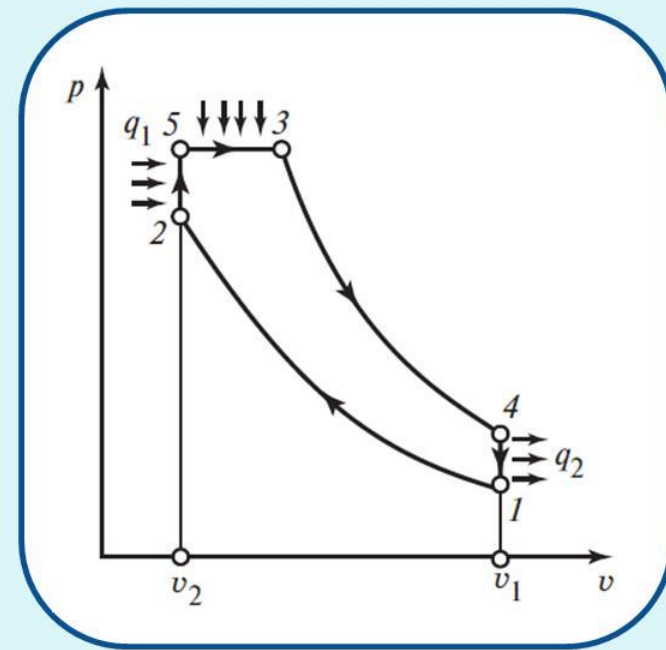
предварительного повышения давления,

предварительного расширения:

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

$$\lambda = \frac{p_5}{p_2};$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_5}.$$



$$l_{\text{н}} = q_1 + q_2 = q_1 - |q_2|$$

$$q_1 = \bar{c}_v (T_5 - T_2) + \bar{c}_p (T_3 - T_5)$$

$$|q_2| = \bar{c}_v |T_1 - T_4| = \bar{c}_v (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{\bar{c}_v (T_4 - T_1)}{\bar{c}_v (T_5 - T_2) + \bar{c}_p (T_3 - T_5)}$$

$$c_v = \text{const};$$

$$c_p = \text{const}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_5}{T_2} - 1\right) + k \frac{T_5}{T_2} \left(\frac{T_3}{T_5} - 1\right)} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \quad \lambda = \frac{p_5}{p_2}; \quad \rho = \frac{v_3}{v_5}.$$

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_5}{T_2} - 1\right) + k \frac{T_5}{T_2} \left(\frac{T_3}{T_5} - 1\right)} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

$$(4-1): \frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1}$$

$$(1-2), (3-4): p_1 v_1^k = p_2 v_2^k; \quad p_4 v_4^k = p_3 v_3^k$$

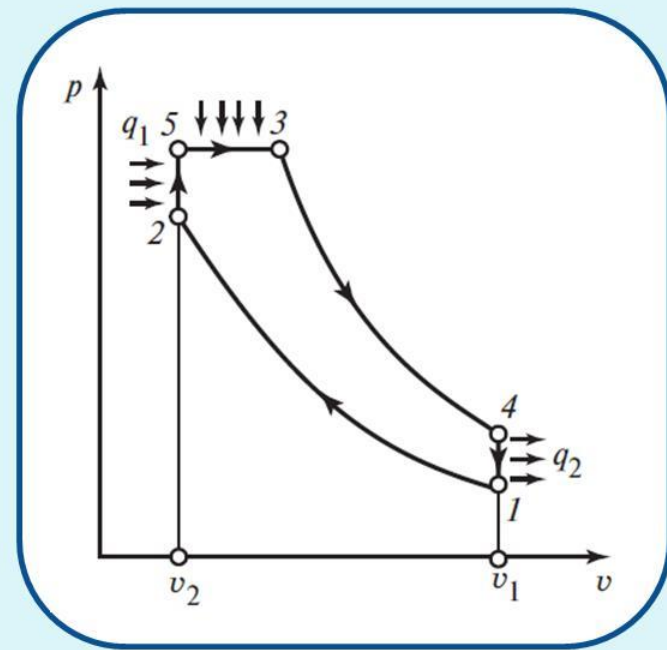
$$\text{при } v_1 = v_4 \Rightarrow \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^k$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \lambda \rho^k$$

$$(2-5): \frac{T_5}{T_2} = \frac{p_5}{p_2} = \lambda$$

$$(5-3): \frac{v_3}{v_5} = \frac{T_3}{T_5} = \rho$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$



