

ФБГОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»  
Кафедра двигателей внутреннего сгорания



# «Теплотехника»

**Часть 2**

**Термодинамические основы  
работы тепловых машин**

составлен

кандидатом технических наук, доцентом

**Ивным**

**Александром Андреевичем**

в соответствии с действующим государственным  
образовательным стандартом ВО

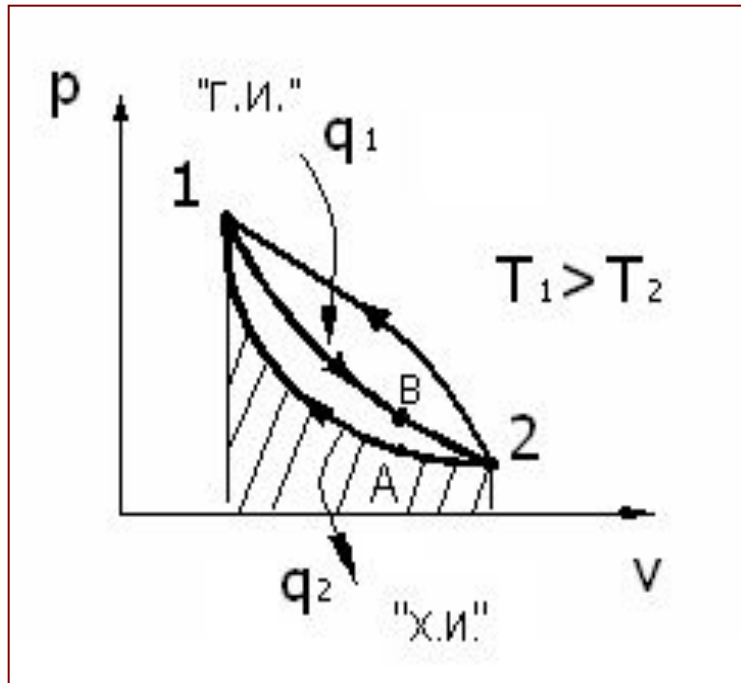
**Ярославль, 2013-2016**

## Схема энергопотоков в тепловом двигателе



Тепловой двигатель предназначен для получения в процессе теплопередачи механической энергии и совершения работы.

# Термодинамические основы и условия работы тепловых двигателей



Процесс 1-в-2:  $l_{расш} = \int_1^2 p \cdot dv$

Процесс 2-а-1:  $l_{сж} = \int_2^1 p \cdot dv$

$$l_{расш} - |l_{сж}| = l_{ч}; \quad l_{ч} > 0$$

$$q_{\odot} = q_1 - |q_2|$$

$$q_{\odot} = l_{\odot}$$

$$q_1 = l_{\odot} + q_2$$

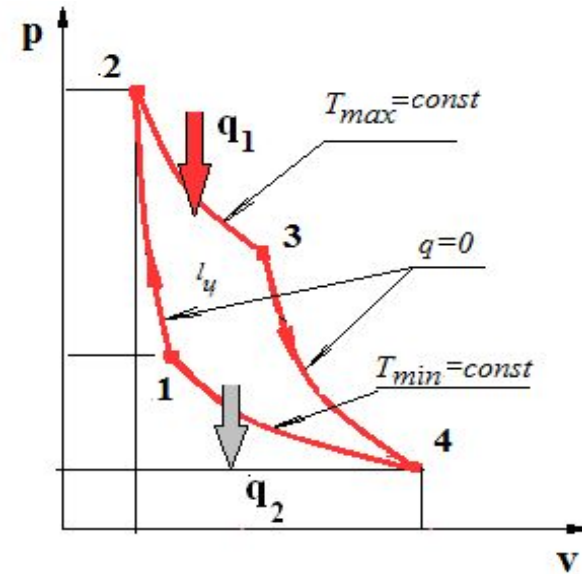
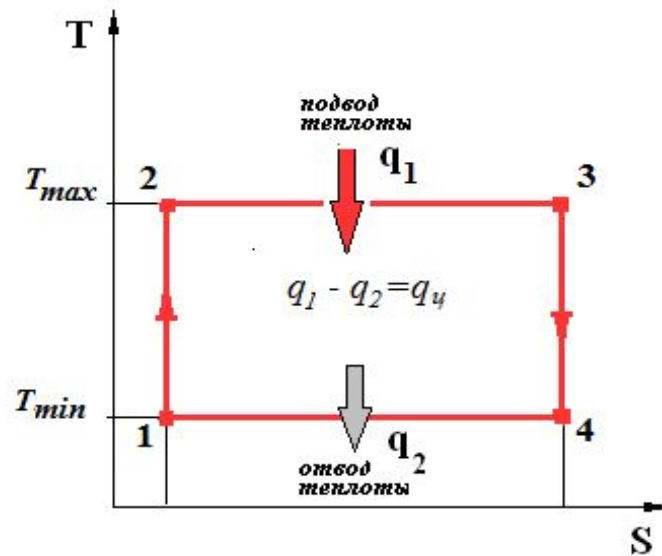
# Цикл Карно



- *«Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется ТЕМПЕРАТУРАМИ тел, между которыми производится перенос теплорода»*

*С.Карно 1824 г.*

# Прямой обратимый цикл Карно



$$\eta_{t_k} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

- 1-2 – сжатие без теплообмена
- 2-3 – изотермическое расширение
- 3-4 – расширение без теплообмена
- 4-1 – изотермическое сжатие

## Показатели термодинамического цикла

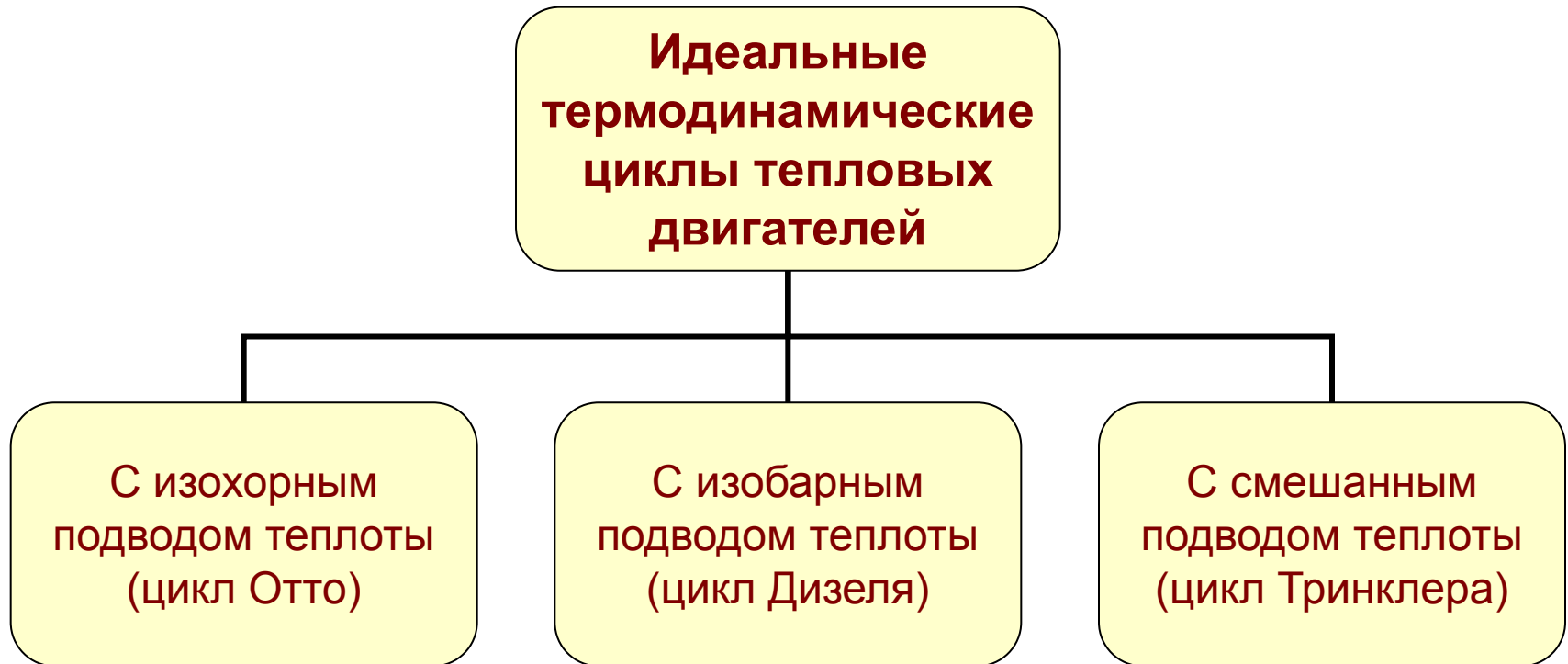
Термический КПД- показатель  
эффективности  
использования теплоты  
термодинамического цикла

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

Среднее давление-  
показатель  
**работоспособности**  
термодинамического цикла

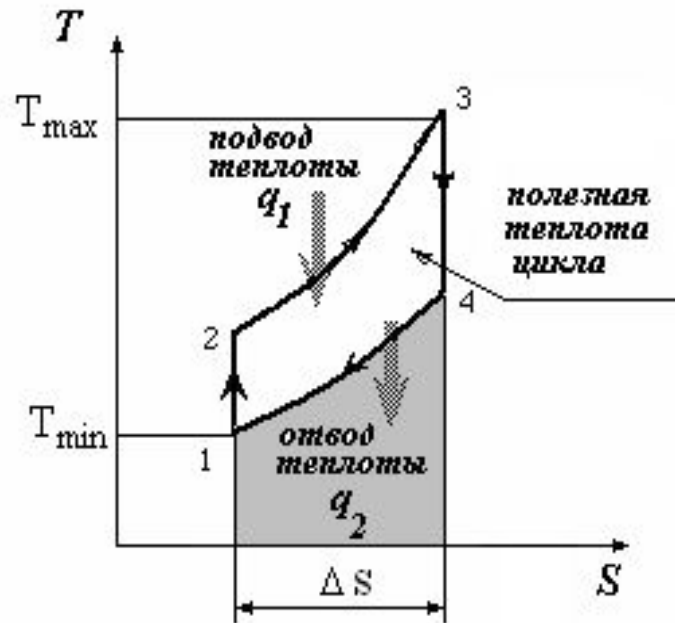
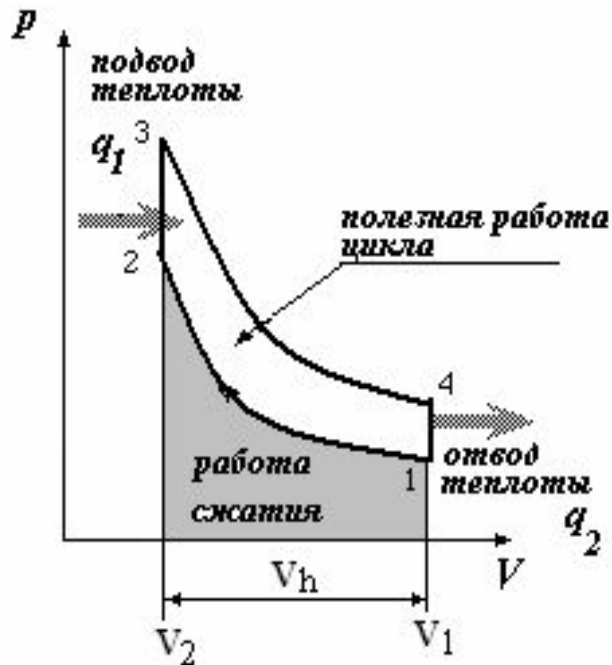
$$p_t = \frac{l_{ц}}{\Delta v}$$

