

# Техническая термодинамика

# Прямые и обратные циклы

Прямой цикл – цикл двигателя

Подведенная теплота преобразуется в работу

Обратный цикл – цикл холодильника

За счет совершенной работы теплота передается от холодного тела к горячему

# Прямой цикл

$$l_{\text{ц}} = l_p - |l_c| \qquad l_{\text{ц}} = q_{\text{ц}}$$

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} < 1$$

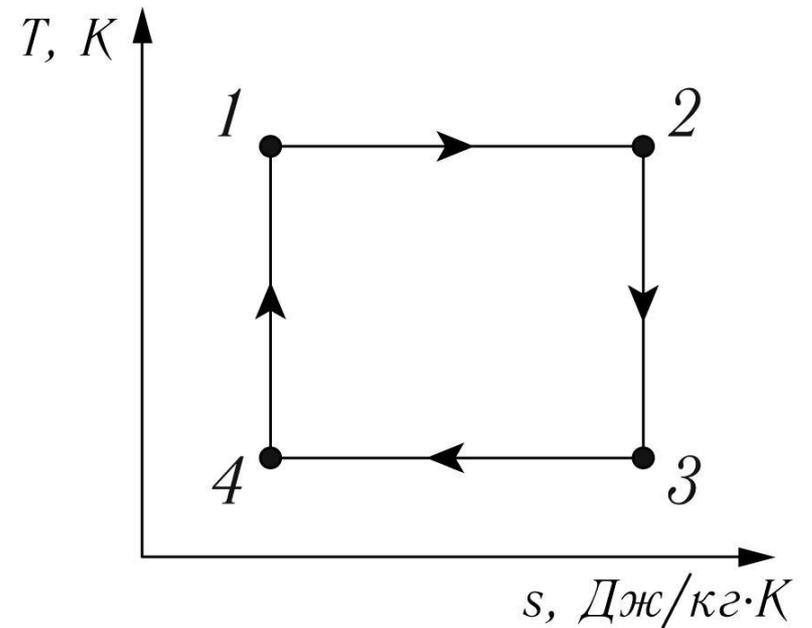
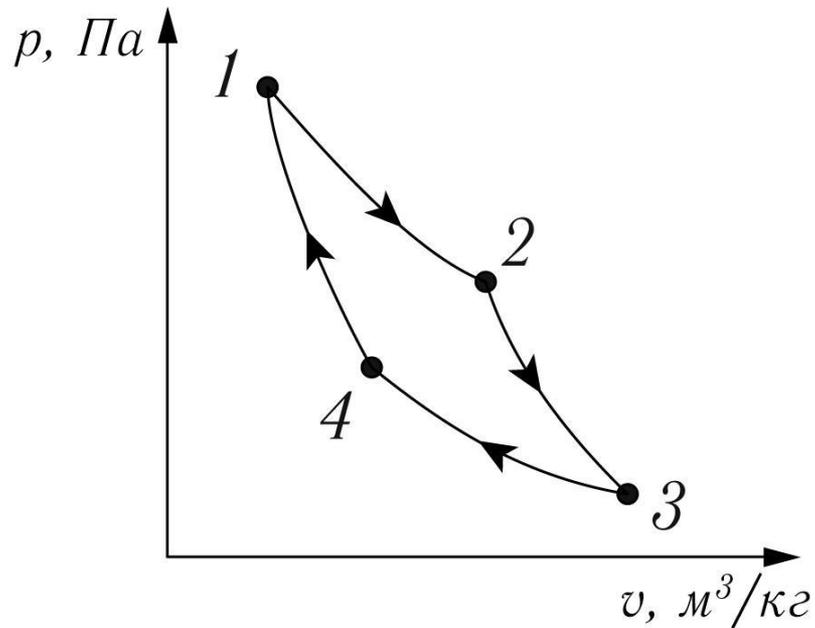
# Обратный цикл

$$l_u = |l_c| - l_p \quad q_u = |q_1| - q_2$$

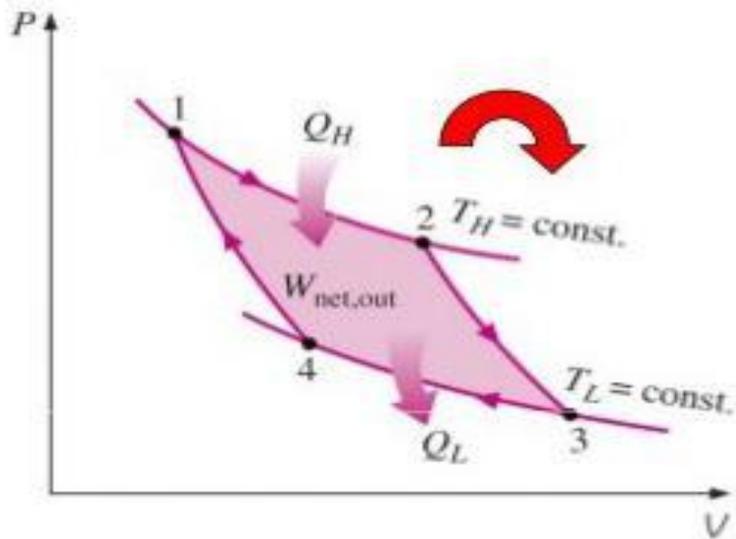
$$l_u = q_u$$

$$\varepsilon_t = \frac{q_2}{l_u} = \frac{1}{\frac{q_1}{q_2} - 1}$$

# Прямой цикл Карно в $p$ - $v$ и $T$ - $s$ координатах



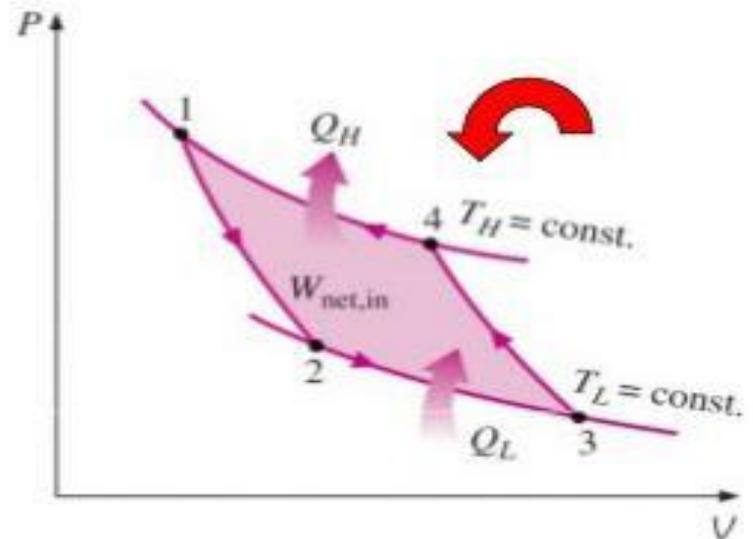
# Цикл Карно



Прямой цикл Карно

$$\eta_t^K = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|T_2 \Delta S_{3-4}|}{T_1 \Delta S_{1-2}}$$

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$



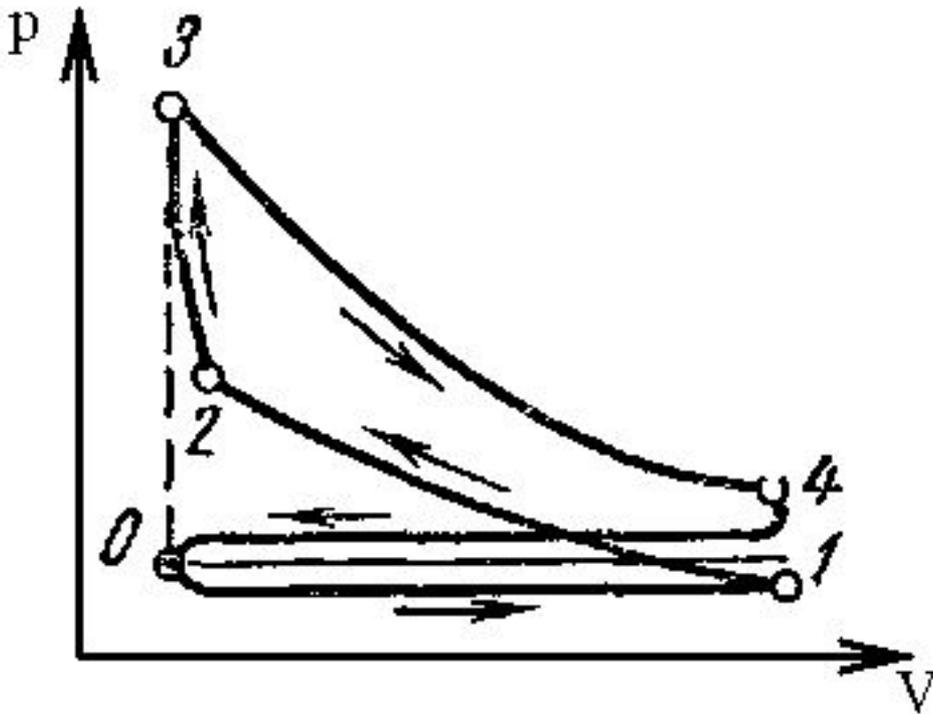
Обратный цикл Карно

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_y} = \frac{1}{\frac{q_1}{q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{T_{\max}}{T_{\min}} - 1} = \frac{T_{\min}}{T_{\min} - T_{\max}}$$