$$p_3 = p_5$$

$$v_2 = v_5$$

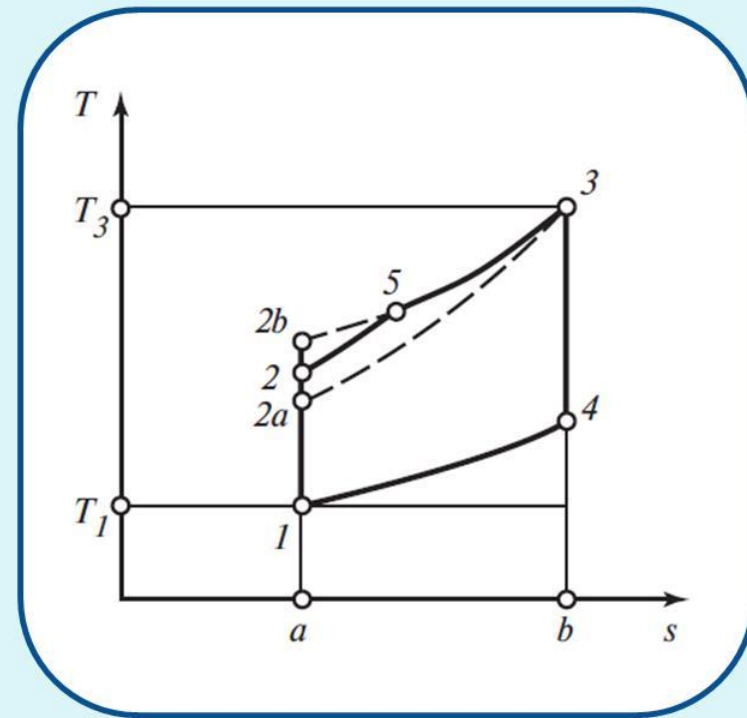
$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

$\rho=1$  - цикл Отто;  $\lambda=1$  - цикл Дизеля

## Сравнения циклов ДВС

$$\varepsilon = const \Rightarrow \eta_t^{\text{Дизеля}} < \eta_t^{\text{Смеш.подвод}} < \eta_t^{\text{Отто}}$$

$$T_{\max} = T_3 = const \Rightarrow \eta_t^{\text{Дизеля}} > \eta_t^{\text{Смеш.подвод}} > \eta_t^{\text{Отто}}$$



## Мощность ДВС

$p_i$  – среднее индикаторное давление;

$f$  – площадь поперечного сечения цилиндра;

$L$  – ход поршня;  $\frac{1}{2}$

$n$  – число оборотов коленчатого вала в единицу времени;

$V=f \cdot L$  – полезный объем цилиндра (между ВМТ и НМТ).

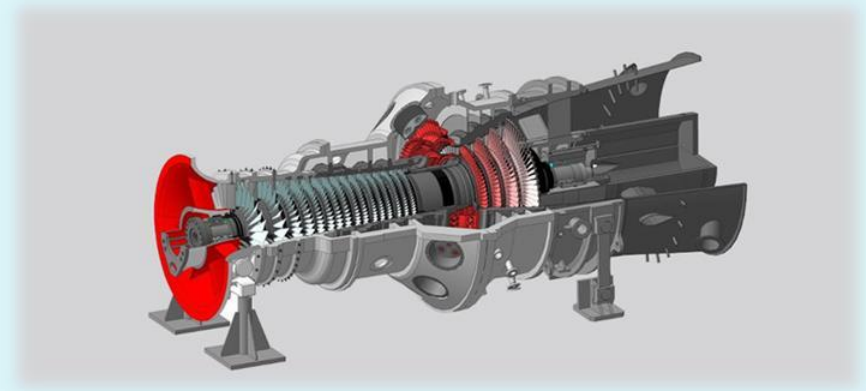
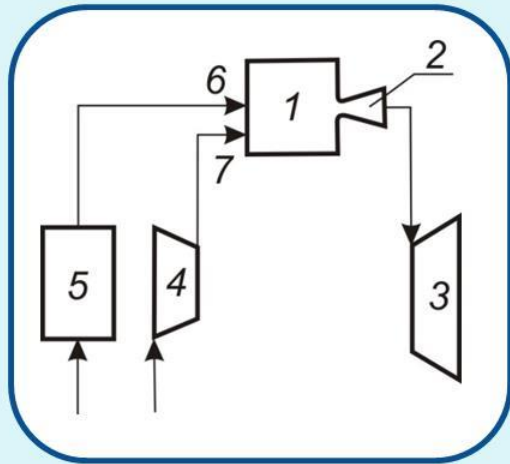
Коэффициент в уравнении соответствует четырехтактному двигателю, в котором один рабочий ход совершается за два оборота коленчатого вала.