# Классификация идеальных термодинамических циклов поршневых двигателей



# Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

## Идеальный цикл поршневого ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто)



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

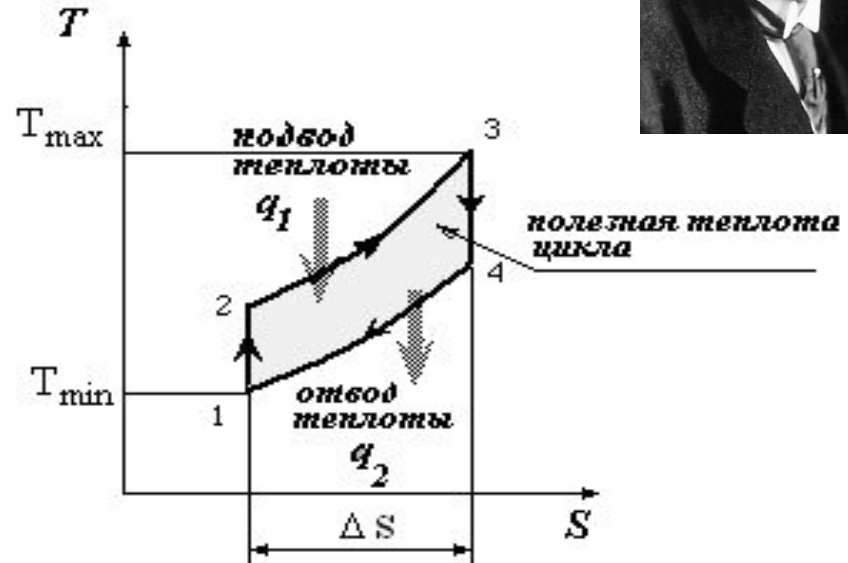
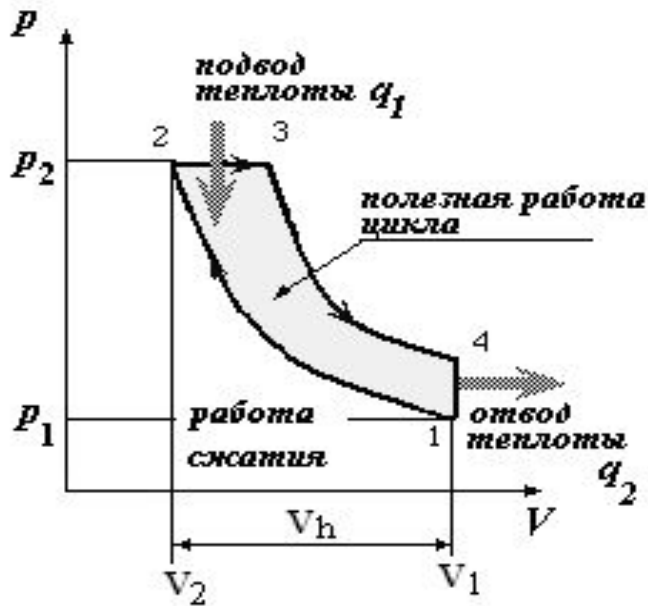
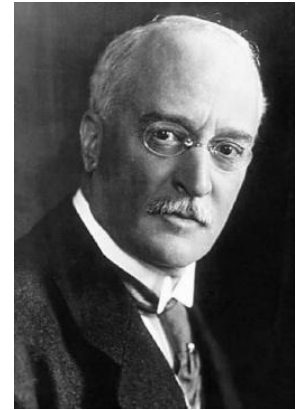
$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

$$\lambda = 1 + \frac{q_1}{c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}}$$

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

# Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

## Идеальный цикл поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)



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

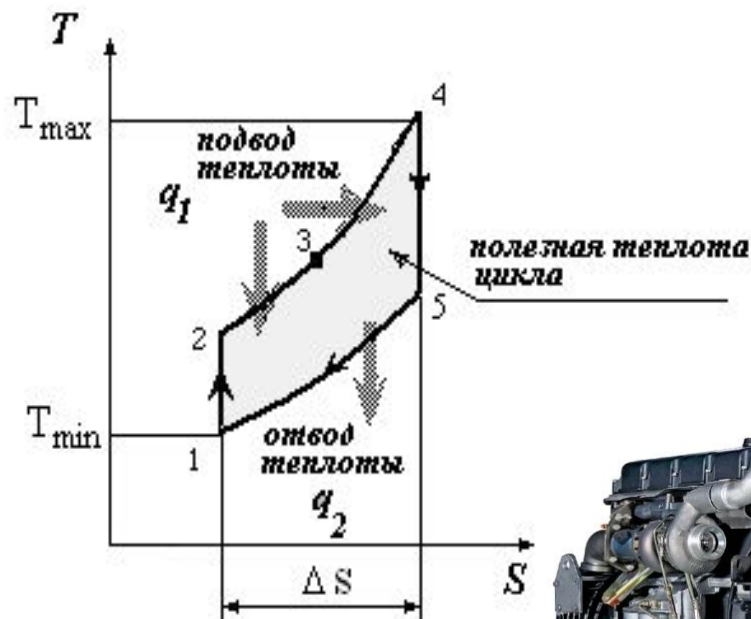
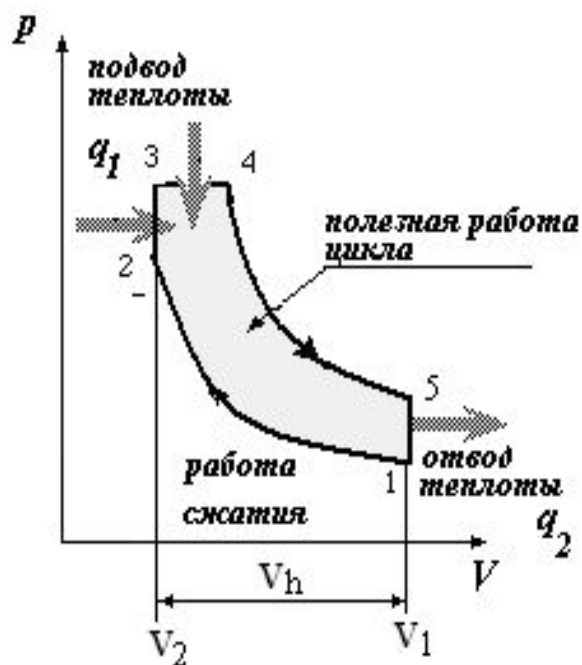
$$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

$$\rho = 1 + \frac{q_1}{c_p \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}}$$

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

# Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

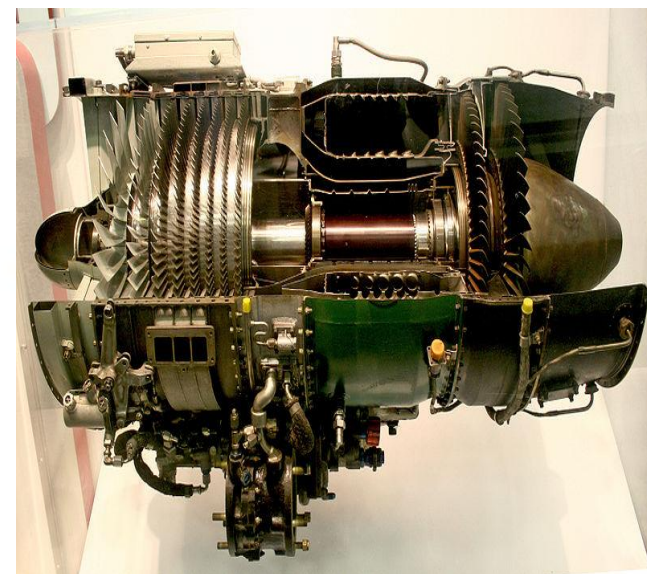
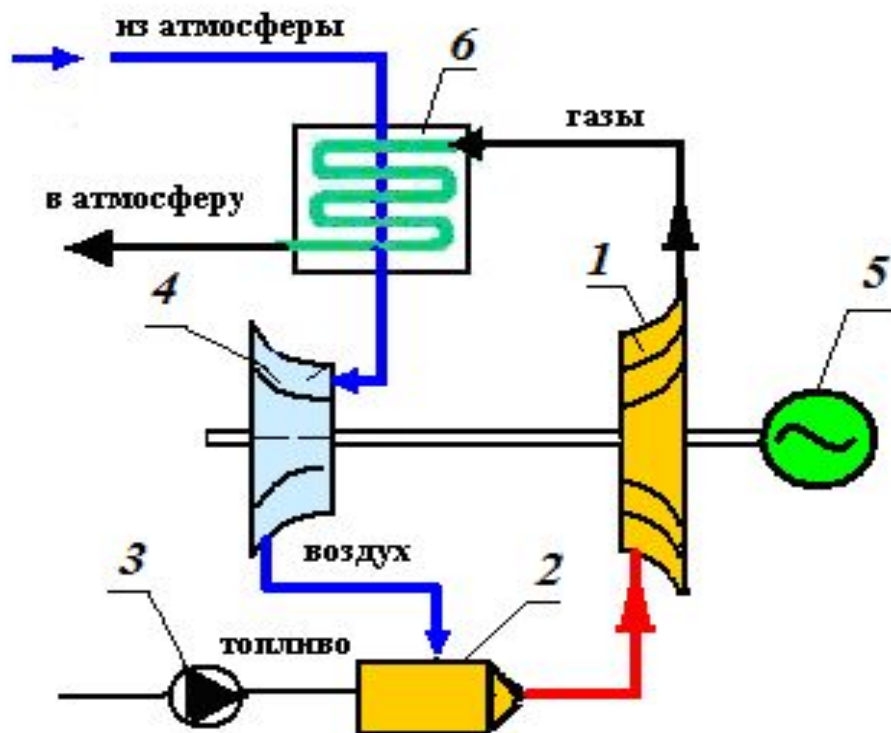
## Идеальный цикл поршневого ДВС - цикл Г.В.Тринклера



