

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

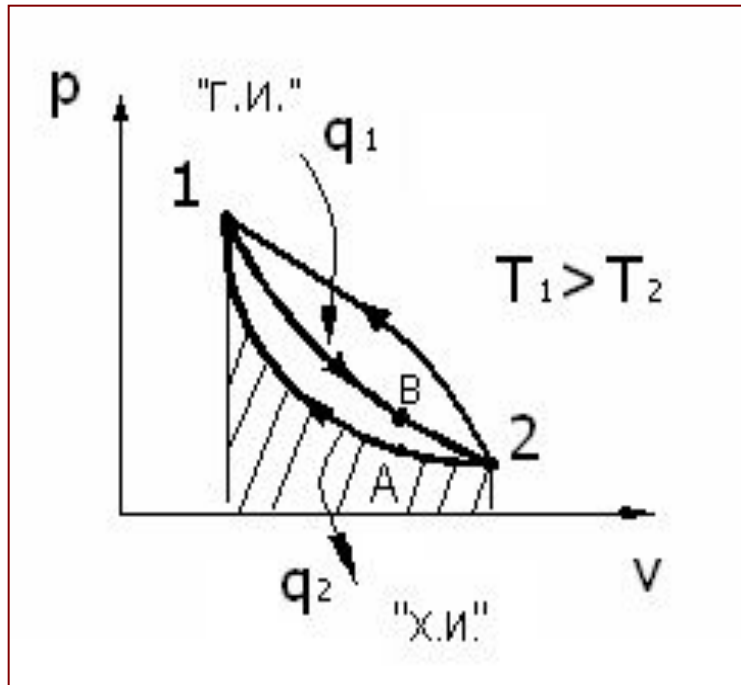
Ярославль, 2013-2016

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: $l_{сжс} = \int_2^1 p \cdot dv$

$$l_{расш} - |l_{сжс}| = l_{ц}; \quad l_{ц} > 0$$

$$q_{\dot{o}} = q_1 - |q_2|$$

$$q_{\dot{o}} = l_{\dot{o}}$$

$$q_1 = l_{\dot{o}} + q_2$$

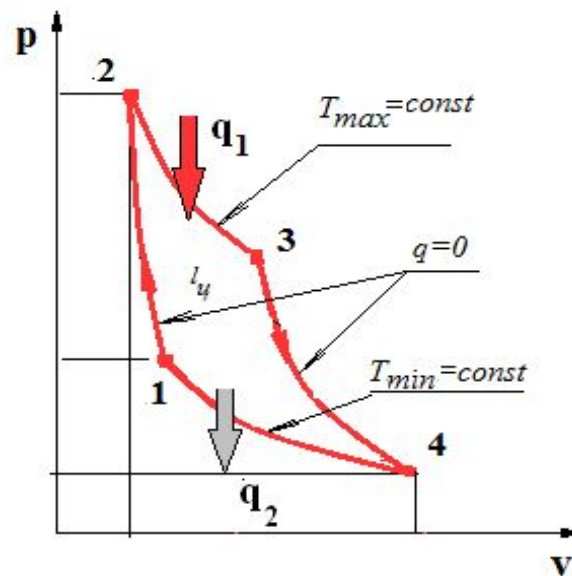
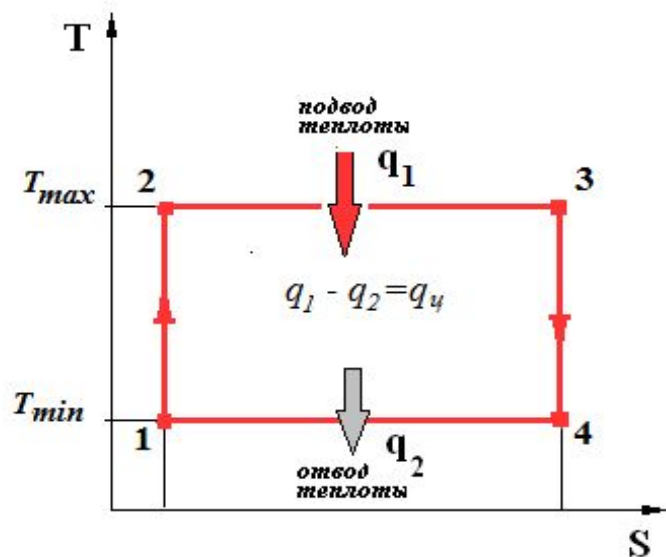
Цикл Карно