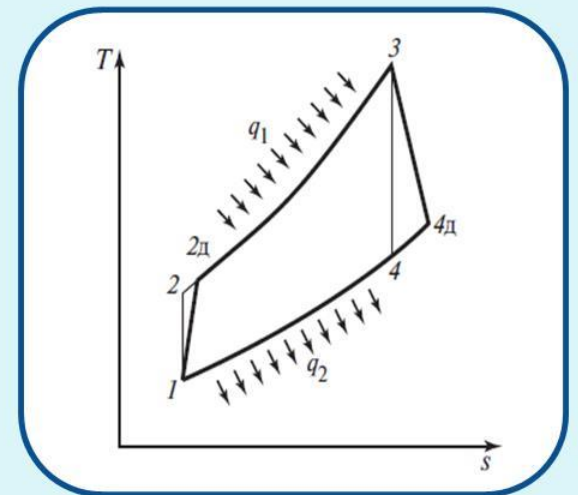
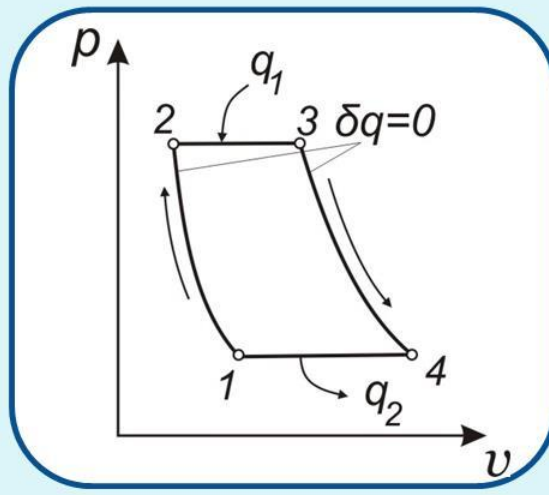
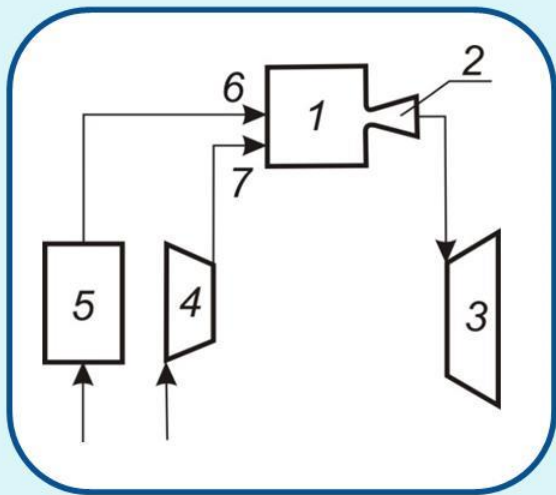
$$N_i = \frac{1}{2} p_i f L n = \frac{1}{2} p_i V n$$

# Циклы газотурбинных установок

процессы происходят в различных элементах

Джордж Брайтон (англ. George Brayton, 1830 –1892) – американский инженер-механик. Изобретатель одного из первых вариантов поршневого двигателя внутреннего сгорания, термодинамический цикл которого, названный циклом Брайтона. «*Ready Motor*» - «*мотор постоянной готовности*». Двигатель использовал керосин в качестве топлива. Он не нуждался ни в разогреве котла, как паровые машины, ни в запуске газогенератора, как газовый двигатель Ленуара. Один цилиндр с поршнем выполнял функцию компрессора, нагнетавшего воздух в камеру сгорания, в которую непрерывно поступал и сгорал керосин, с образованием горячего газообразного рабочего тела под давлением. Был использован для описания действия газотурбинных и воздушно-реактивных двигателей.





$$l_{ITV} = l_T - |l_K|; \quad l_T = h_3 - h_4; \quad l_K = h_1 - h_2; \quad q_1 = h_3 - h_2; \quad q_2 = h_4 - h_1$$

$$c_p = \text{const}$$

$$\eta_t = \frac{l_T - |l_K|}{q_1} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) \frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} \quad \tau = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \beta^{\frac{k-1}{k}} \frac{T_4}{T_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