$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad \lambda = \frac{p_3}{p_2} = f(q_1') \quad \rho = \frac{v_4}{v_3} = f(q_1'') \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}$$

# Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

## Принципиальная схема газотурбинной установки

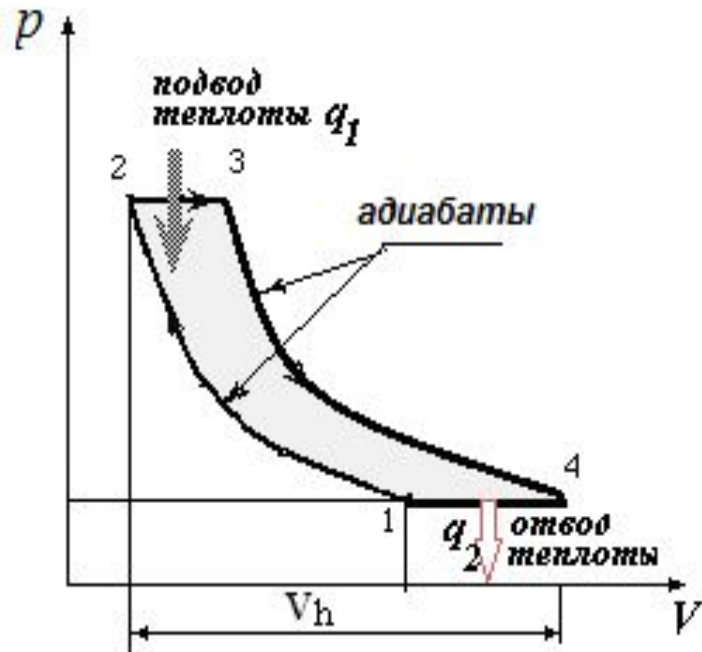


Принципиальная схема газотурбинной установки:

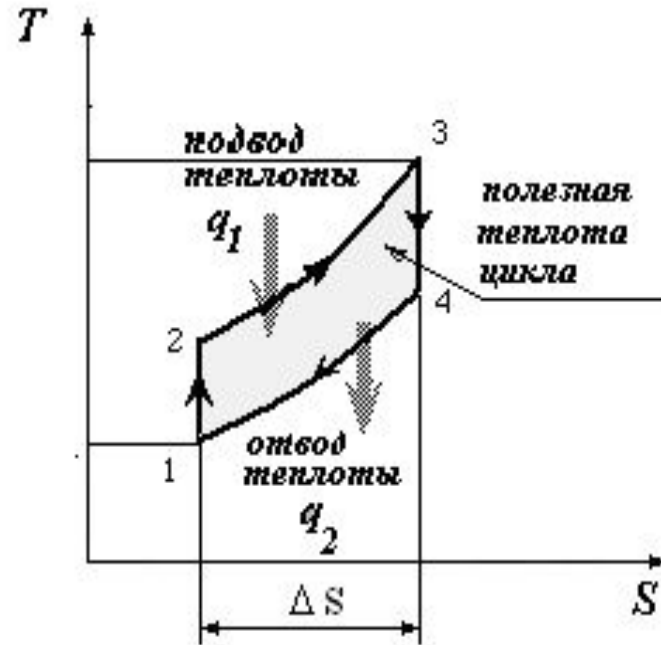
1.- турбина, 2. - камера сгорания, 3. - топливный насос, 4. – компрессор, 5. - вал отбора мощности, 6. - регенератор (подогреватель воздуха).

# Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

## Идеальный цикл газотурбинной установки (Брайтона)

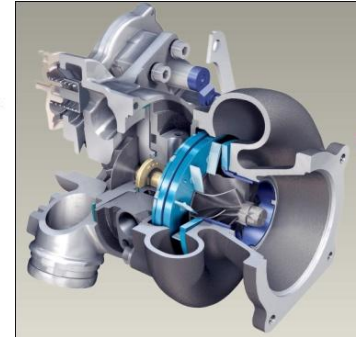
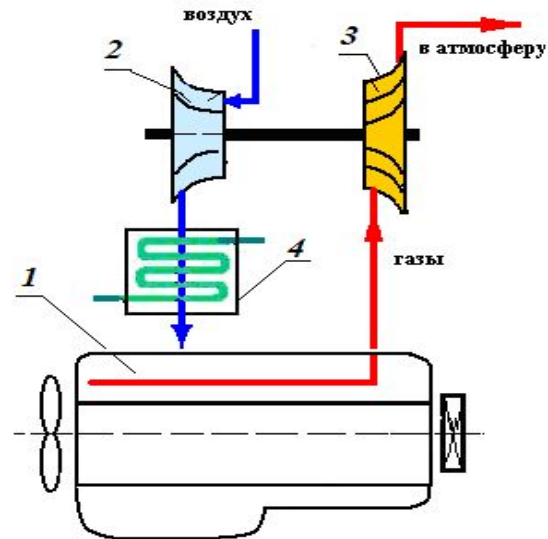
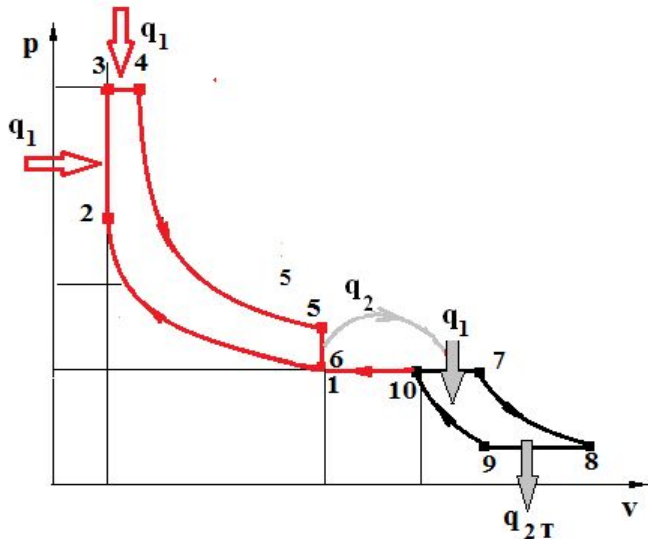


$$\pi_{\kappa} = \frac{p_1}{p_2}$$



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi_{\kappa}^{\frac{k-1}{k}}}$$

## Идеальный цикл комбинированного двигателя



Термодинамический цикл:

1-2-3-4-5 - цикл Тринклера;

7-8-9-10 - цикл ГТУ:

6-7—подвод теплоты к турбине;

7-8—адиабатное расширение;

8-9—изобарный отвод тепла;

9-10—адиабатное сжатие в компрессоре;

10-1—охлаждение надувочного воздуха.

Принципиальная схема :

1-поршневой двигатель, 2-компрессор,  
3-турбина, 4-охладитель надувочного  
воздуха.

# Термодинамические обратные циклы

## *Содержание раздела:*

Термодинамические обратные циклы, условия для работы холодильных машин

Холодопроизводительность, холодильный и отопительный коэффициенты

Идеальный воздушный обратный цикл

# Схема энергопотоков в холодильной установке



Получение «холода» в технике и быту обычно связывают с процессом отвода теплоты от охлаждаемого тела – «холодного источника». *Холодильными машинами* принято называть комплекс агрегатов, устройств, в которых реализуется обратный термодинамический цикл и предназначенный для передачи теплоты от «холодного» источника «горячему».

# Термодинамические основы и условия работы холодильных установок



Холодильные установки, в которых полезным эффектом считается теплота, отводимая от «холодного» источника, а «горячим» источником является окружающая среда, называются *рефрижераторами*.

Установки, в которых полезным эффектом считается теплота, отдаваемая горячему источнику, а холодным источником является окружающая среда, называются *тепловыми насосами*.

# Холодильные установки

## Рефрижераторы

## «Тепловые насосы»



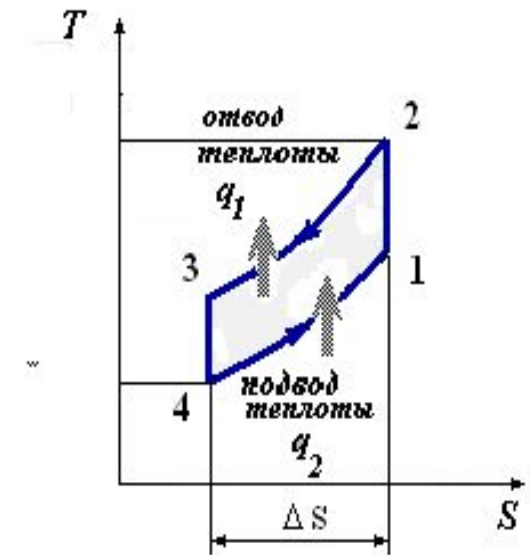
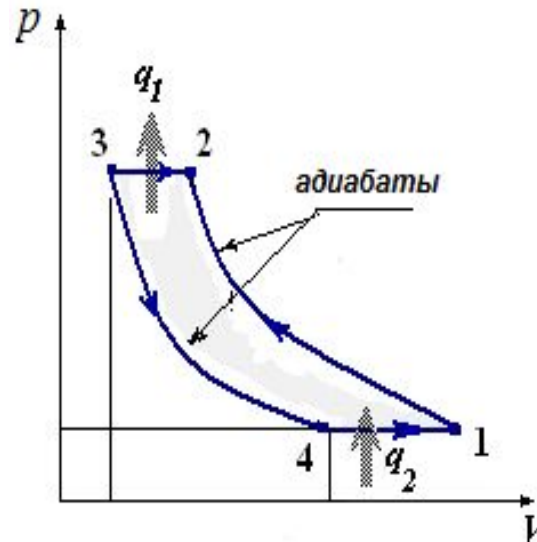
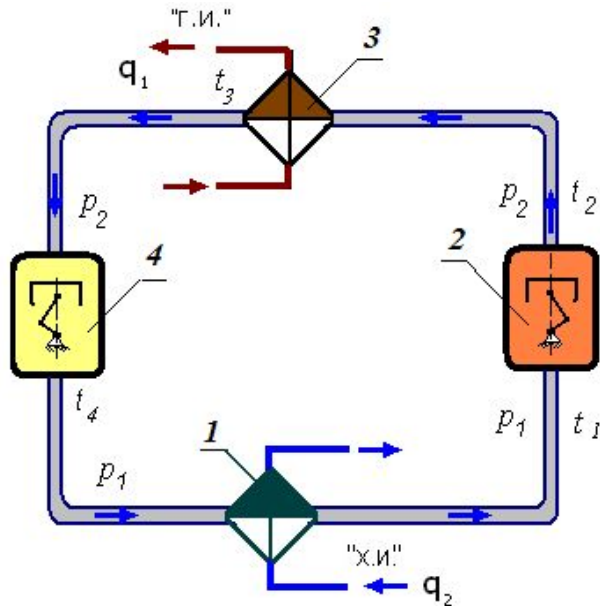
$$\xi_x = \frac{q_2}{|l_y|} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2}$$

*Холодильный коэффициент*

$$\xi_o = \frac{q_1}{|l_o|} = \frac{q_1}{|q_1| - q_2}$$

*Отопительный коэффициент*

## Обратный обратимый воздушный термодинамический цикл (воздушная компрессионная холодильная установка)



Принципиальная схема  
воздушной компрессионной  
холодильной установки:

- 1-холодильная камера  
(теплообменник-1);
- 2-компрессор;
- 3-теплообменник-2;
- 4-расширительная машина

Холодильный коэффициент

$$\xi_x = \frac{q_2}{|l_{\circ}|} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

# Термодинамические основы работы компрессора



## *Содержание раздела:*

Показатели работы.