# Двигатели внутреннего сгорания

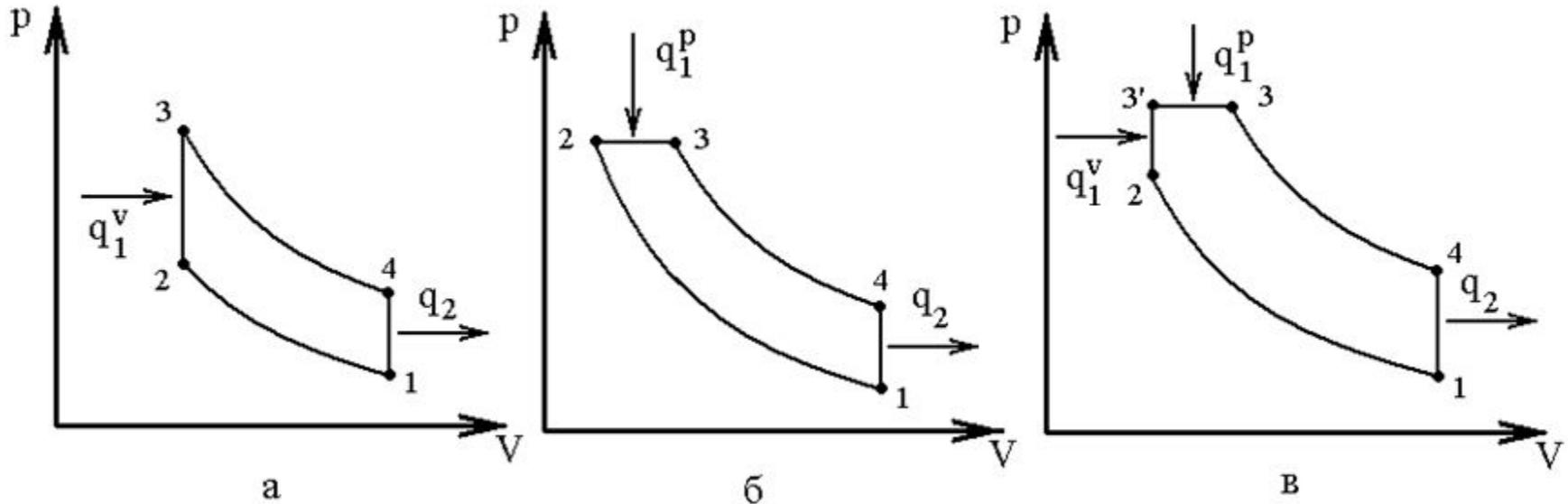
Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это тепловая машина, все процессы которой осуществляются в цилиндре

# Индикаторная диаграмма ДВС



- 0-1 – всасывание рабочего тела
- 1-2 – сжатие рабочего тела
- 2-3 – сгорание рабочего тела, практически при постоянном объеме.
- 3-4 – рабочий ход
- 4-0 – выброс продуктов сгорания

# Циклы ДВС



а – Отто

б – Дизеля

в - Тринклера

# Исходные данные для анализа ДВС

- 1) параметры рабочего тела  $k, R, C_p$
- 2) начальные параметры  $P_1 = P_{ос}$
- 3)  $\varepsilon, \lambda, \rho$  – из опыта конструирования
- 4) масса рабочего тела

# КПД ДВС

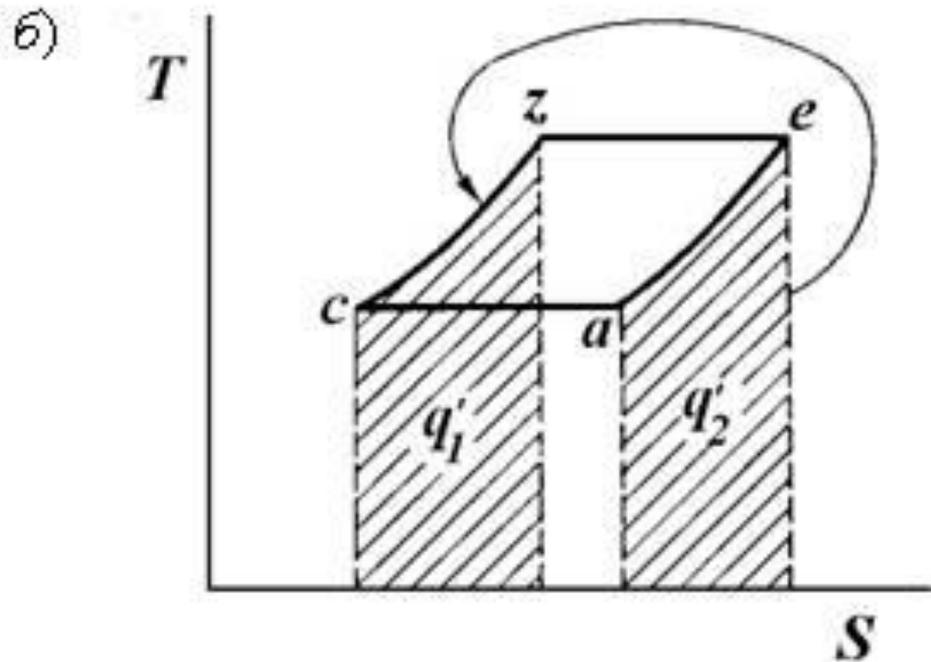
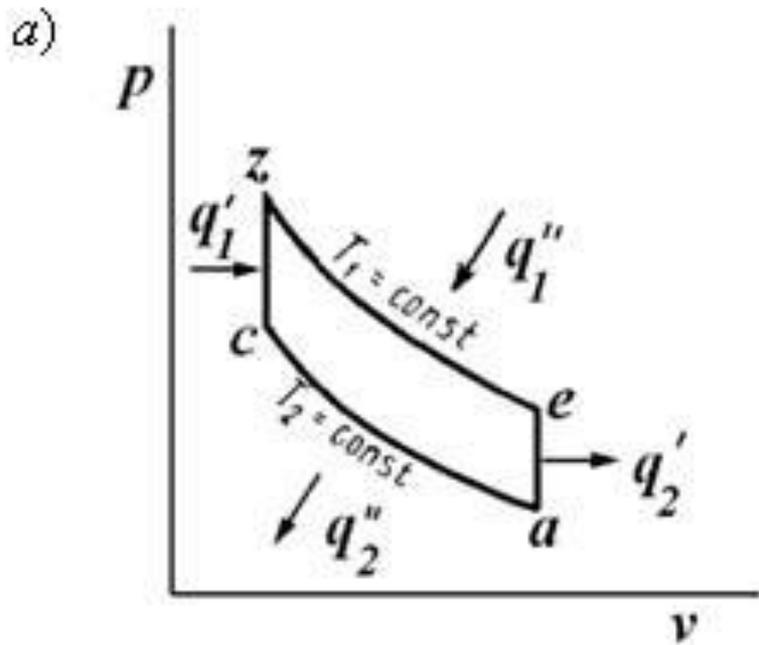
$$\eta_t^{V,p} = 1 - \frac{(\lambda \rho^k - 1)}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}$$

$$\eta_t^p = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} k(\rho - 1)}$$

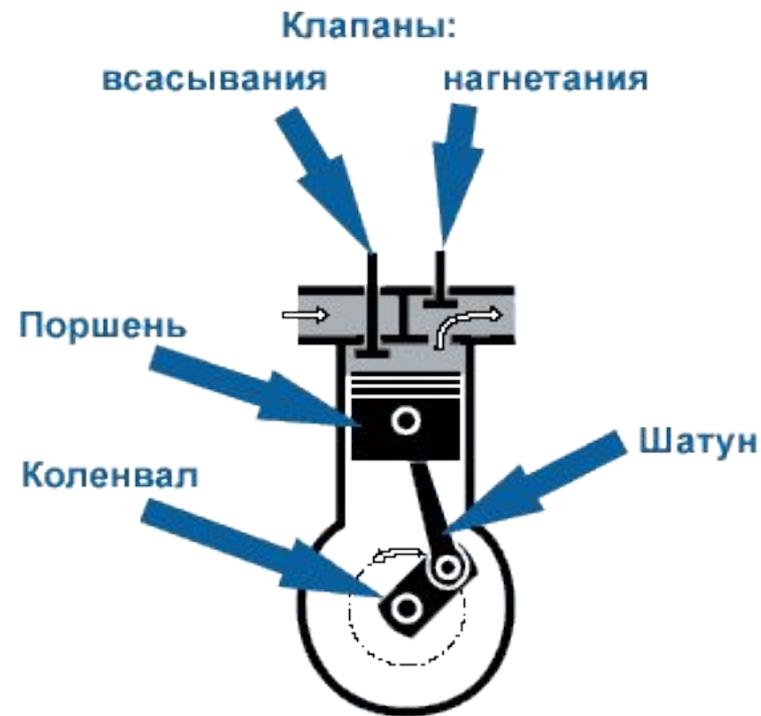
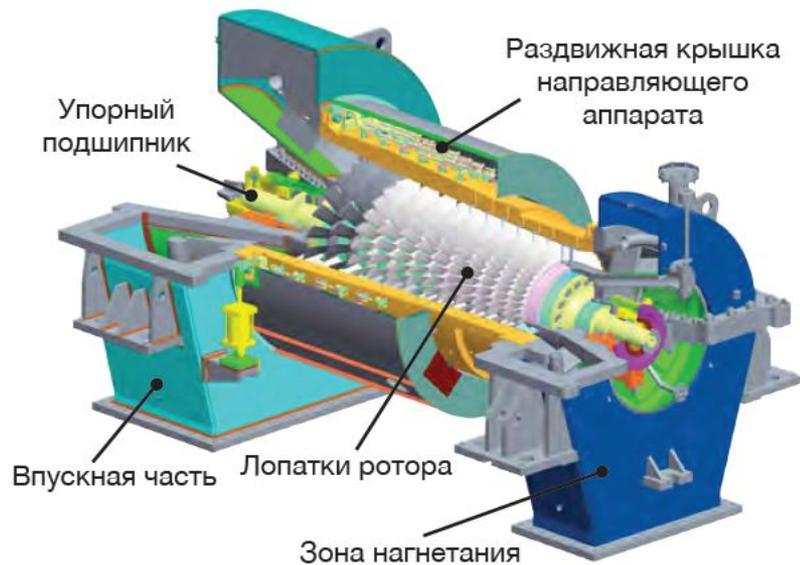
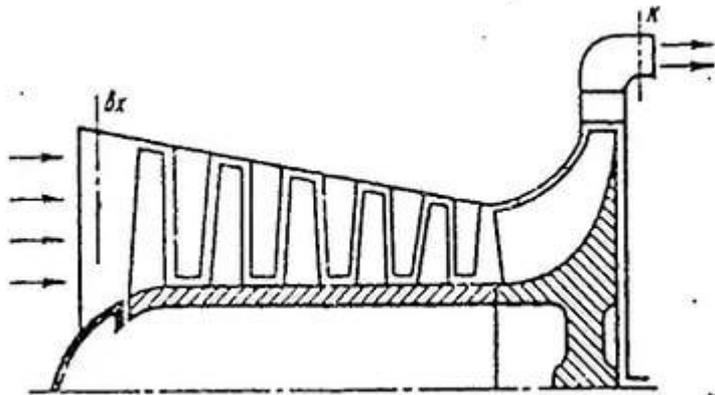
$$\eta_t^V = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