# Действительный цикл ГТУ

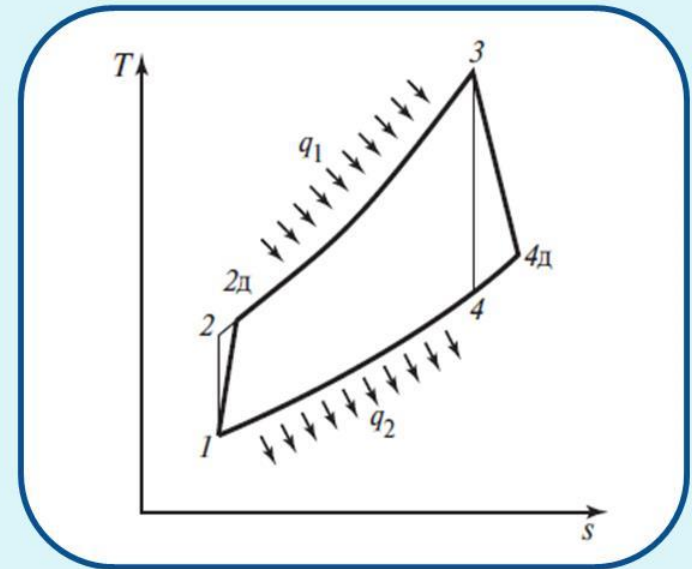
Внутренний относительный КПД турбины:

$$\eta_{0i}^T = \frac{l_T^D}{l_T} = \frac{h_3 - h_{4Д}}{h_3 - h_4}$$

Внутренний относительный КПД компрессора:

$$\eta_{0i}^K = \frac{l_K}{l_K^D} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2Д} - h_1}$$

$$q_1^D = h_3 - h_{2Д}$$



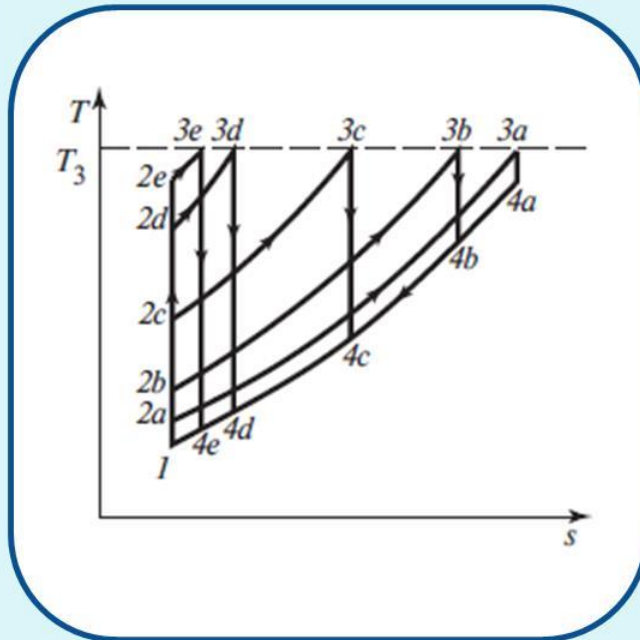
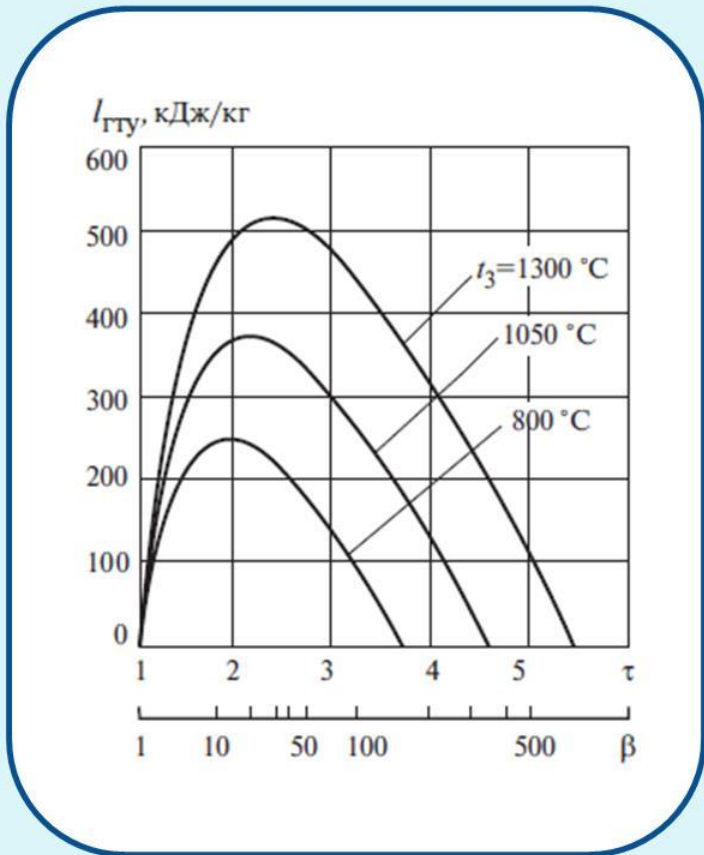
$$\eta_i = \frac{l_{ГТУ}^D}{q_1^D} = \frac{(h_3 - h_4) \eta_{0i}^T - (h_2 - h_1) / \eta_{0i}^K}{h_3 - h_{2Д}}$$