Процессы сжатия

Многоступенчатые компрессоры.

Понятие об адиабатическом КПД  
центробежного компрессора.

**Компрессор – механическое устройство, предназначенное для сжатия газов и перемещения их по трубопроводам.**

# Классификация компрессоров по принципу действия



# Термодинамические основы работы компрессора

**Требования к работе компрессора:**

**Показатели работы компрессора:**

степень повышения давления

$$\pi_{\kappa} = \frac{P_2}{P_1}$$

«техническая» работа

$$L_K = - \int_1^2 V \cdot dp$$

температура в конце сжатия

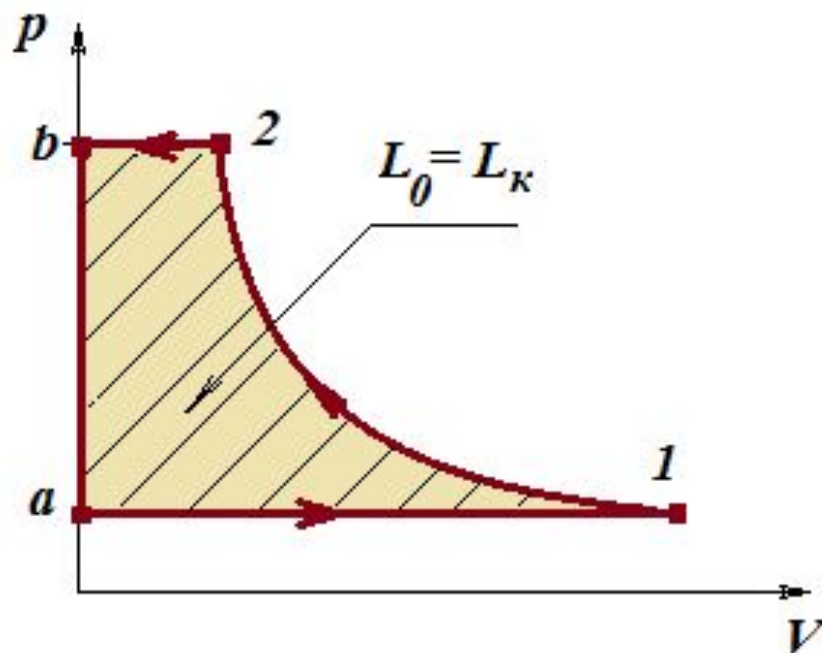
$$T_2 = T_1 \cdot (\pi_{\kappa})^{\frac{k-1}{k}}$$

техническая работа компрессора должна быть возможно меньшей;

- температура после сжатия ограничена условиями смазки.

## Термодинамические основы работы компрессора

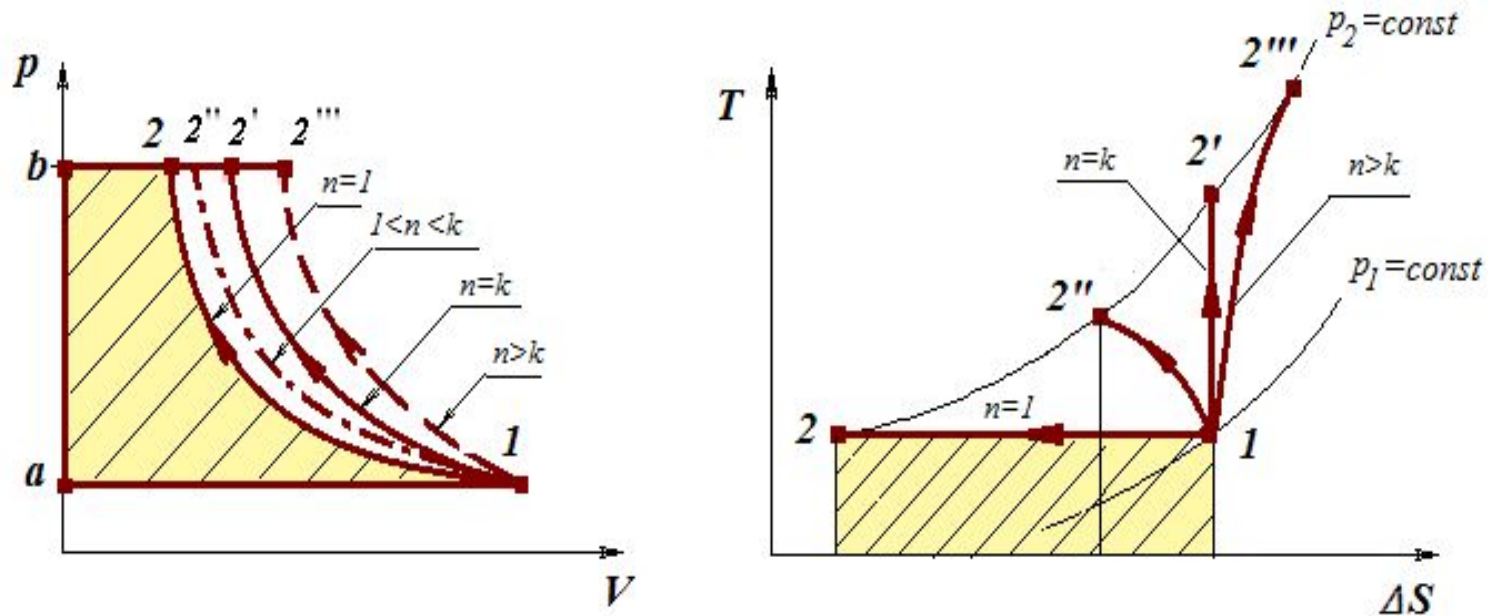
Рабочий цикл  
одноступенчатого компрессора



$a-1$  – наполнение рабочего объема;  
 $1-2$  – сжатие (в точке 2 открывается нагнетательный клапан);  
 $2-b$  – нагнетание.

# Термодинамические основы работы компрессора

## Процессы сжатия в компрессоре



1-2 – изотермический процесс;  
1-2' – адиабатическое сжатие;  
1-2'' – политропное сжатие.

Вывод:

применение изотермического сжатия является энергетически более выгодным!

## Расчет удельной технической работы компрессора

При изотермическом сжатии:

$$l_K = l_0 = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = -R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = -R \cdot T \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}$$

При адиабатическом сжатии идеального газа:

$$l_{\hat{E}} = -\frac{k \cdot R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

$$l_{\hat{E}} = -\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

При политропном сжатии идеального газа:

$$l_{\hat{E}} = -\frac{n \cdot R}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

$$l_{\hat{E}} = -\frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

## Термодинамические основы работы компрессора

### Расчет удельного количества теплоты в компрессоре

При изотермическом сжатии:

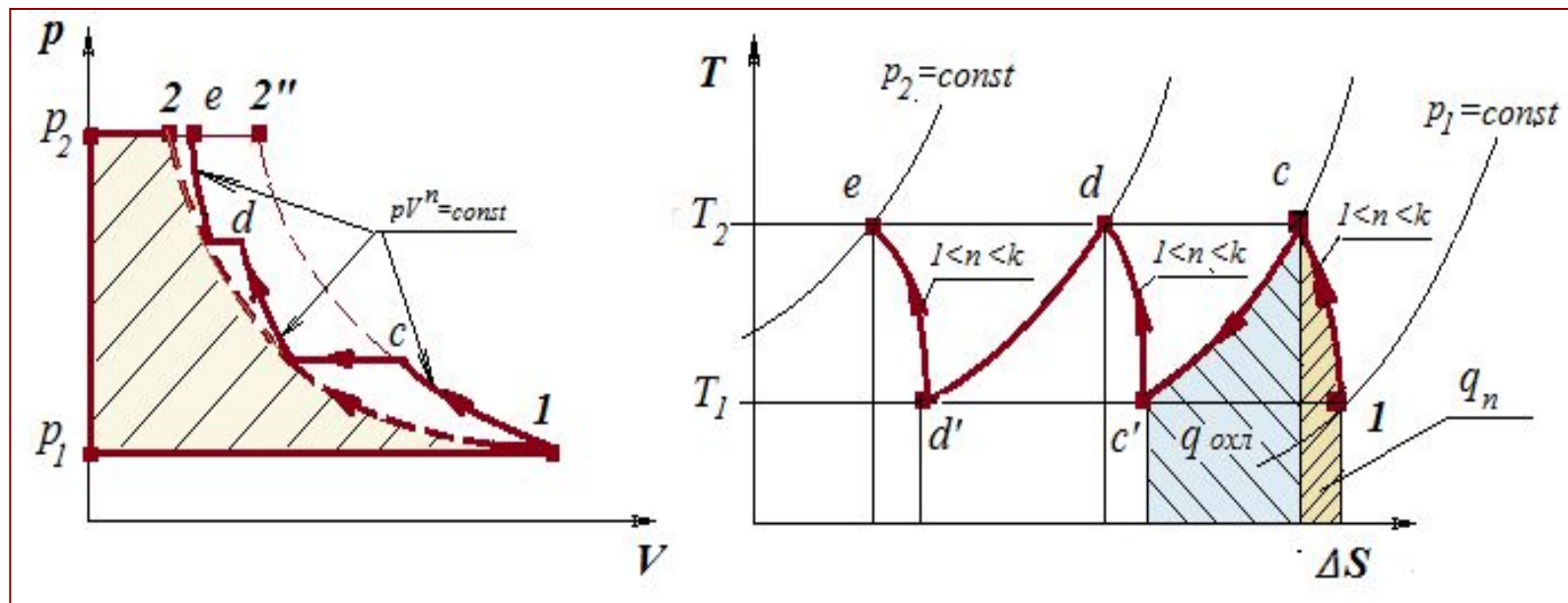
$$q = -R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