# Цикл Стирлинга

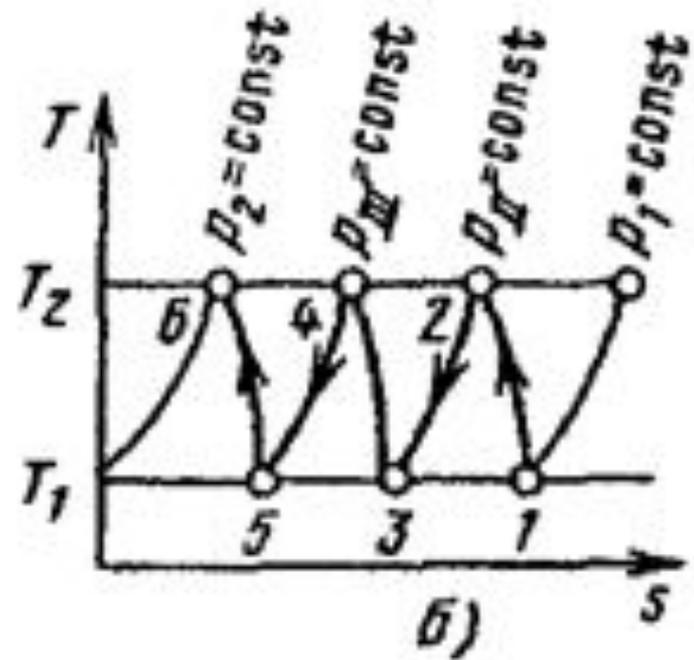
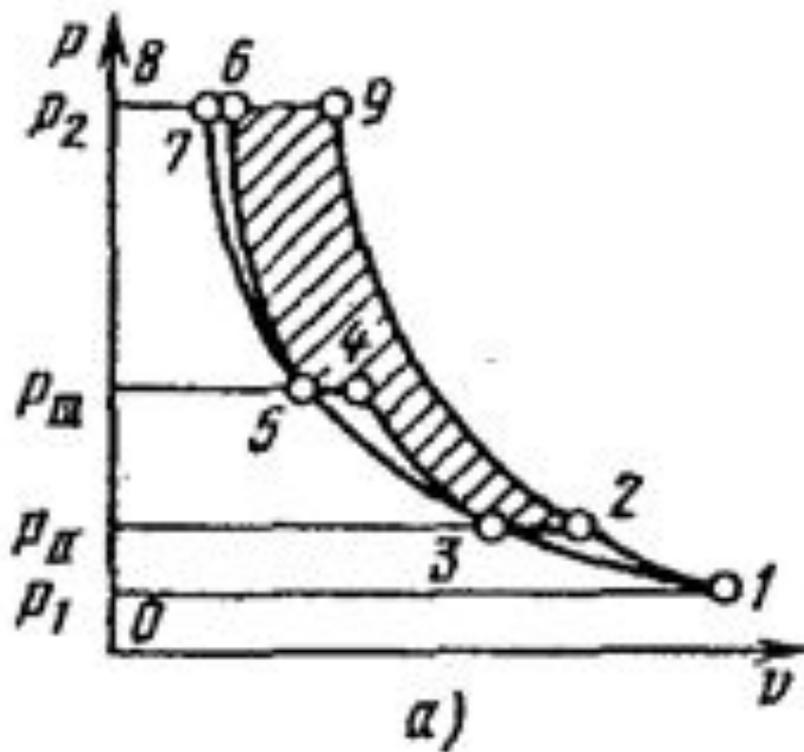
(цикл тепловой машины с регенерацией тепла)



# Схемы компрессоров



# Цикл многоступенчатого компрессора



# Работа компрессора

- Адиабатное сжатие

$$l_0^k = \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = i_1 - i_2$$

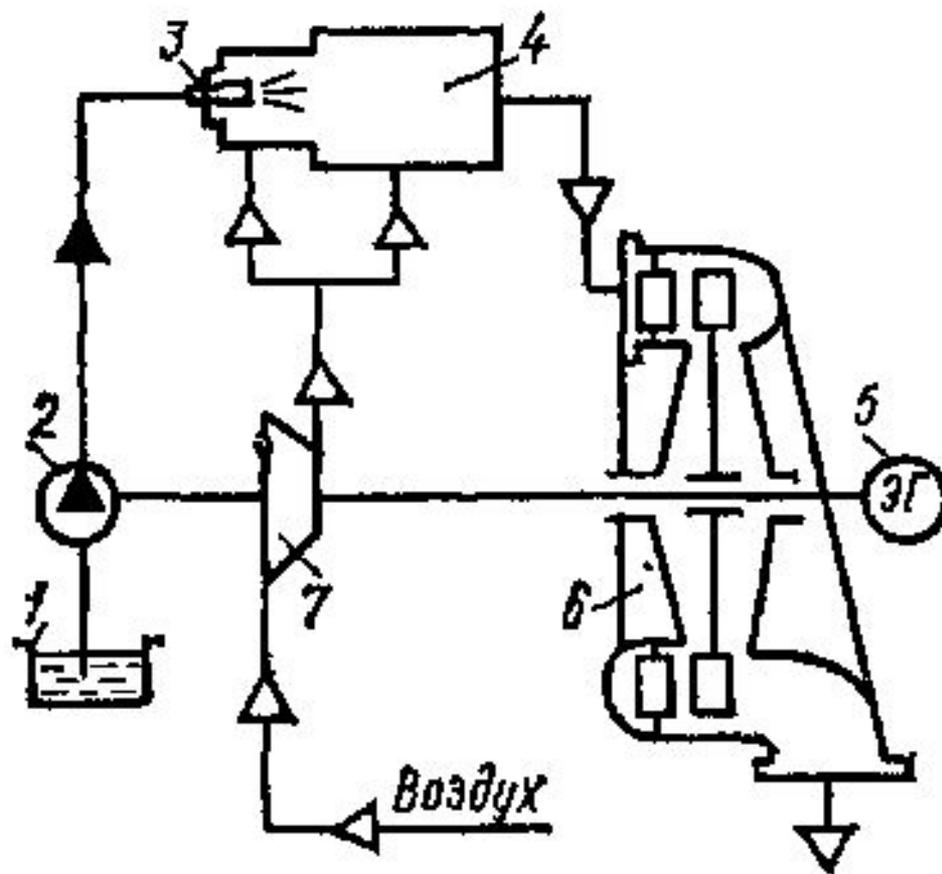
- Изотермическое сжатие

$$l_0^k = p_1 v_1 \ln \frac{v_2'''}{v_1}$$

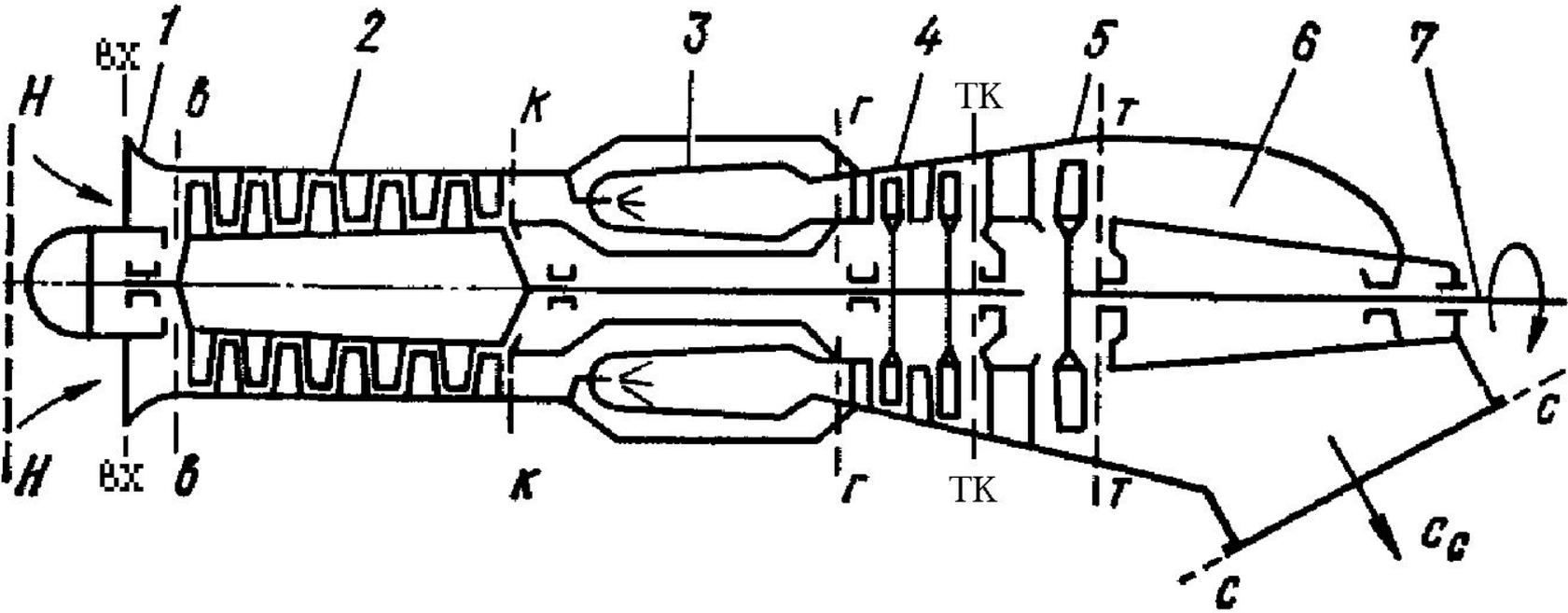
# Газотурбинные установки

ГТУ – тепловые машины, в которых термодинамические процессы осуществляются в различных агрегатах (компрессор, камера сгорания или газогенератор, турбина)