- *«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

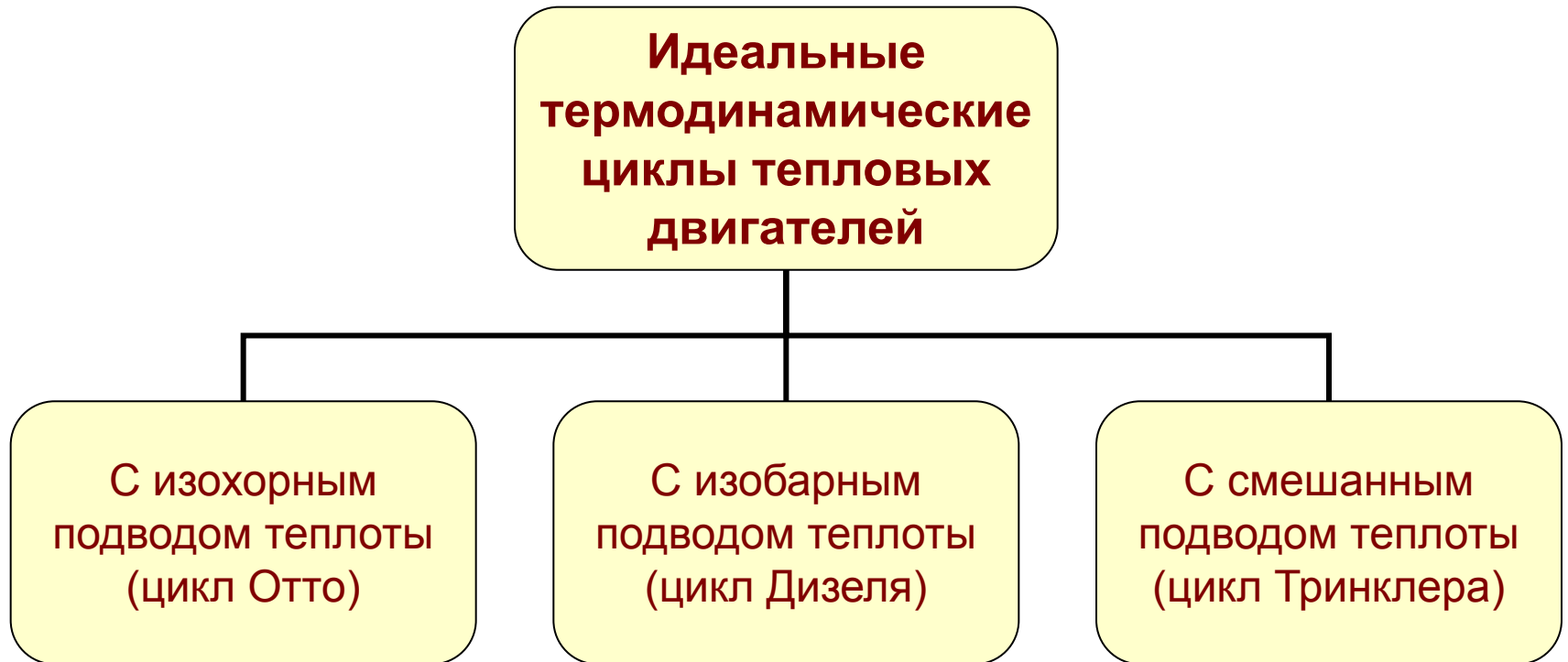
Термический КПД- показатель
эффективности
использования теплоты
термодинамического цикла