$$h_{4Д} = h_3 + (h_3 - h_4) \eta_{0i}^T$$

$$h_{2Д} = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_{0i}^K}$$



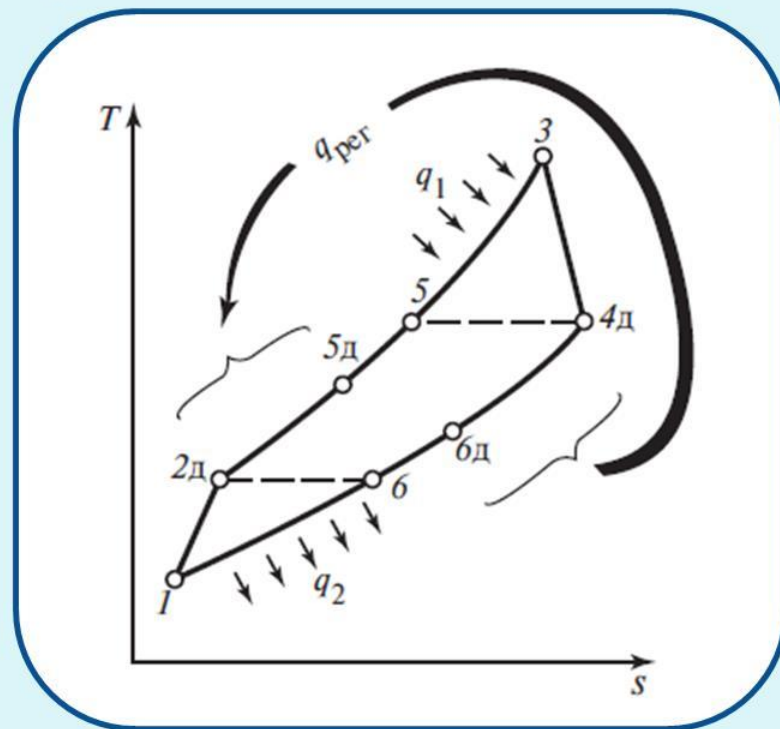
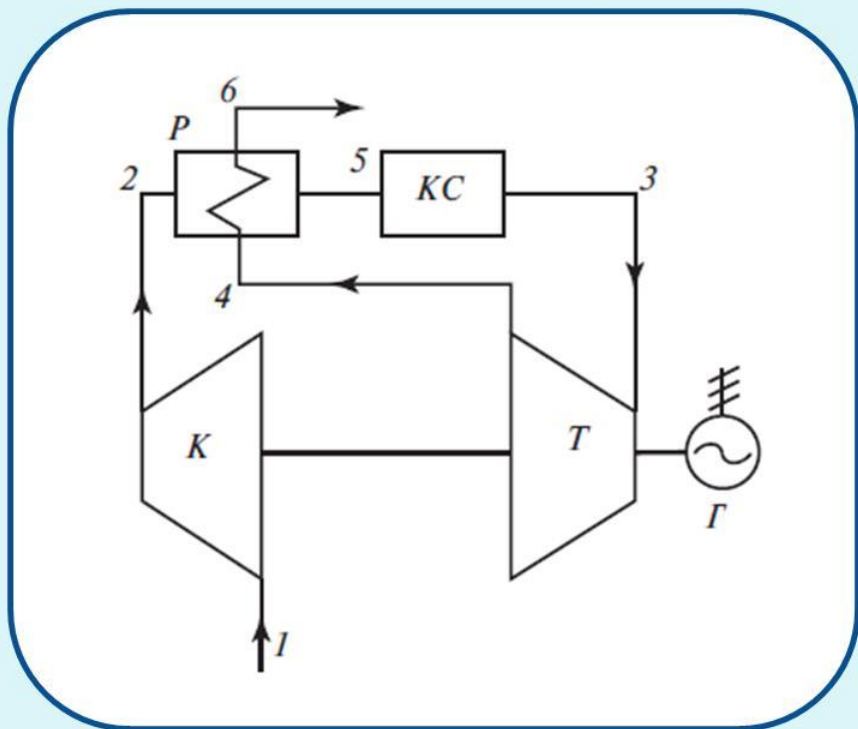
# Понятие об оптимальных циклах ГТУ (идеальные циклы)



$$\tau_0 = \sqrt{\frac{T_3}{T_2}}$$

$$\beta_0 = \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

# Цикл ГТУ с регенерацией



Предельная регенерация:  $q_{\text{рег}}^{\text{пред}} = h_{4\text{д}} - h_6 = h_5 - h_{2\text{д}} = h_{4\text{д}} - h_{2\text{д}}$