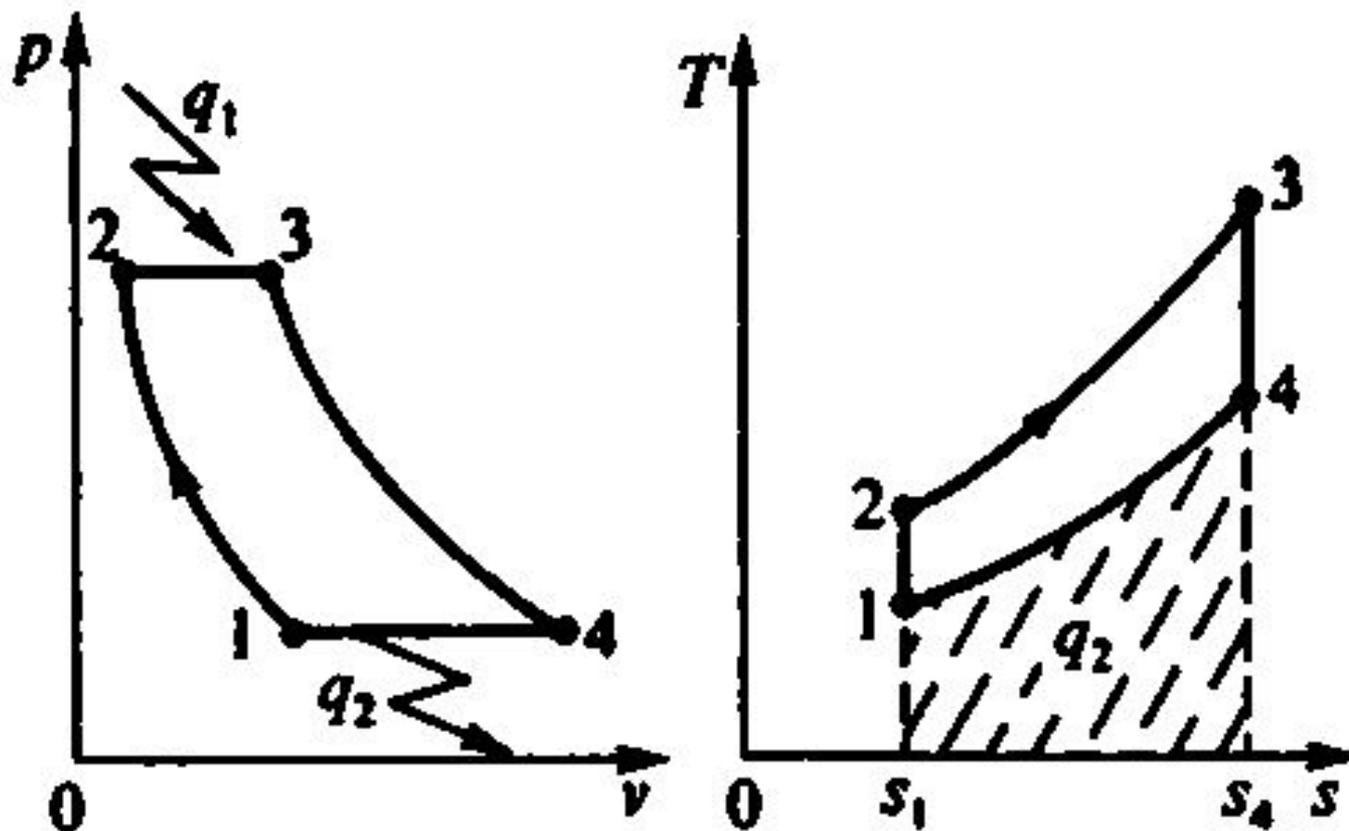
# Схема ГТУ непрерывного действия



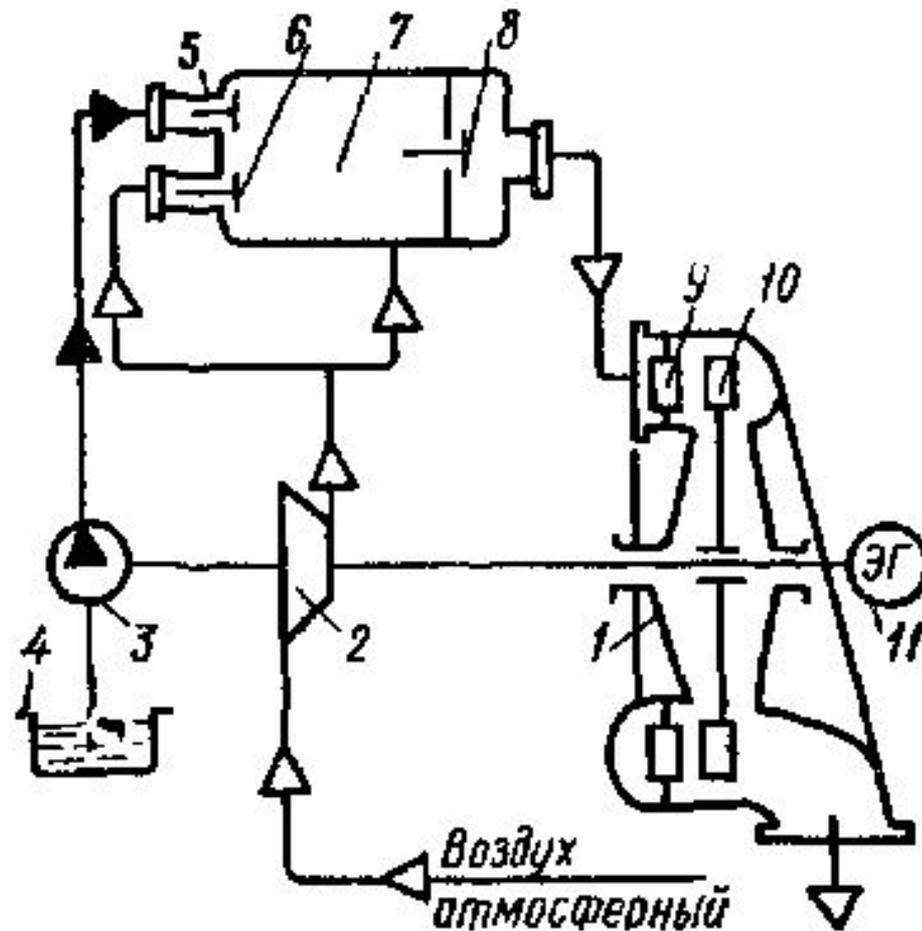
# Схема турбовального ГТД



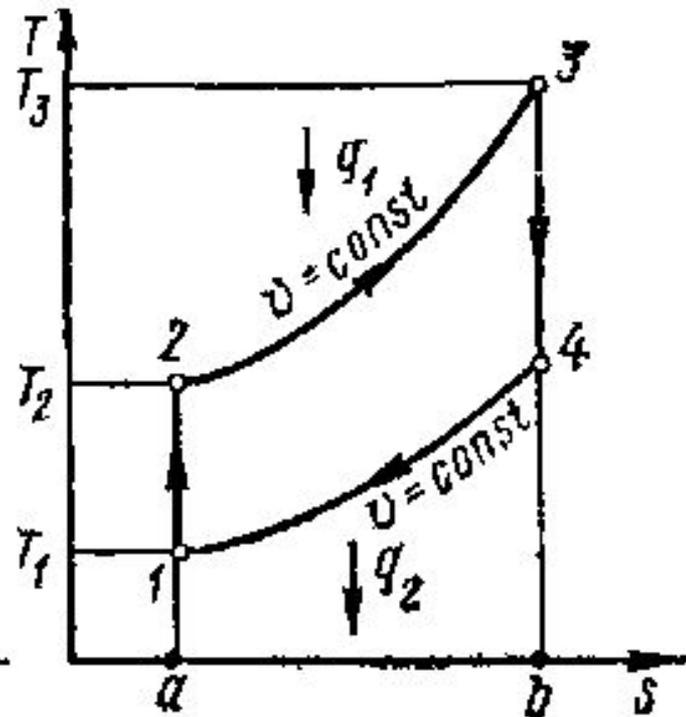
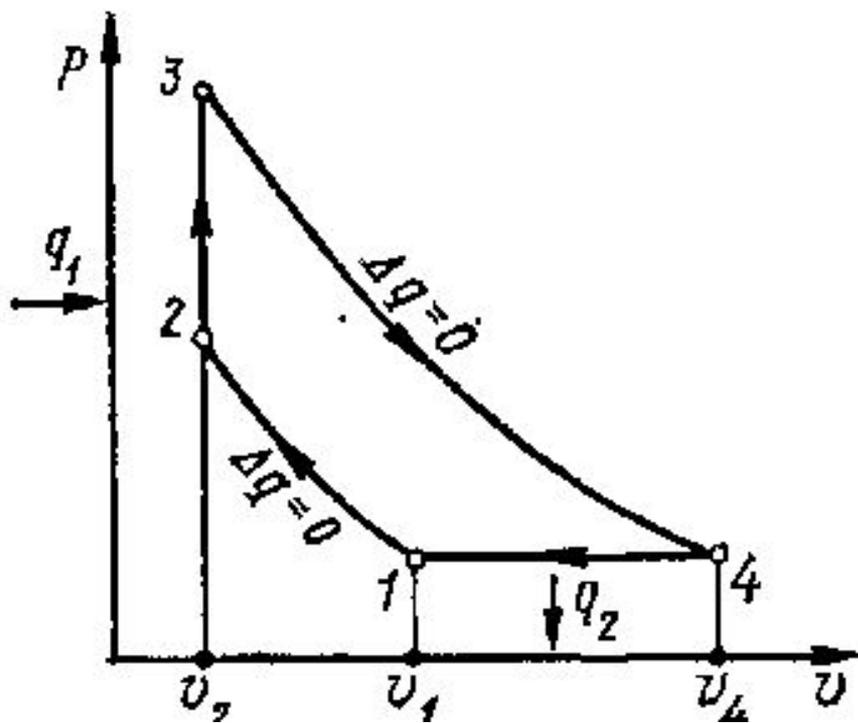
# Цикл ГТУ непрерывного действия