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

Среднее давление-
показатель
работоспособности
термодинамического цикла

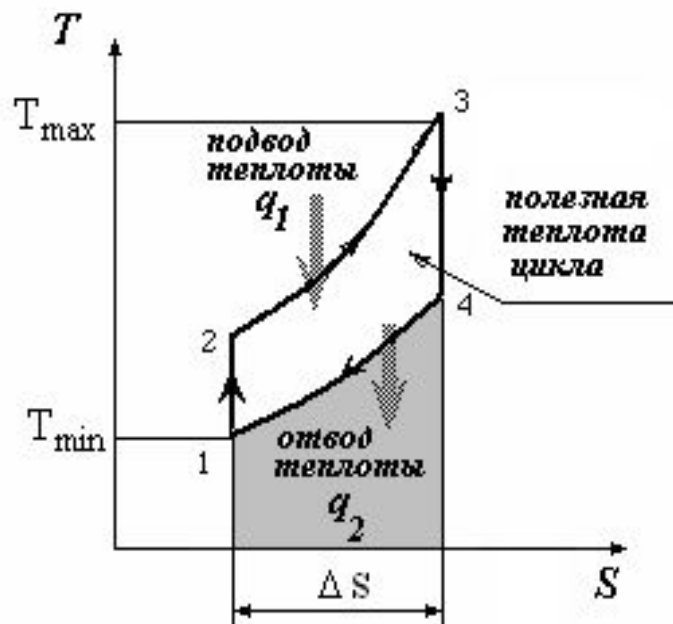
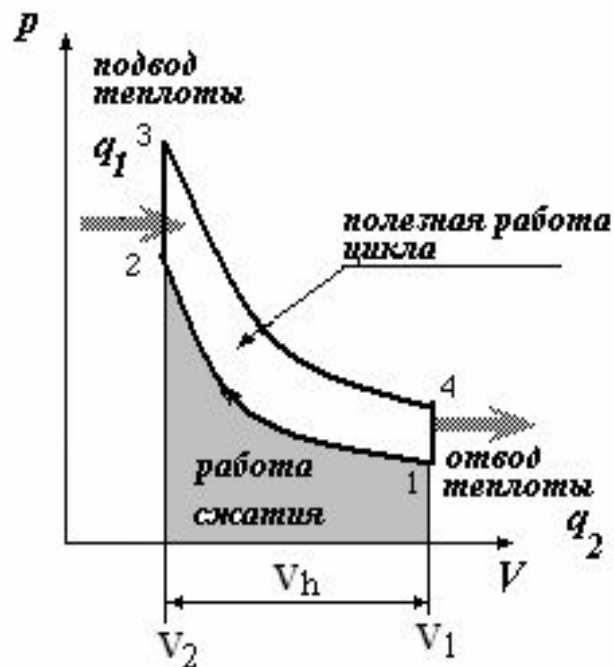
$$p_t = \frac{l_{\text{ц}}}{\Delta v}$$

Классификация идеальных термодинамических циклов поршневых двигателей



Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

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



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

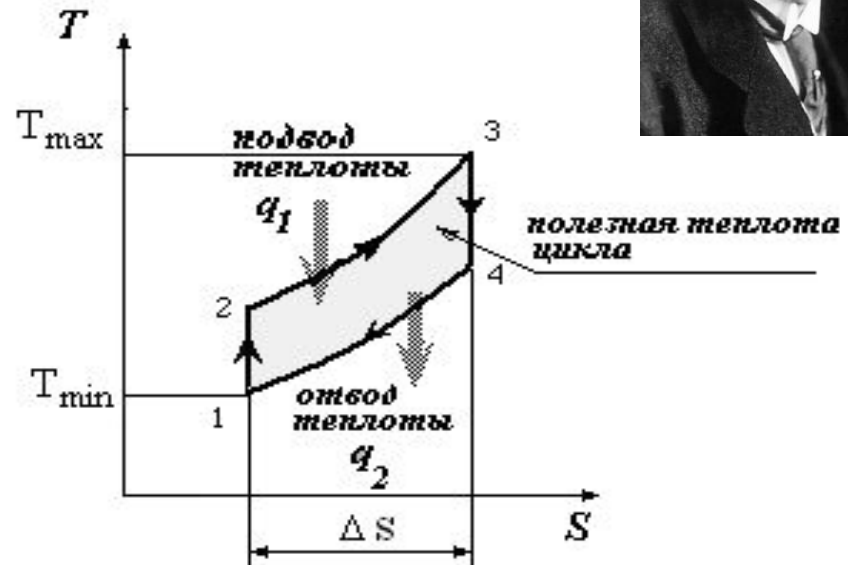
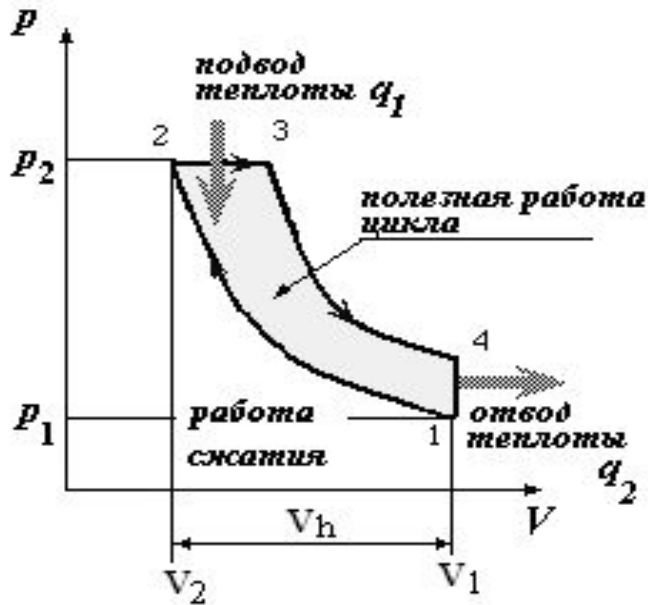
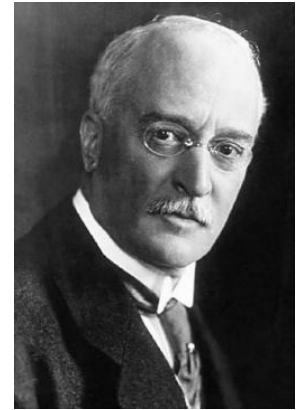
$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