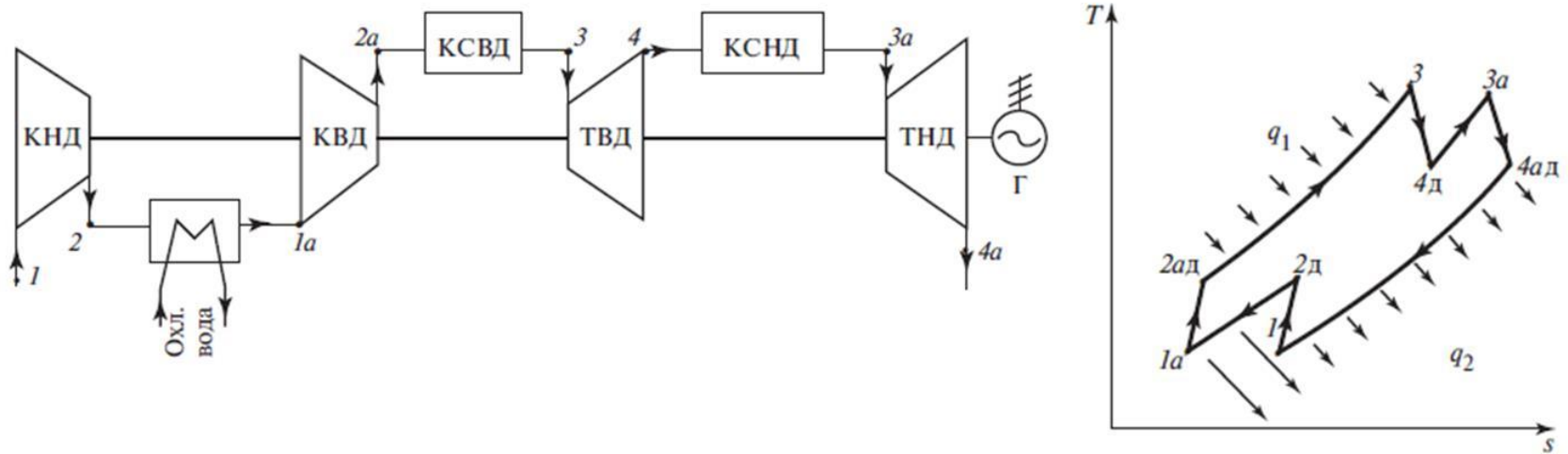
$$q_{\text{рег}} = h_{4\text{д}} - h_{6\text{д}} = h_{5\text{д}} - h_{2\text{д}}$$

Степень регенерации:

$$\sigma = \frac{q_{\text{рег}}}{q_{\text{рег}}^{\text{пред}}} = \frac{h_{4\text{д}} - h_{6\text{д}}}{h_{4\text{д}} - h_{2\text{д}}} = \frac{h_{5\text{д}} - h_{2\text{д}}}{h_{4\text{д}} - h_{2\text{д}}}$$

$$\eta_i = \frac{l_{\text{ГТУ}}^{\text{д}}}{q_1^{\text{д}}} = \frac{(h_3 - h_4) \eta_{0i}^{\text{T}} - (h_2 - h_1) / \eta_{0i}^{\text{K}}}{h_3 - h_{5\text{д}}}$$