При политропном сжатии:

$$q = c \cdot \Delta T = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

# Термодинамические основы работы компрессора

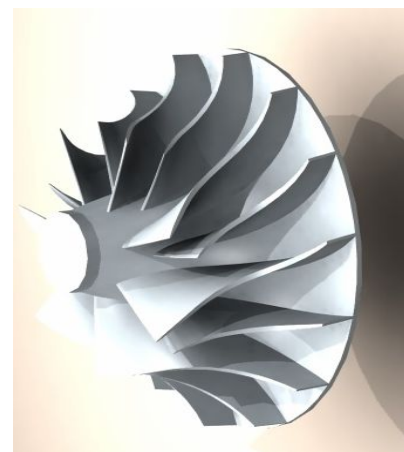
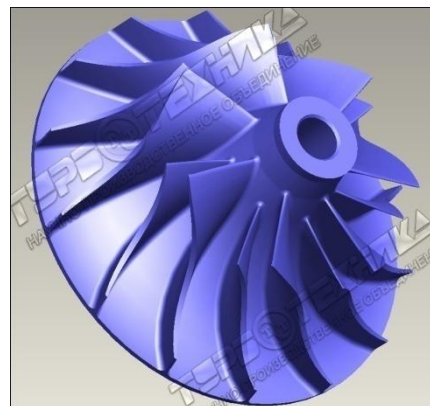
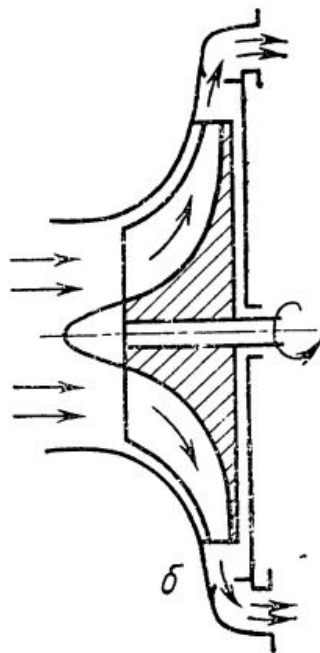
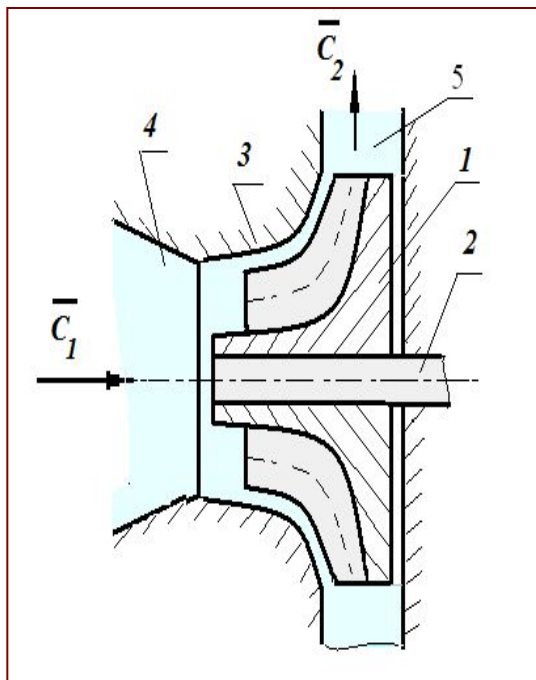
## Процессы в многоступенчатом компрессоре



Процессы сжатия в 3-х ступенчатом компрессоре:  
1-2''-политропное сжатие; 1-3 – процесс сжатия в 1-м цилиндре  
с-с'-изобарное охлаждение в 1-м теплообменнике;  
с'-d -процесс сжатия во 2-м цилиндре;  
d-d'- изобарное охлаждение в 2-м теплообменнике;  
d'-e - процесс сжатия во 3-м цилиндре.

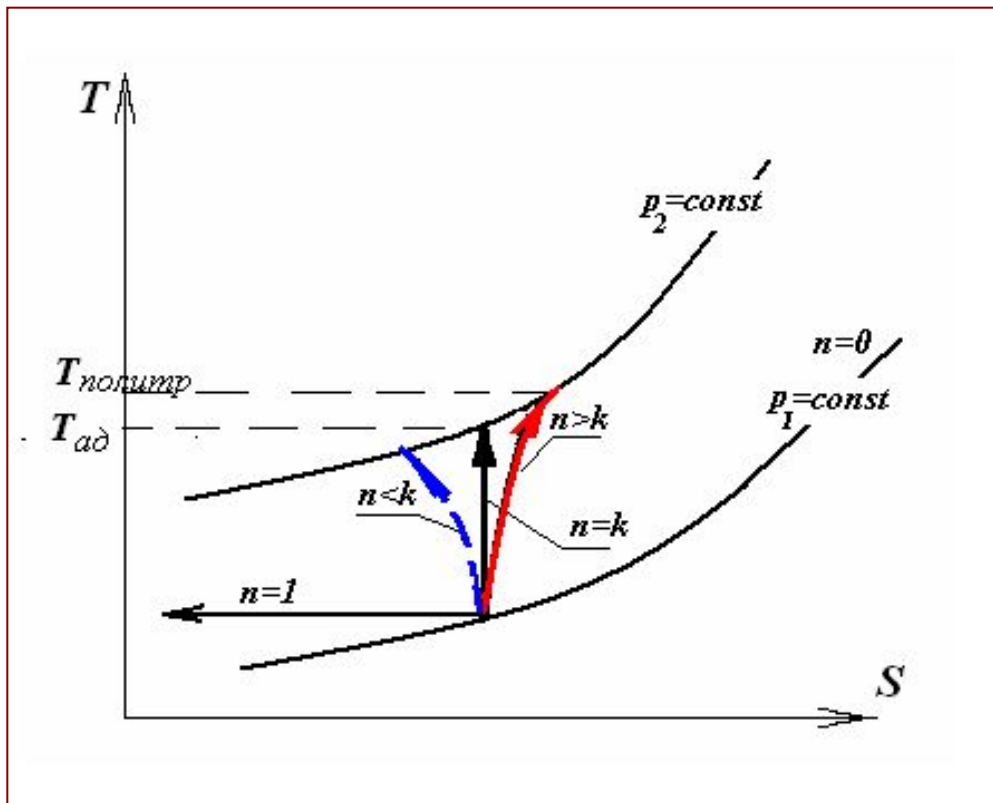
# Термодинамические основы работы компрессора

## Устройство и работа центробежного компрессора



## Термодинамические основы работы компрессора

### Процессы в центробежном компрессоре (нагнетателе)



$$\eta_{\text{ад}}^{\kappa} = \frac{l_{\text{ад}}}{l_{\text{политр}}}$$

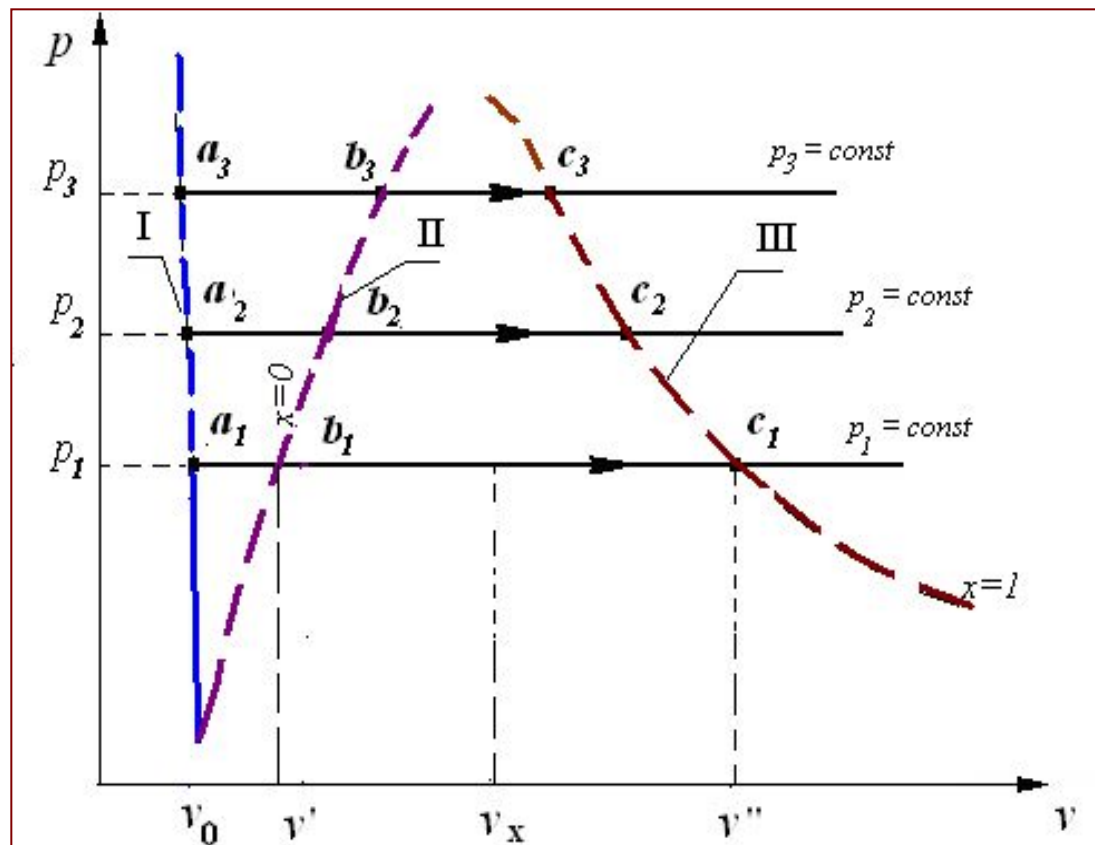
Адиабатический КПД для  
центробежных  
нагнетателей **0,7—0,8.**