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

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

Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

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



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

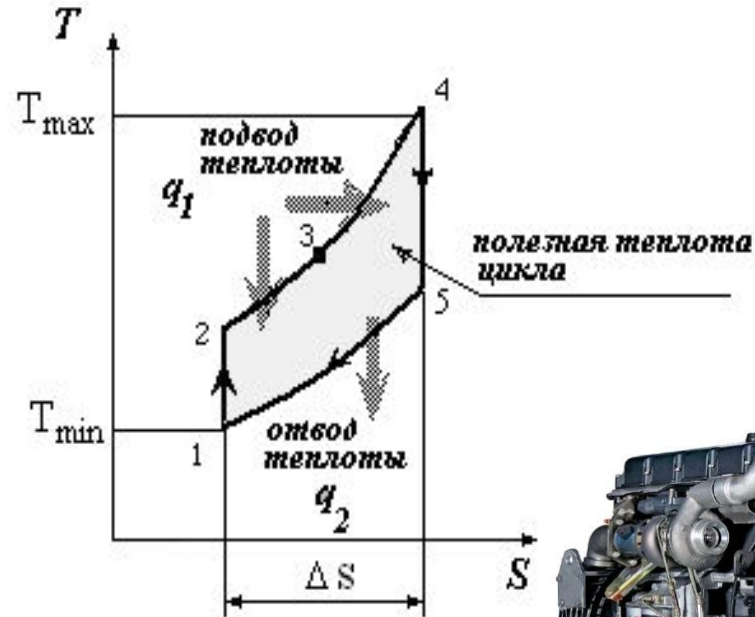
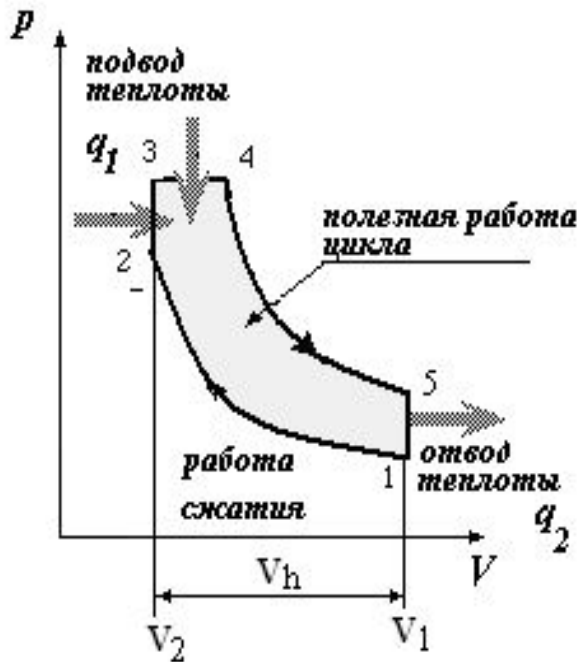
$$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