# ГТУ с многоступенчатым сжатием и расширением рабочего тела



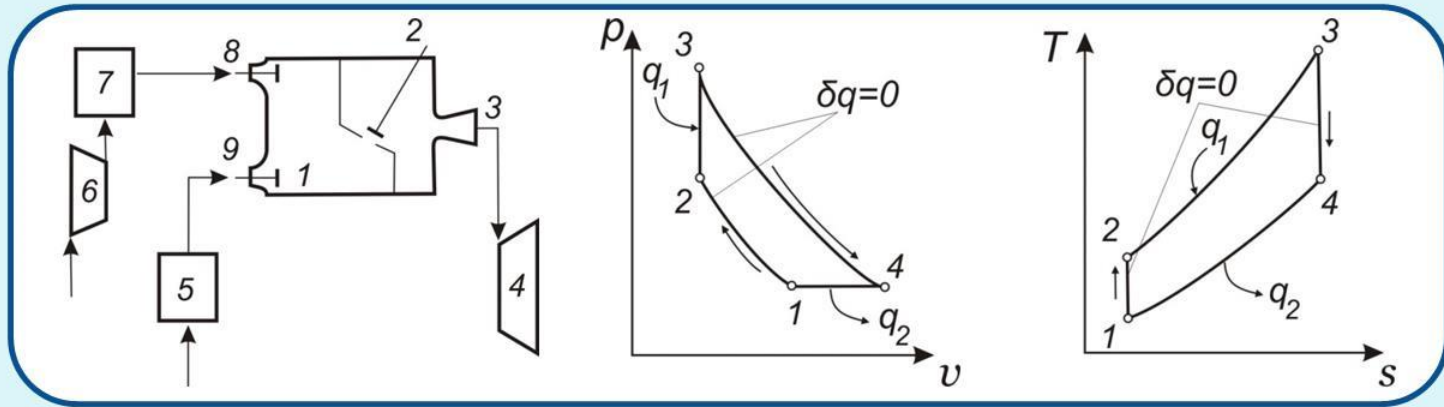
$$\eta_t = \frac{l_{\text{ГТУ}}^{\text{д}}}{q_1} = \frac{[(h_3 - h_{4\text{д}}) + (h_{3\text{а}} - h_{2\text{ад}})] - [(h_{2\text{д}} - h_1) + (h_{2\text{ад}} - h_{1\text{а}})]}{(h_3 - h_{2\text{ад}}) + (h_{3\text{а}} - h_{4\text{д}})}$$

Аналогично компрессору для оптимальных соотношений и для турбины

$$\beta_{\text{ступени Компрессора}} = \sqrt[m]{\beta} \quad \beta_{\text{ступени Турбины}} = \sqrt[n]{\beta} \quad \beta = p_{\text{max}} / p_{\text{min}}$$

Для реальных последние ступени увеличивают, что ведет к уменьшению затрат теплоты на нагрев и уменьшает теплоту отведенную.

# ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме



$$q_1 = \bar{c}_v (T_3 - T_2)$$

$$|q_2| = \bar{c}_p (T_4 - T_1)$$

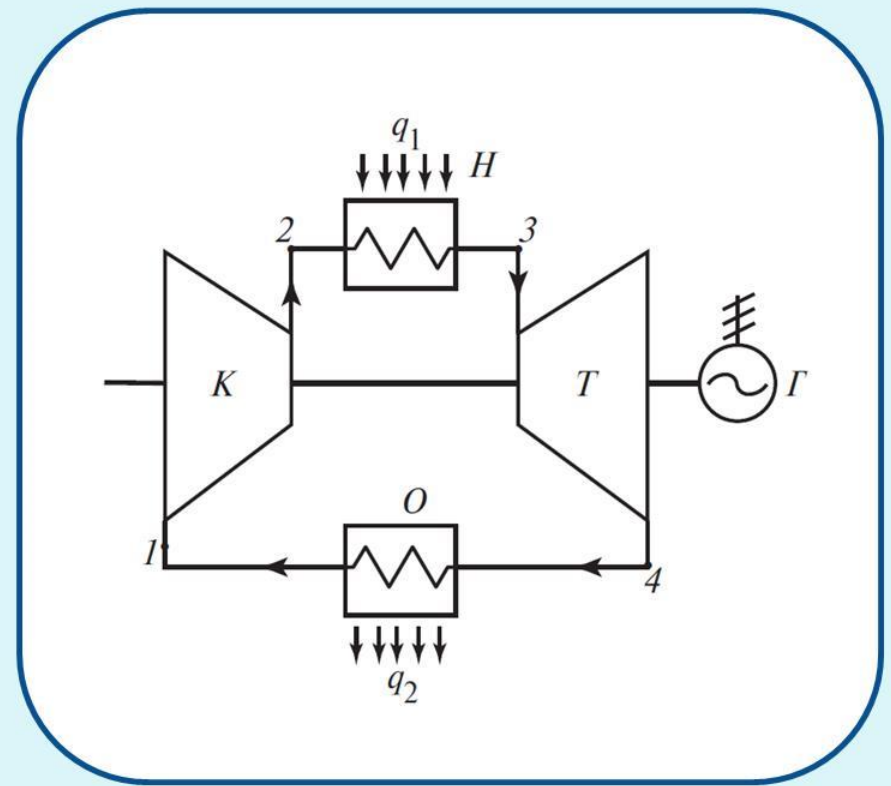
$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{\bar{c}_p (T_4 - T_1)}{\bar{c}_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{k(T_4 - T_1)}{T_3 - T_2}$$