## Водяной пар.

### Диаграммы состояния водяного пара.

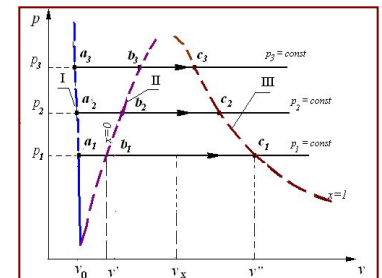
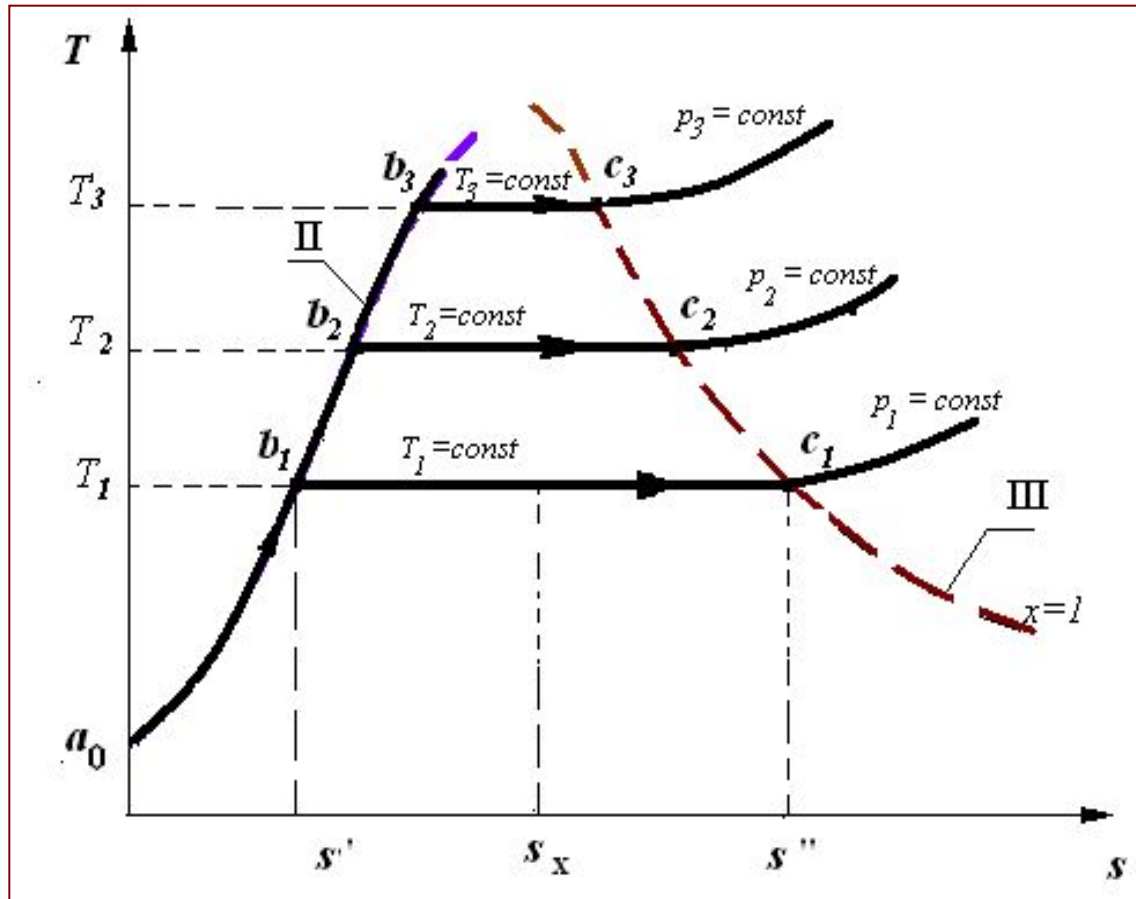
Пар - это реальный газ, способный в условиях применения переходить в жидкость.

$p, v$ -диаграмма состояния водяного пара

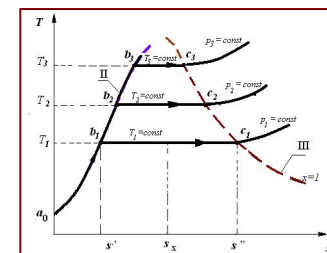
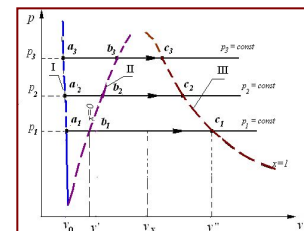
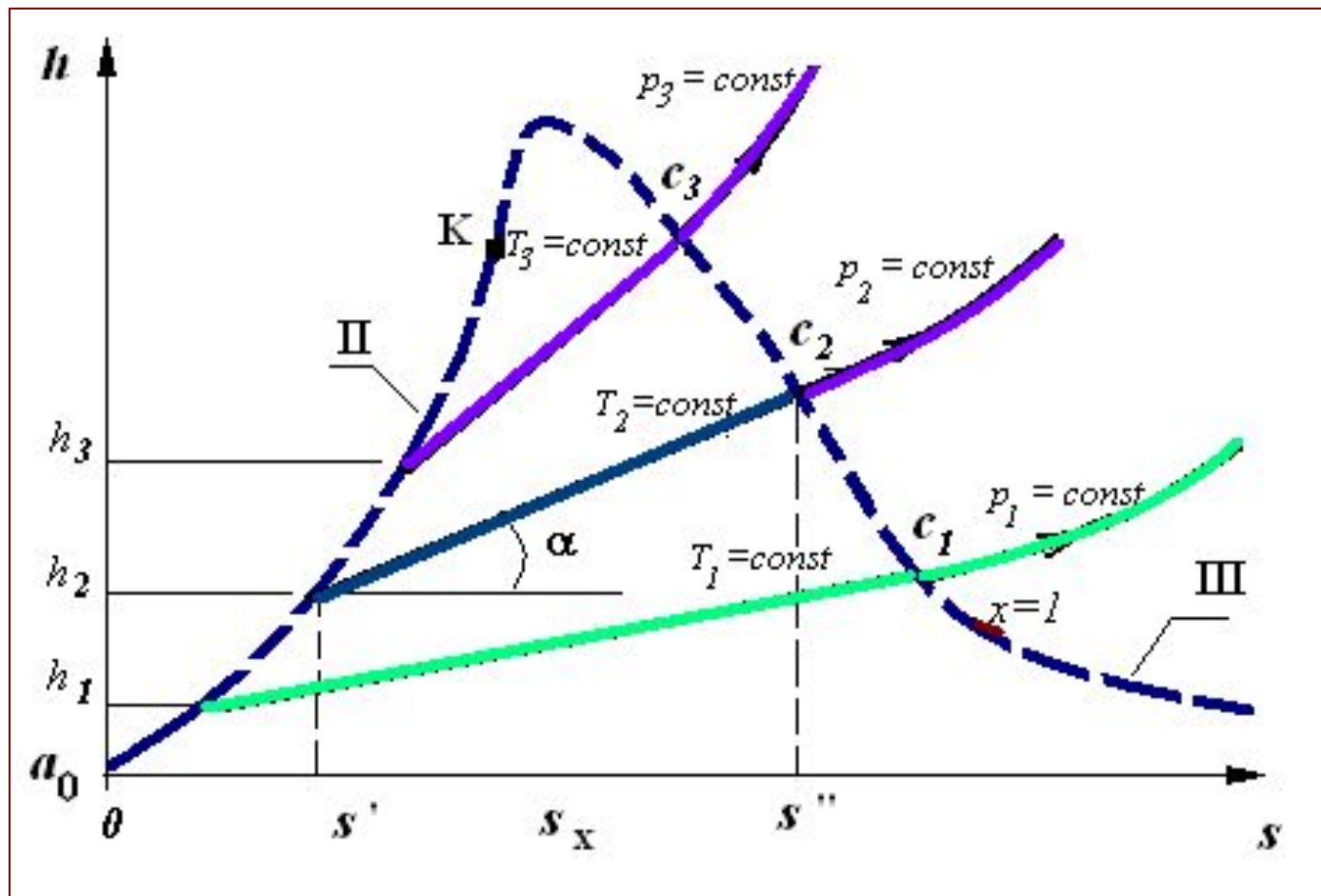


# Водяной пар

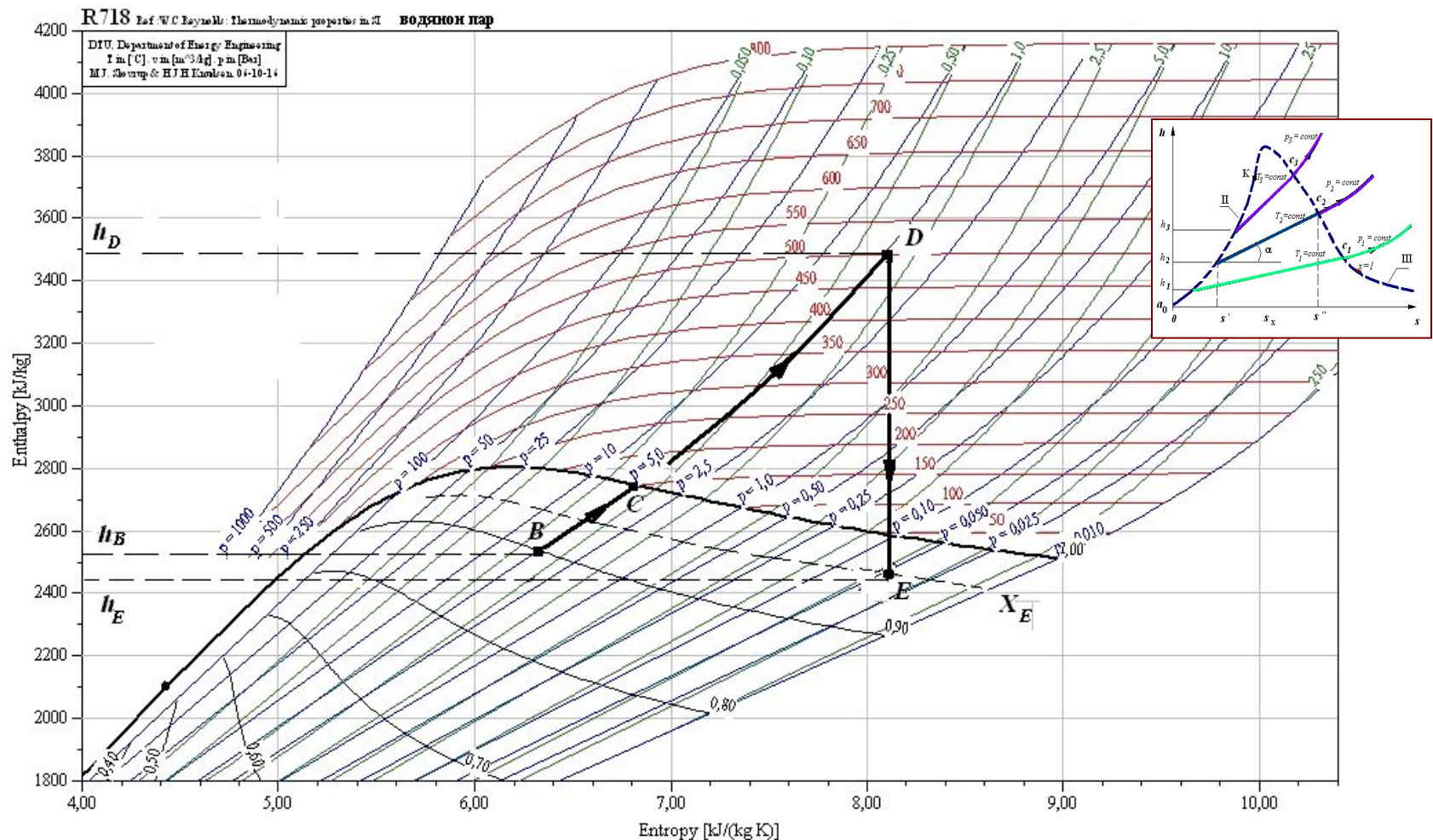
## $T,s$ -диаграмма состояния водяного пара