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

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

Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

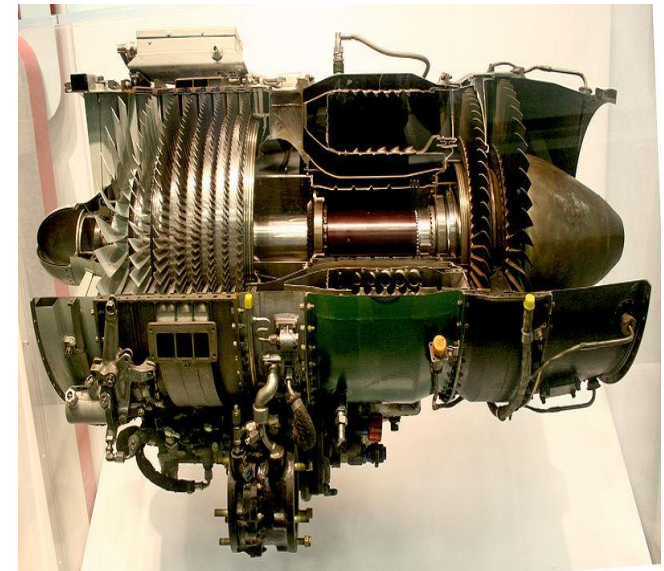
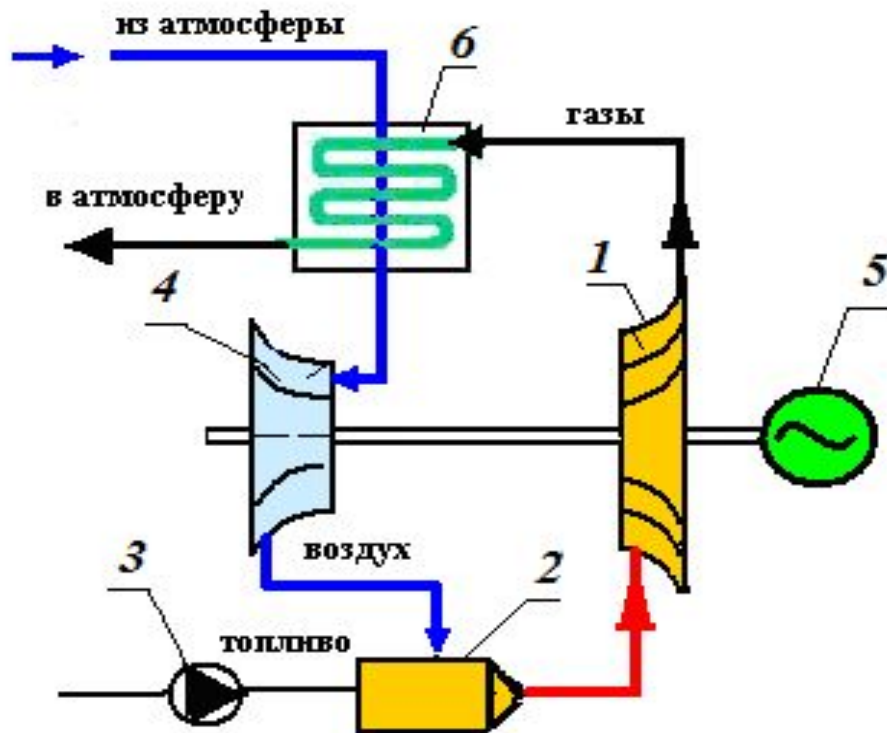
Идеальный цикл поршневого ДВС - цикл Г.В.Тринклера