# Схема пульсирующей ГТУ



# Цикл пульсирующей ГТУ



# КПД ГТУ

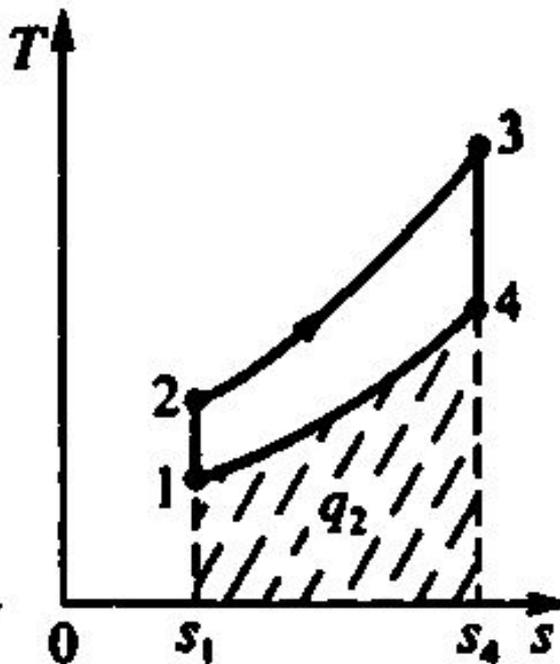
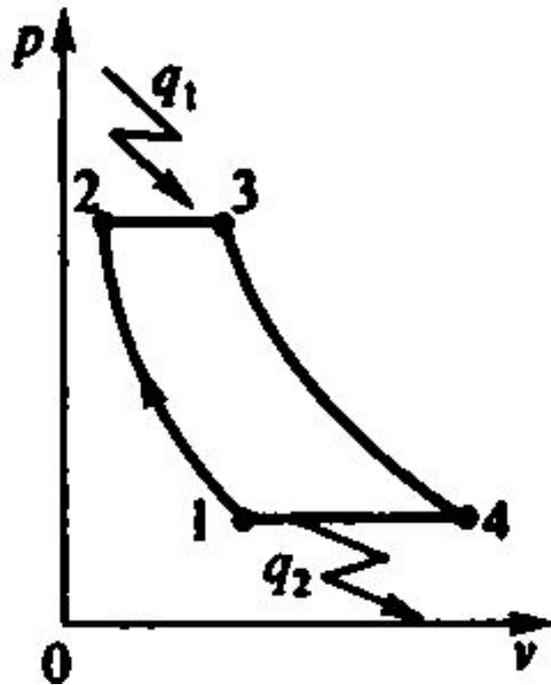
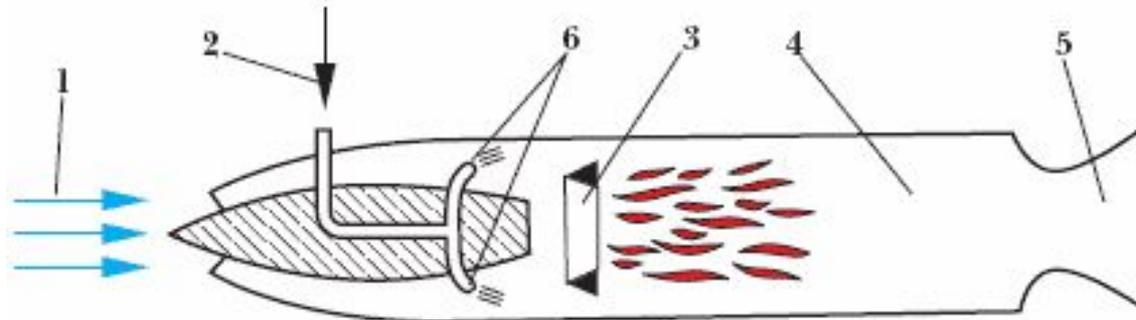
$$\eta_t^p = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\eta_t^v = 1 - \frac{k \left( T_1 \lambda^{\frac{1}{k}} - T_1 \right)}{T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} \lambda - T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{k \left( \lambda^{\frac{1}{k}} - 1 \right)}{\beta^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)}$$

# Реактивные двигатели

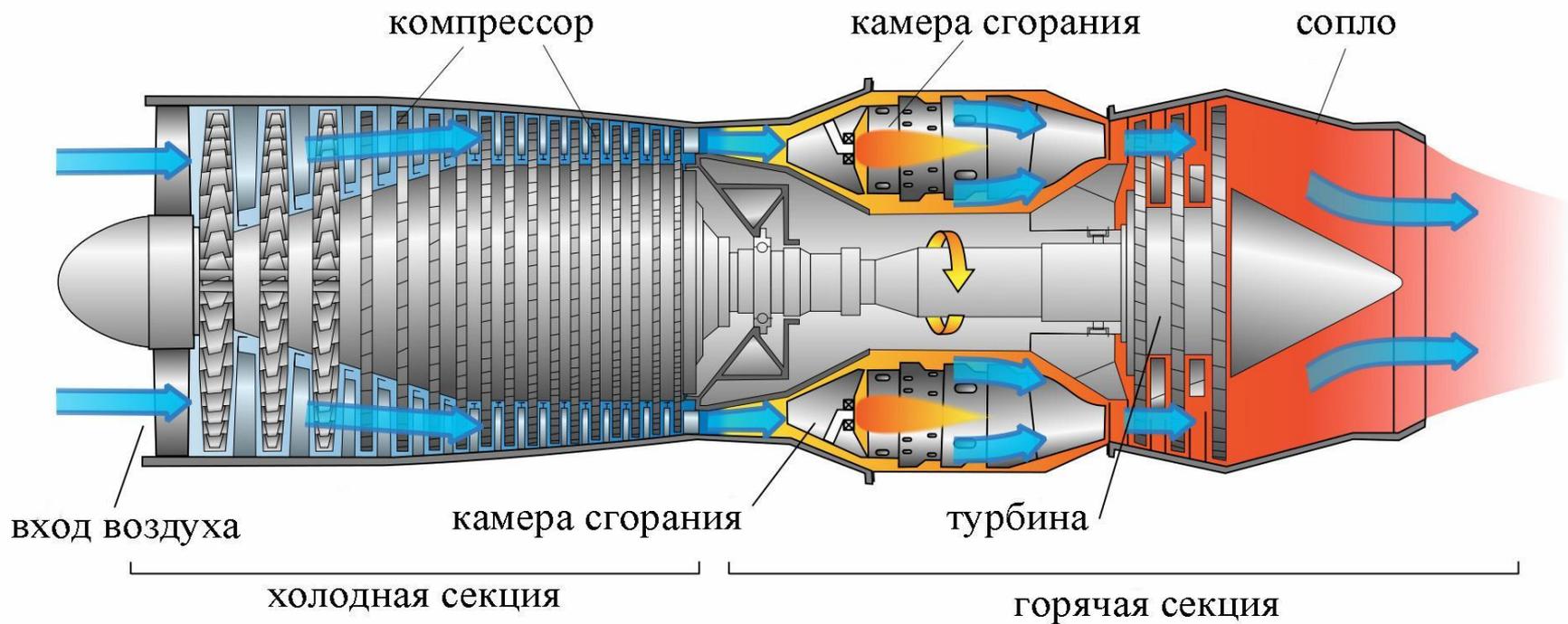
- Неавтономные двигатели (ВРД)
  - Турбореактивный
  - Турбовинтовой
  - Прямоточный
  - Пульсирующий
- Автономные двигатели (ЖРД, РДТТ)