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

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

$$\eta_t = 1 - \frac{k(\lambda^{1/k} - 1)}{(\lambda - 1)\beta^{(k-1)/k}}$$

## Замкнутые ГТУ

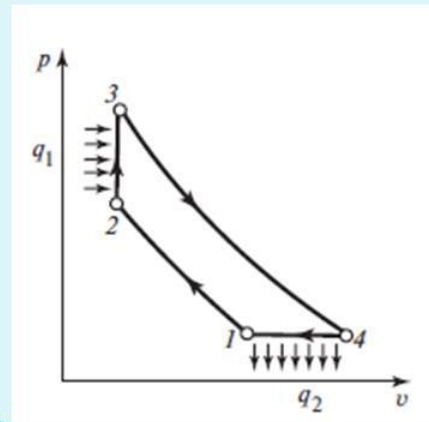
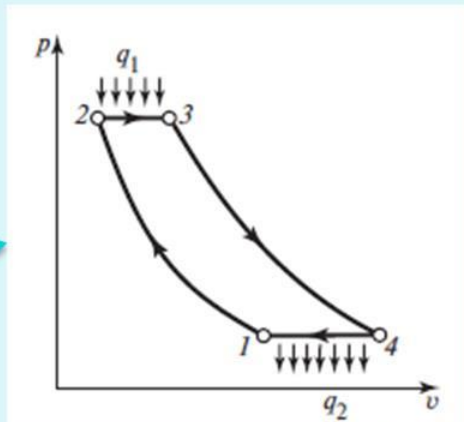
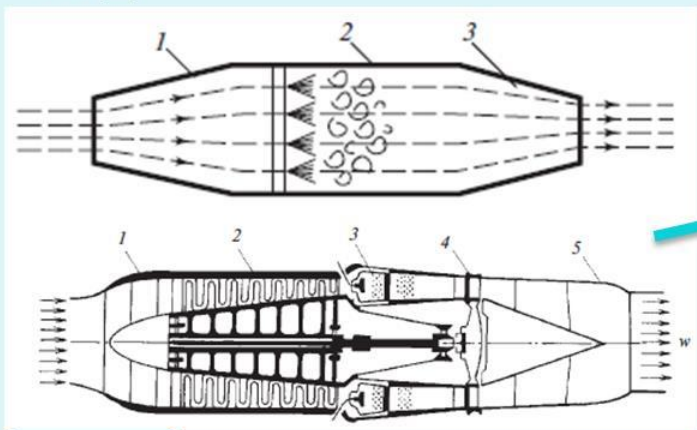


Использование гелия – высокие скорости, но из-за теплообменников слишком громоздко и не вся теплота достигает рабочего тела.

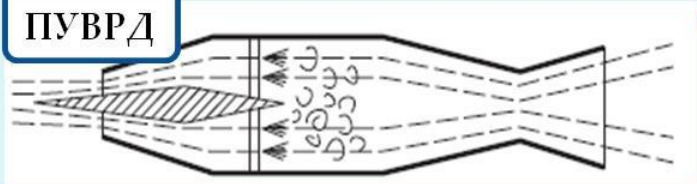
# Понятие о циклах реактивных двигателей (основные типы)

Реактивные двигатели подразделяются на две основные категории — ракетные двигатели (РД) и воздушно-реактивные двигатели (ВРД).

## ВРД



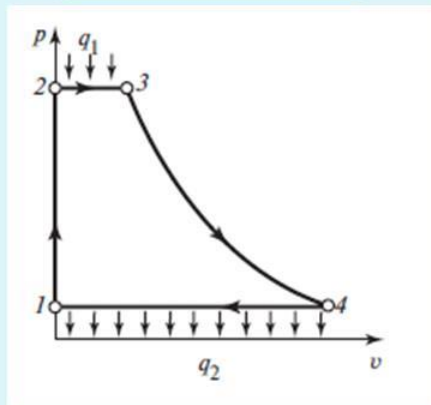
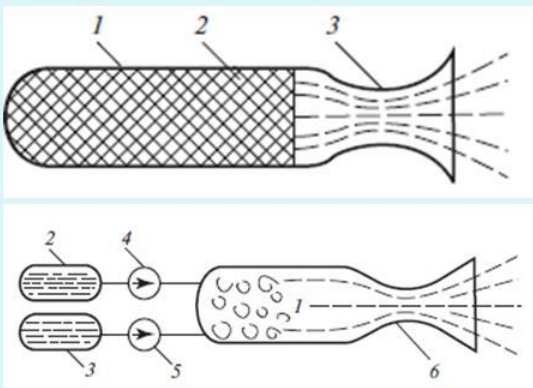
## ПУВРД



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k}{k-1}}}$$

$$\beta = \left( 1 + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2c_p T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

## РД



$$\eta_t = \frac{w^2}{2(h_3 - h_1)}$$