## h,d-диаграмма состояния водяного пара



# Процессы с водяным паром на $h, s$ -диаграмме.

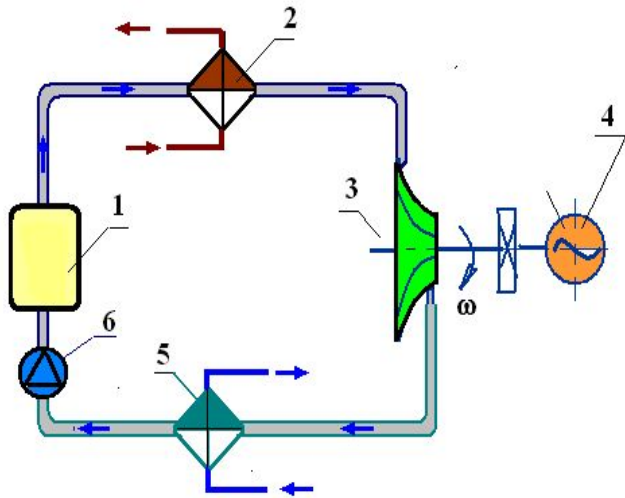


В-С – переход пара из влажного состояния в сухой насыщенный;

С-Д–получение перегретого пара при постоянном давлении;

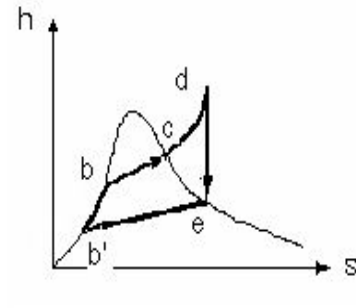
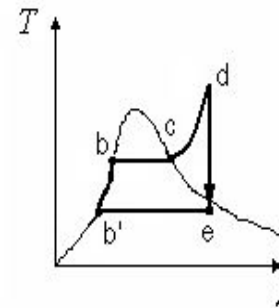
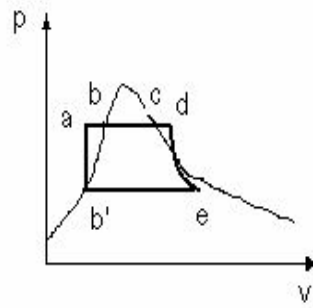
Д-Е-адиабатическое расширение пара с переходом во влажное состояние.

# Паротурбинные установки



Принципиальная схема паротурбинной установки:

- 1 - парогенератор;
- 2 - пароперегреватель;
- 3 - турбина;
- 4 - генератор;
- 5 - конденсатор;
- 6 - жидкостный насос



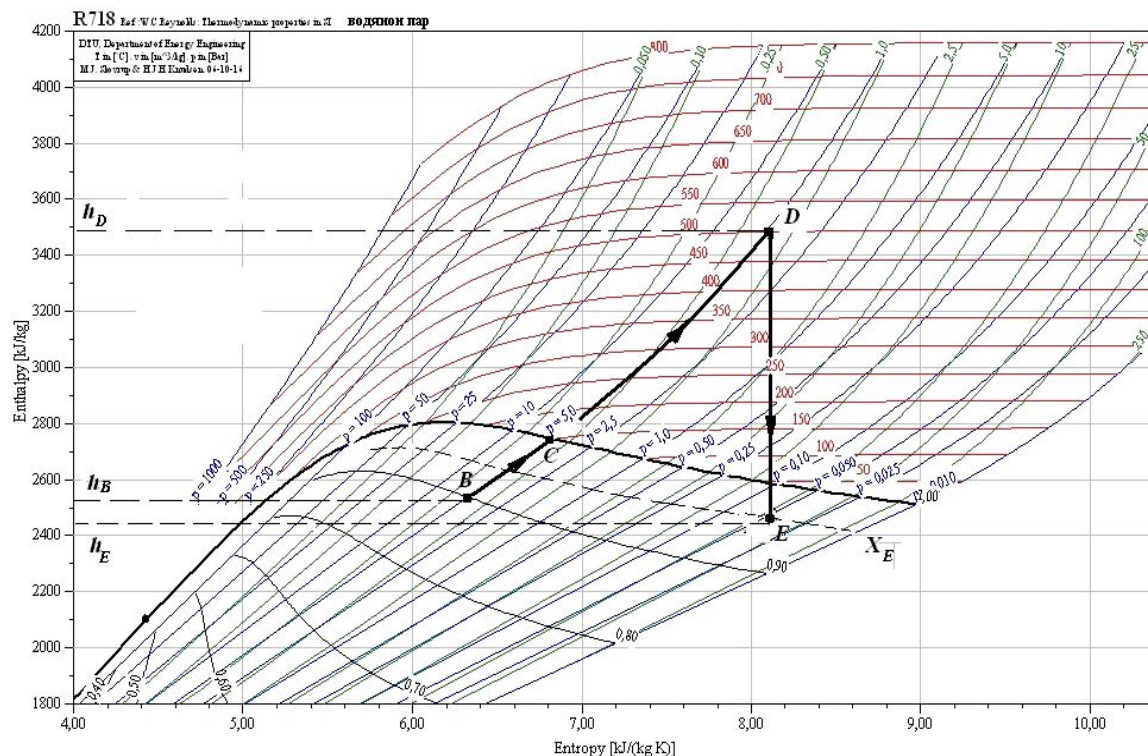
Цикл Ренкина паротурбинной установки на перегретом паре:

- a-b – подогрев воды до кипения;
- b-c - парообразование;
- c-d – перегрев пара;
- d-e – адиабатическое расширение в турбине;
- e-b' - полная конденсация;
- b'-a – перекачивание воды в насосе.

$$\eta = \frac{l_{\partial}}{q_1}$$

$$\eta_t = \frac{h_d - h_{b'} - h_d + h_{d'}}{h_d - h_{b'}} = \frac{h_d - h_e}{h_d - h_{b'}}$$

# Процессы цикла Ренкина на Н,d-диаграмме



Количество теплоты, подводимое в пароперегревателе:

$$q = h_d - h_b$$

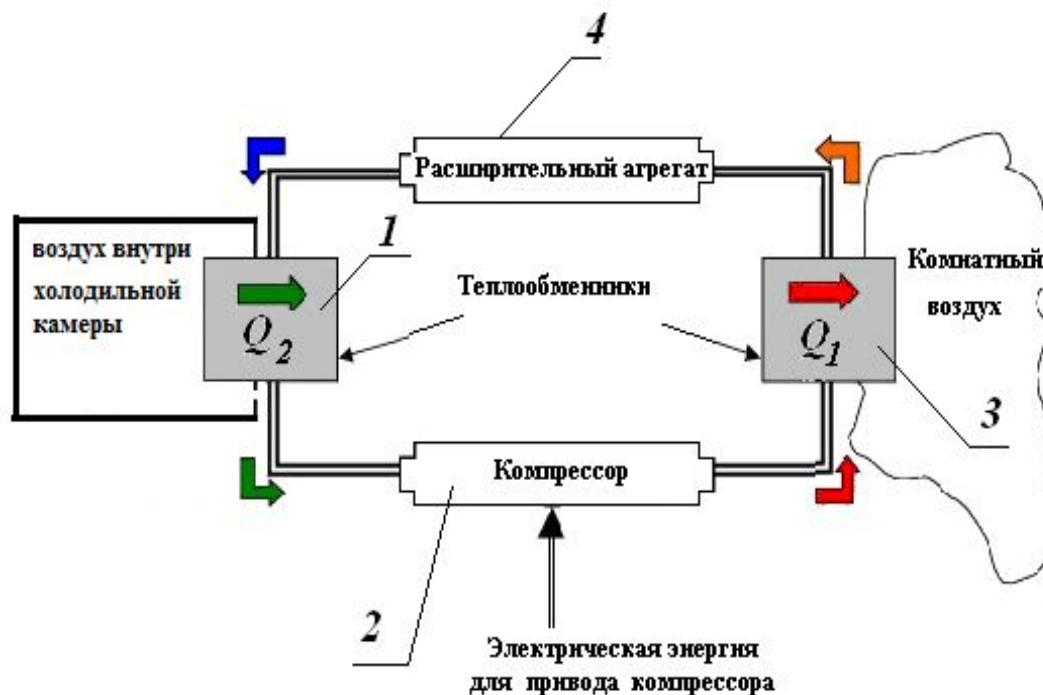
Располагаемая работа пара в турбине:

$$l_o = h_d - h_e$$

Коэффициент полезного действия турбины:

$$\eta = \frac{l_o}{h_d}$$

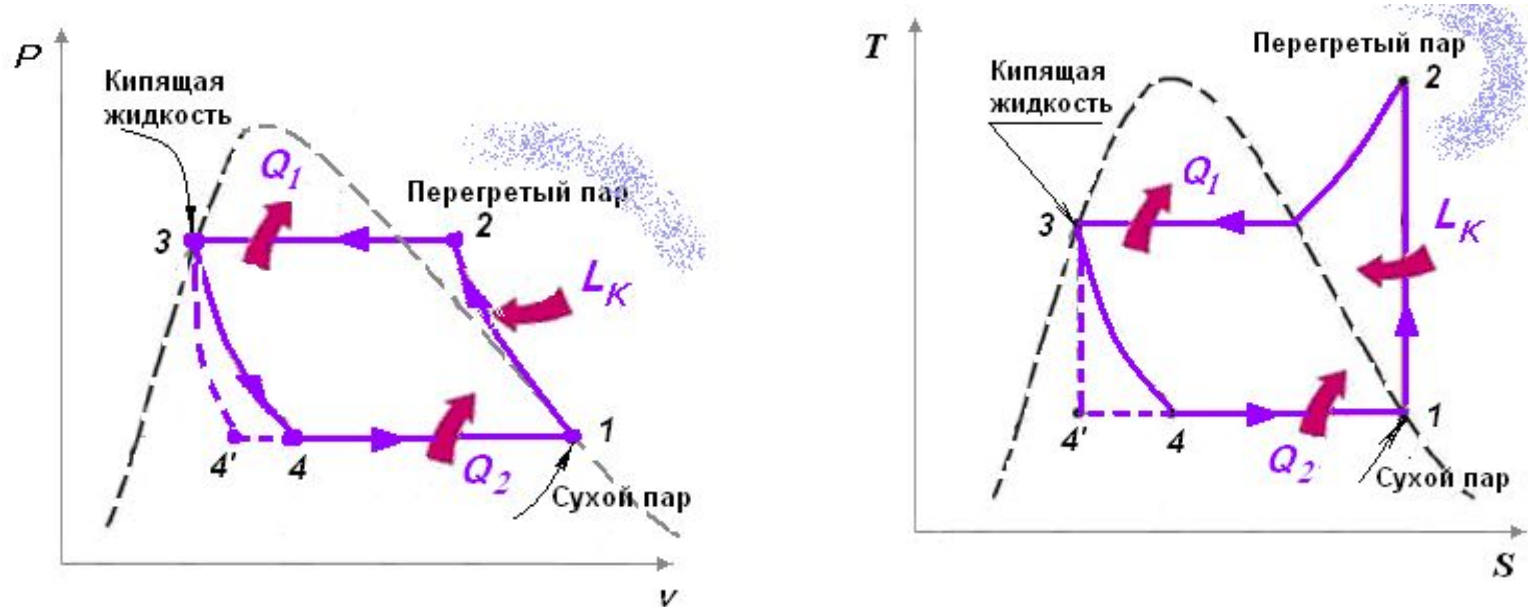
# Парокомпрессионные холодильные установки