# Прямоточный ВРД (ПВРД)

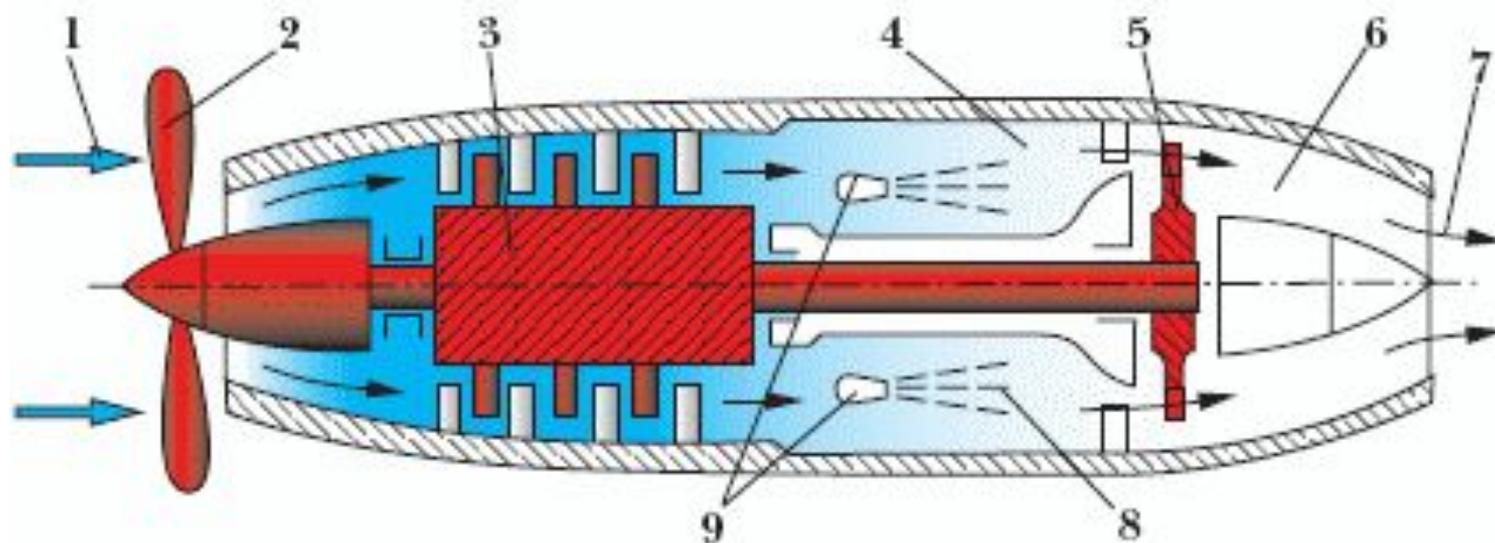


$$\eta^{перд} = \frac{1}{1 + \frac{2}{(k-1)M_n^2}}$$

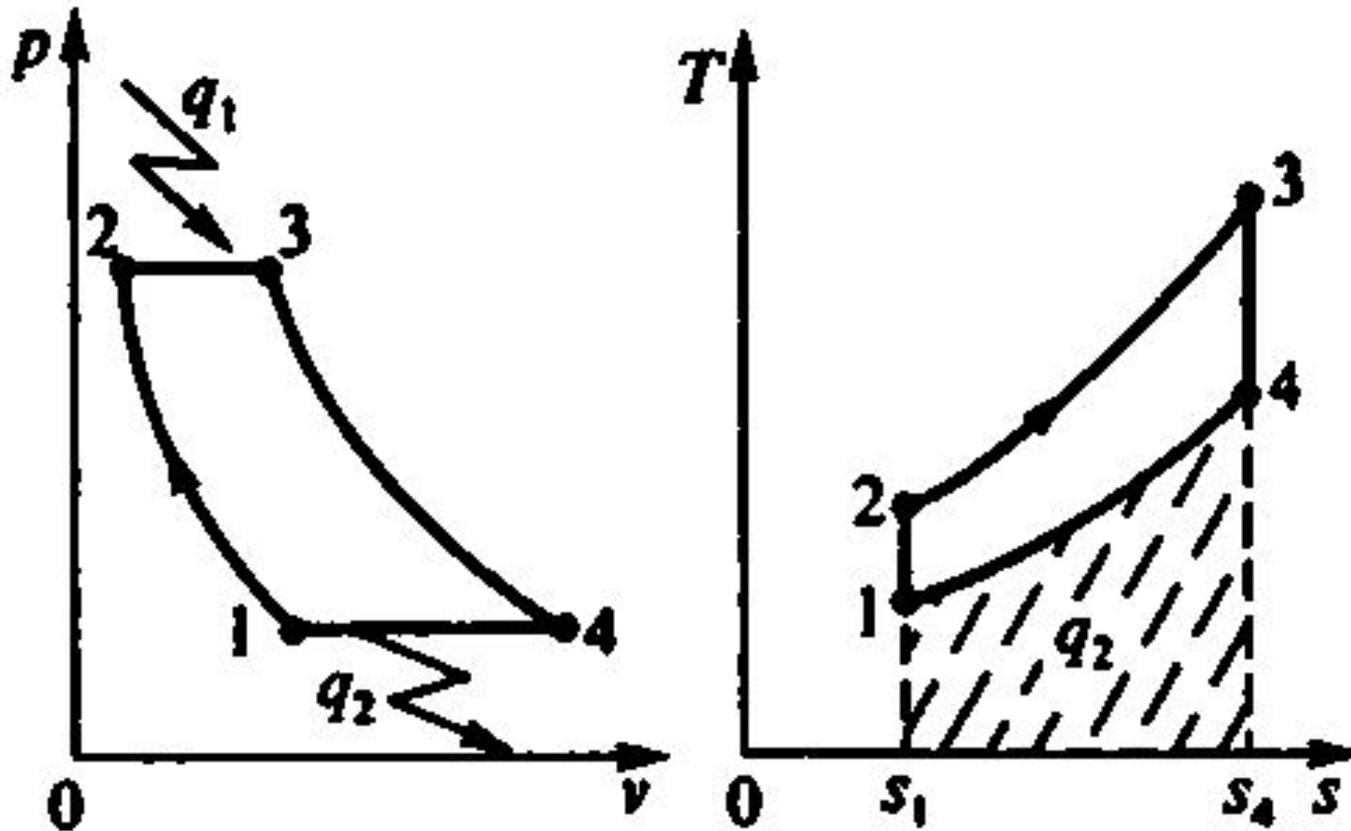
# Турбореактивный двигатель (ТРД)



# Турбовинтовой двигатель (ТВД)



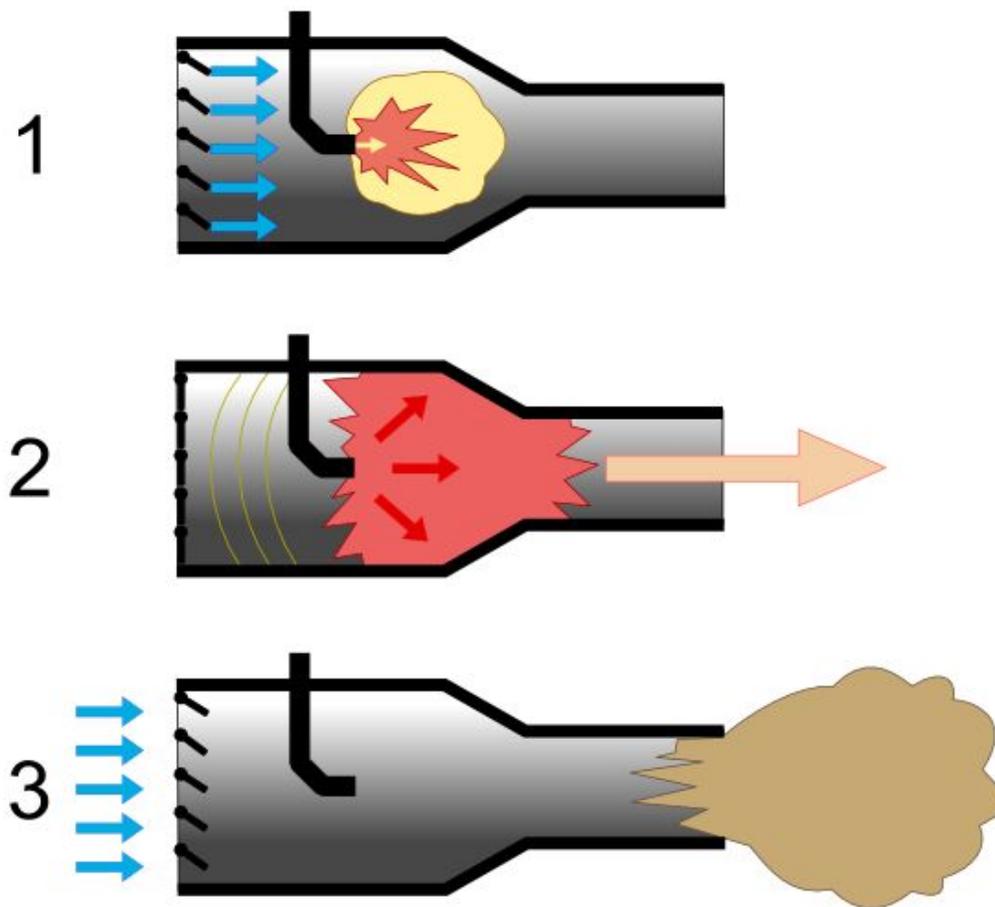
# Цикл ТВД и ТРД



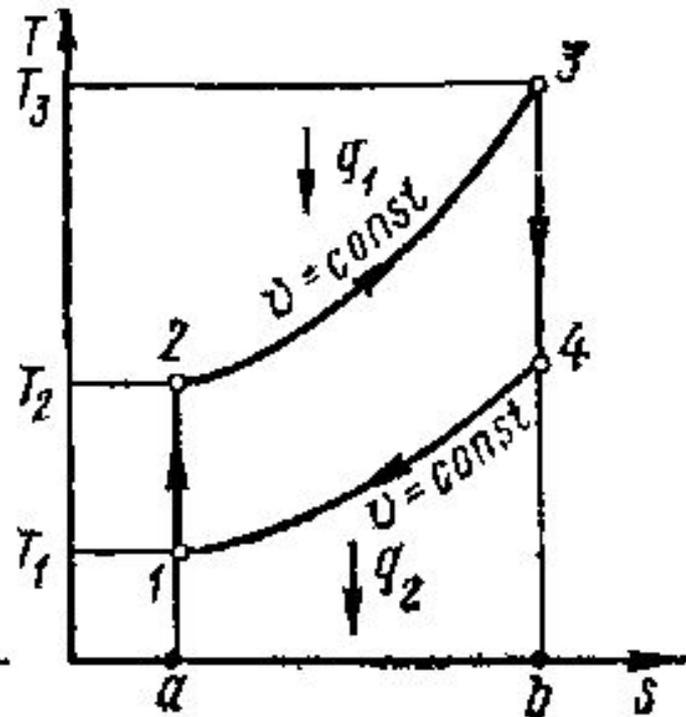
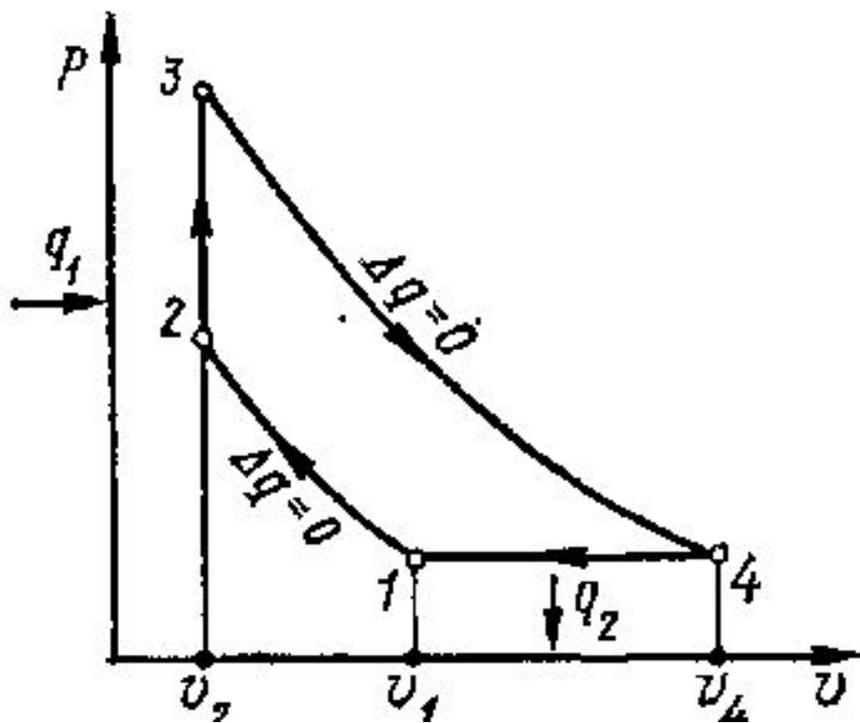
$$\eta_t^{\text{ГТД}} = 1 - \frac{1}{\beta_{\Sigma}^k}$$

$$\beta_{\Sigma} = \beta_{\kappa} \beta_{\partial}$$

# Пульсирующий ВРД (ПуВРД)



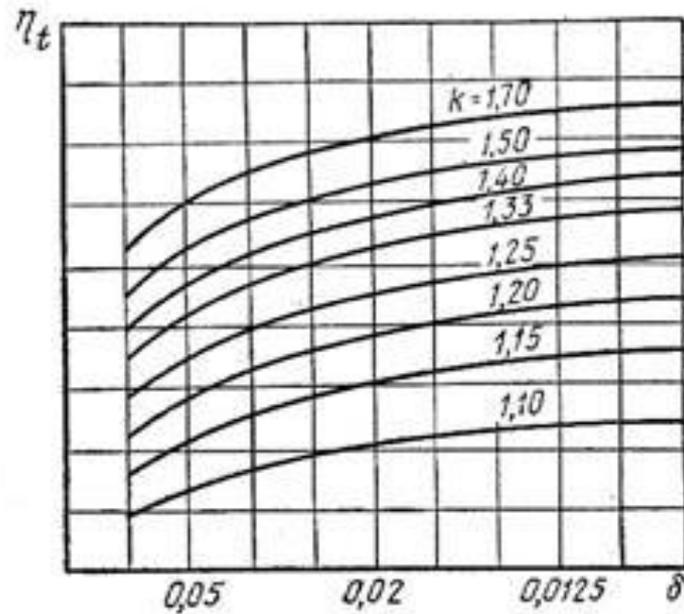
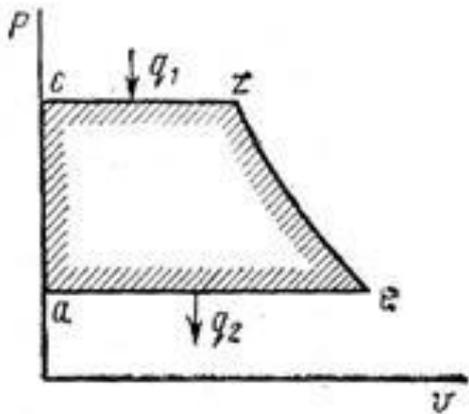
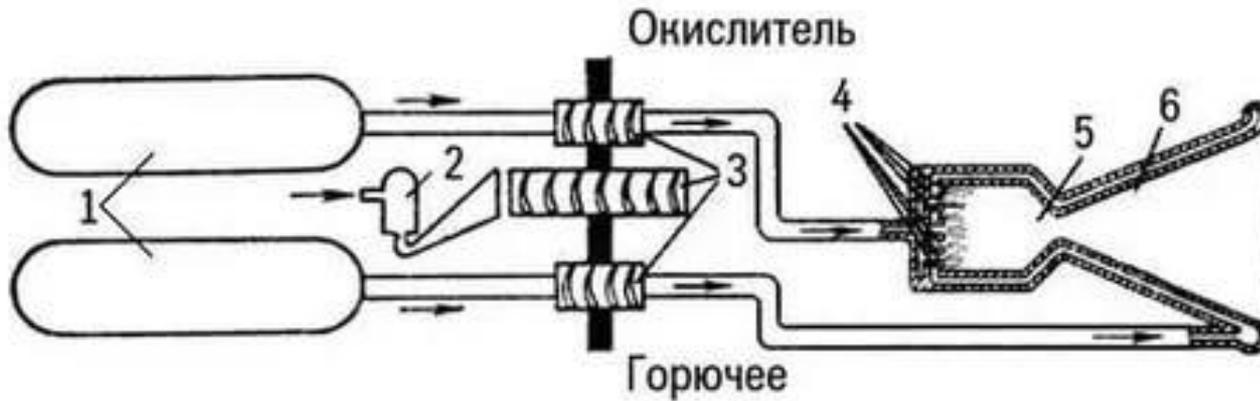
# Цикл пульсирующего ВРД



# ЖРД РД-107



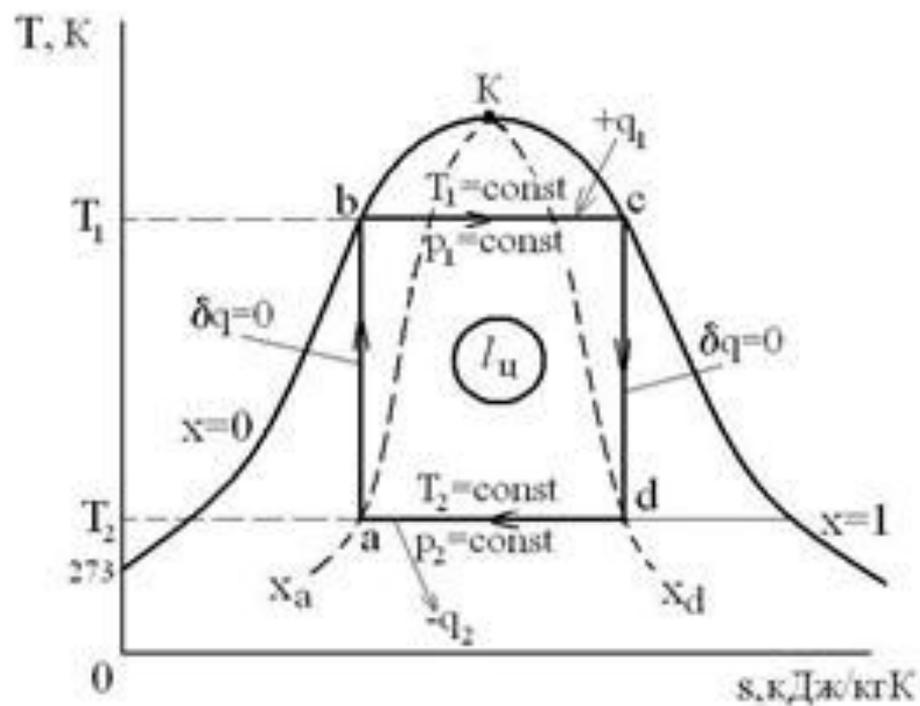
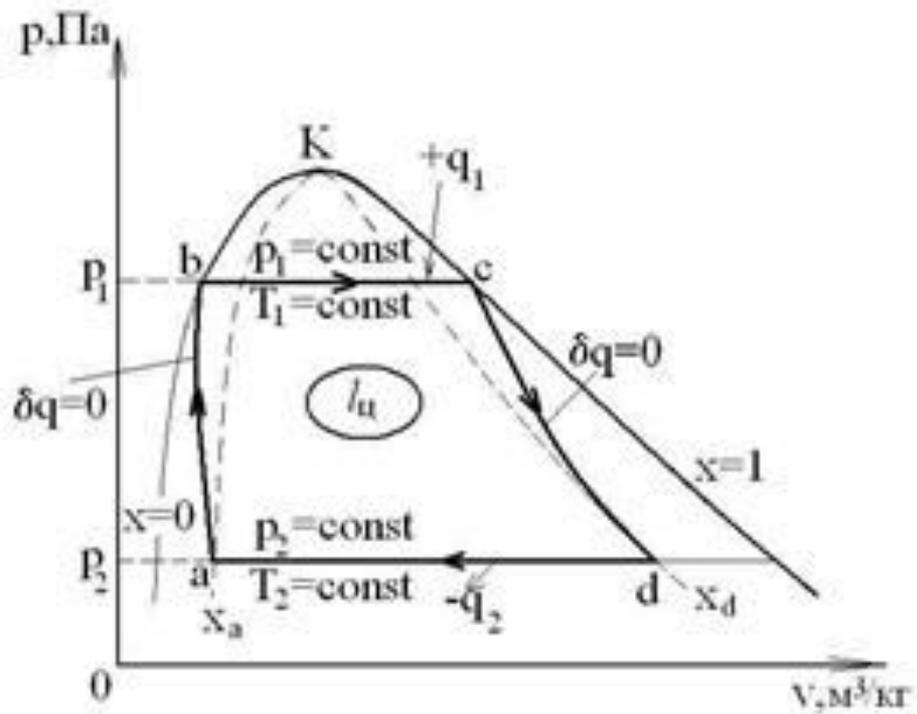
# Схема и цикл ЖРД