**Принципиальная схема и элементы паровой компрессионной холодильной установки:**

- 1- теплообменник-испаритель;
- 2- компрессор;
- 3-теплообменник-конденсатор;
- 4-расширительный агрегат (дроссельный вентиль или машина-детандер)

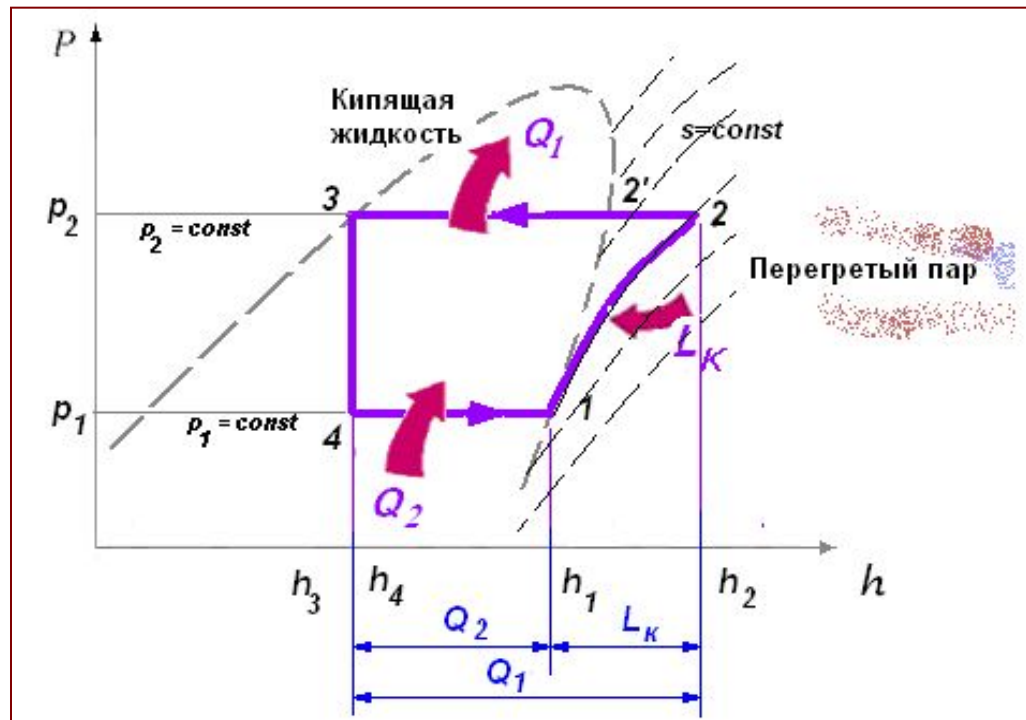
# Парокомпрессионные холодильные установки



**Термодинамический цикл холодильной установки в  $p, v$  и  $T, s$  диаграммах:**

- 1-2 – адиабатическое сжатие сухого пара до состояния перегретого,
- 2-3 – отвод теплоты при изобарном охлаждении перегретого пара и последующей полной конденсации;
- 3-4 – расширение адиабатическое (или изоэнтальпное);
- 4-1 – кипение жидкости за счет подвода теплоты от «холодного источника».

# Парокомпрессионные холодильные установки



$$q_2 = h_1 - h_5$$

$$l_k = h_2 - h_1$$

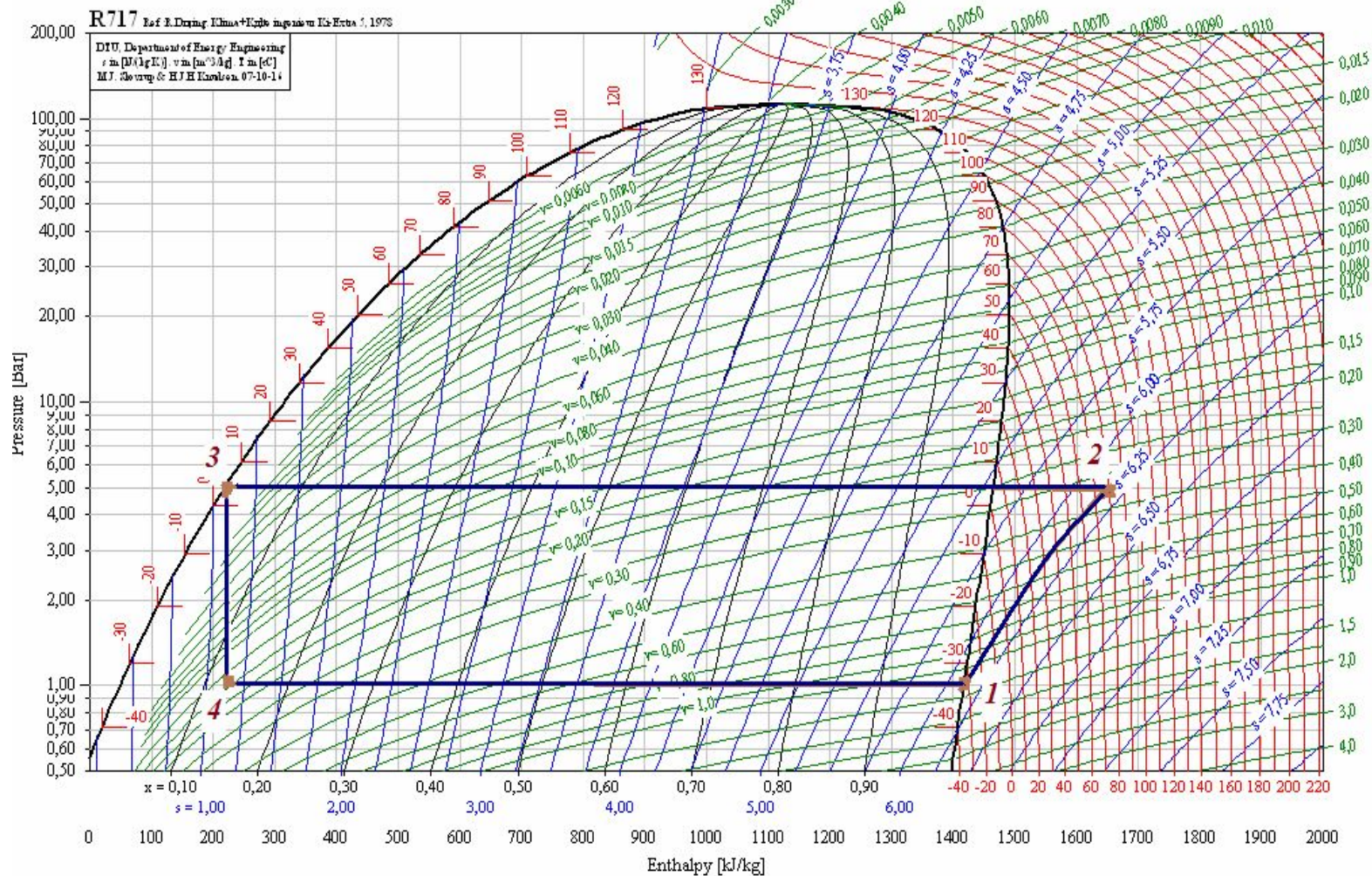
$$q_1 = h_2 - h_3$$

$$\xi_x = \frac{q_2}{l_o}$$

**Термодинамический цикл холодильной установки в p,h диаграмме:**

- 1-2 – адиабатическое сжатие сухого пара до состояния перегретого,
- 2-3 – отвод теплоты при изобарном охлаждении перегретого пара и последующей полной конденсации;
- 3-4 – расширение адиабатическое (или изоэнтальпное);
- 4-1 – кипение жидкости за счет подвода теплоты от «холодного источника».

# Термодинамический цикл холодильной установки в $p,h$ -диаграмме:



## Свойства холодильных агентов

| Холодильный агент                                                                                      | Обозначение | Теплота парообразования при $t_s$ ,<br>$r$ ,<br>кДж/кг | Температура насыщения $t_s$ , °C при $p=0,1$ МПа | Давление насыщения $p_s$ , МПа при температуре: |        |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|-------|
|                                                                                                        |             |                                                        |                                                  | 15 °C                                           | -10 °C | 55 °C |
| Аммиак, $\text{NH}_3$                                                                                  | R717        | 1370*                                                  | -33,4                                            | 0,728                                           | 0,291  | 2,31  |
| Углекислота, $\text{CO}_2$                                                                             | R744        | 350**                                                  | -78,5                                            | 5,08                                            | 2,64   | -     |
| Хлористый метил $\text{CH}_3\text{Cl}$                                                                 | R-40        |                                                        | -23,7                                            | 0,42                                            | 0,175  |       |
| Дифтордихлорметан, $\text{CF}_2\text{Cl}_2$                                                            | R-12        | 166*                                                   | -30,6                                            | 0,49                                            | 0,22   | 1,37  |
| Дифтормонохлорметан, $\text{CHF}_2\text{Cl}$                                                           | R-22        | 233*                                                   | -40,85                                           | 0,79                                            | 0,355  | 2,17  |
| Тетрафторэтан $\text{CF}_3\text{CFH}_2$ ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ )                           | R-134a      | 214,5*                                                 | -26,2                                            | 0,49                                            | 0,20   | 1,49  |
| Дифтормонохлорэтан ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_2\text{Cl}_2$ ), $\text{CH}_3\text{F}_2\text{Cl}^*$ | R-142       |                                                        | -9,25                                            | 0,25                                            | 0,0997 | 0,8   |
| Пропан, $\text{C}_3\text{H}_8$                                                                         | R-290       | 424                                                    | -42,17                                           | 0,72                                            | 0,34   | 1,9   |