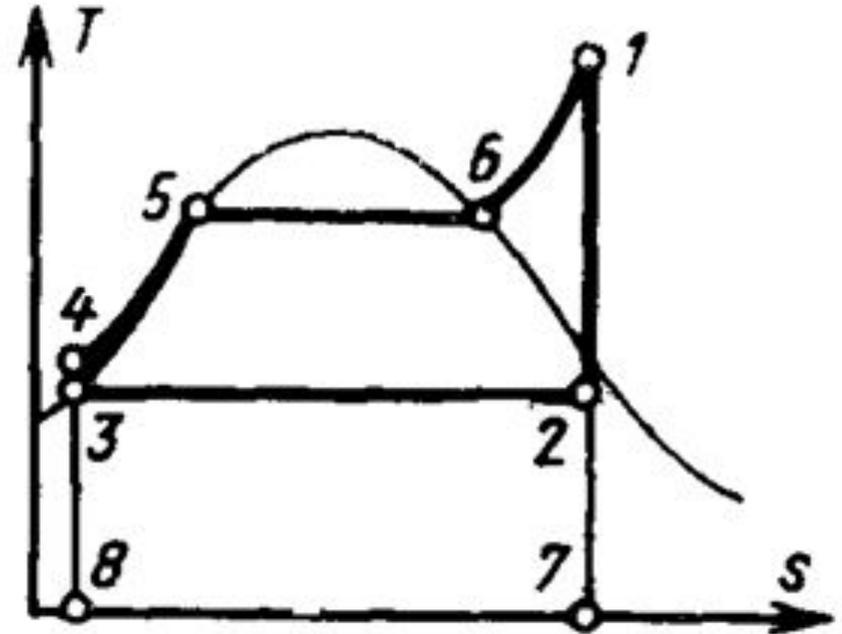
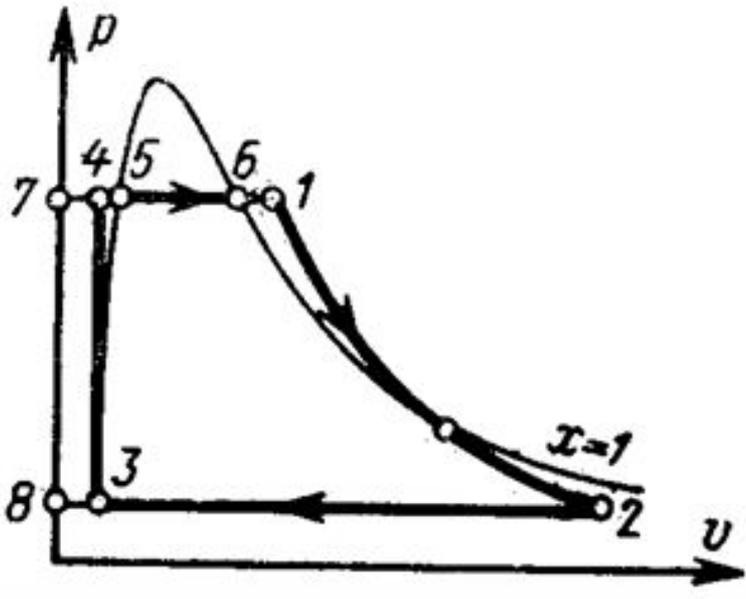
$$\eta_t^{\text{ЖРД}} = 1 - \left( \frac{P_a}{P_{\text{КС}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

# ПАРОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ

# Паросиловой цикл Карно



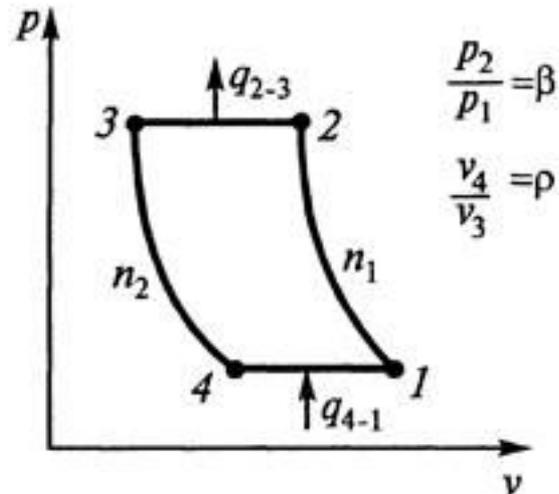
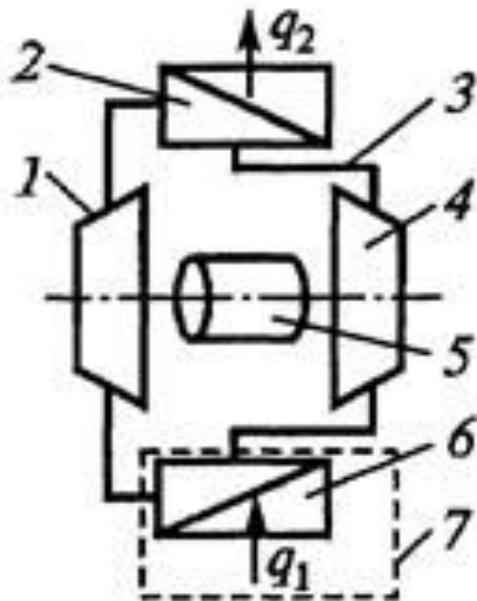
# Паросиловой цикл Ренкина



- 1-2 - адиабатный процесс расширения пара в двигателе;  
2-3 - изобарно-изотермический процесс конденсации отработавшего пара в конденсаторе;  
3-4 - адиабатного процесса повышения давления воды в насосе;  
4-5-6-1 - изобарный процесс парообразования и перегрева

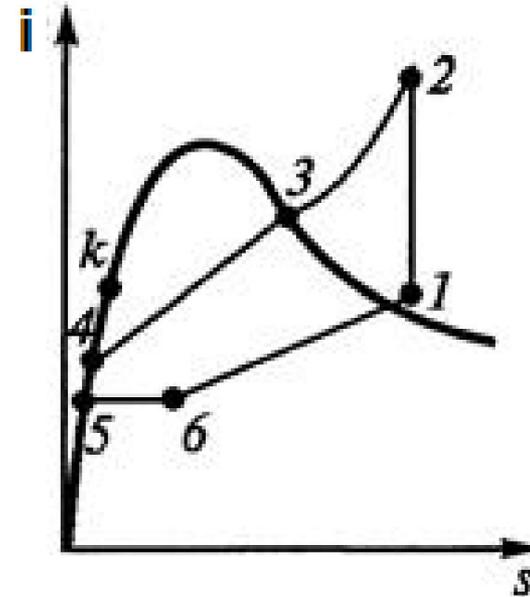
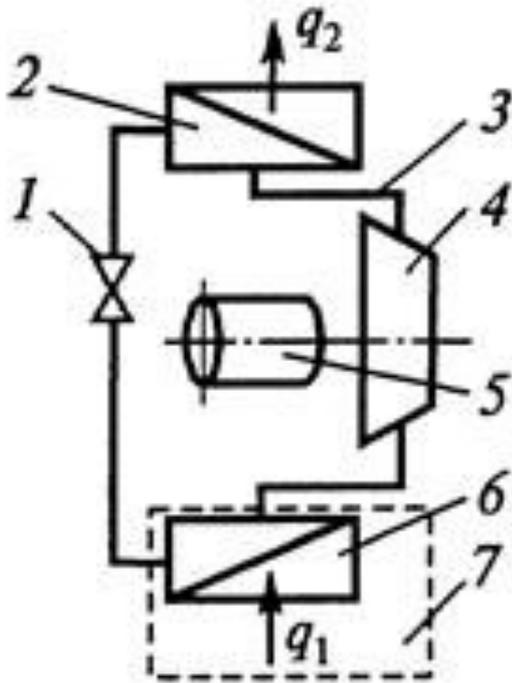
# ЦИКЛЫ ХОЛОДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

# Воздушная холодильная установка



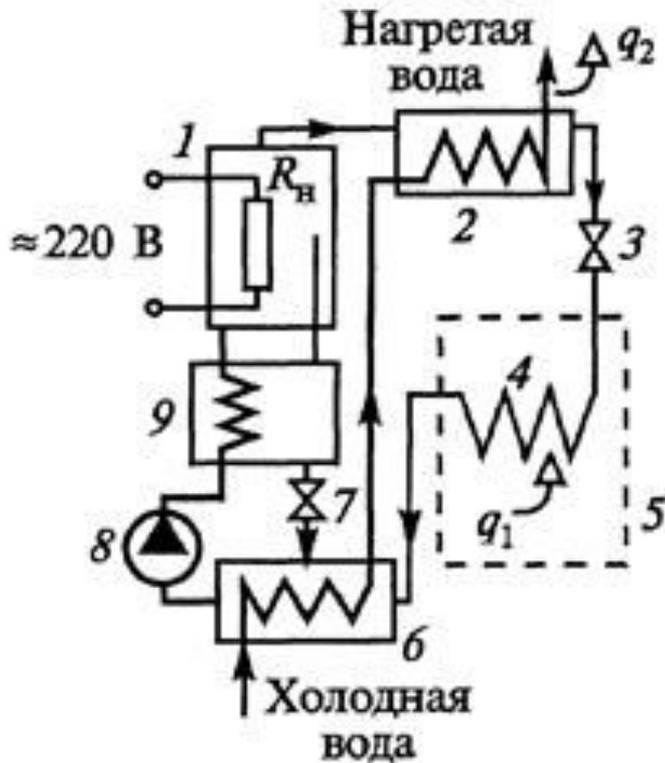
- 1 – компрессор;
  - 2 – холодильник;
  - 3 – трубопровод;
  - 4 - детандер (расширительная машина);
  - 5 – электродвигатель;
  - 6 – нагреватель;
  - 7 - охлаждаемый объем (помещение);
- $q_1$  – отведенная из помещения 7  
теплота;
- $q_2$  - теплота, отведенная в ОС.

# Парокомпрессионная холодильная установка



- 1 – дроссельное устройство;
- 2 – теплообменник (конденсатор);
- 3 – трубка;
- 4 – компрессор;
- 5 – электродвигатель;
- 6 – теплообменник;
- 7 – охлаждаемое помещение;

# Газоабсорбционная установка



- 1 – парогенератор + электронагреватель;
- 2 – конденсатор;
- 3 - дроссельное устройство;
- 4 – испаритель;
- 5 – охлаждаемое помещение;
- 6 – абсорбер;
- 7 – дроссельный вентиль;
- 8 – циркуляционный насос;
- 9 – теплообменник.