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

Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

Принципиальная схема газотурбинной установки

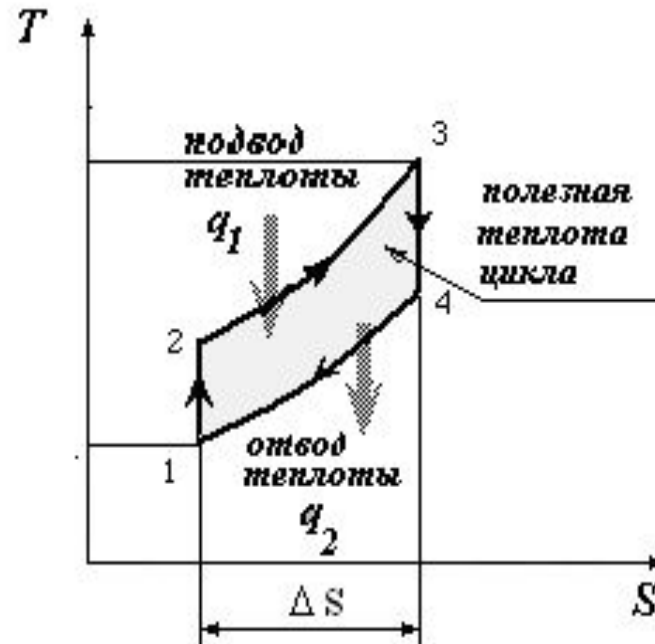
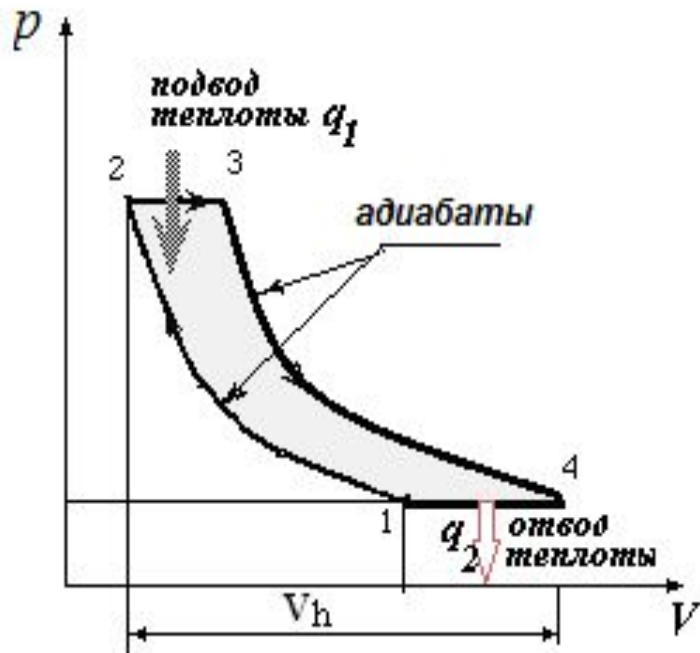


Принципиальная схема газотурбинной установки:

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

Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

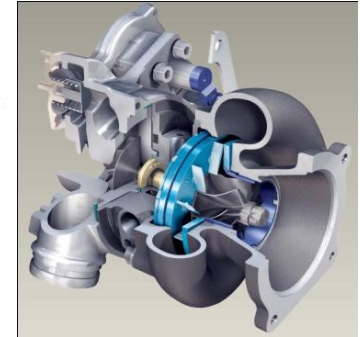
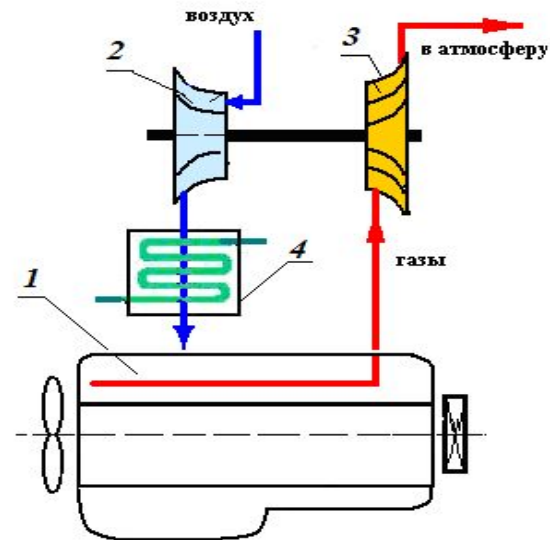
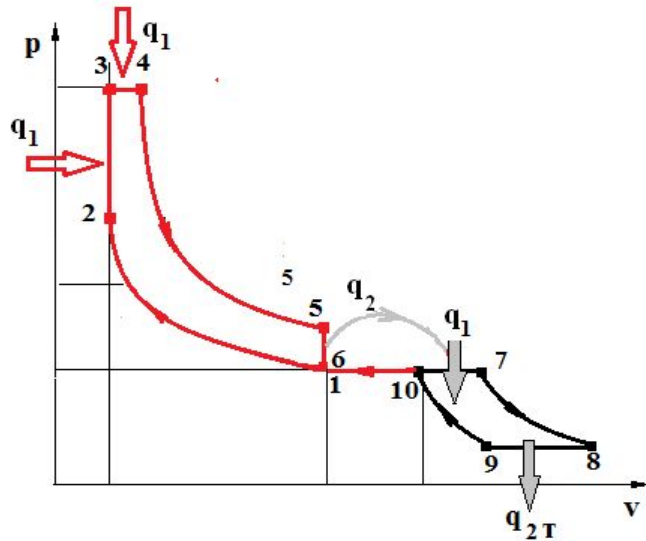
Идеальный цикл газотурбинной установки (Брайтона)



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

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

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»



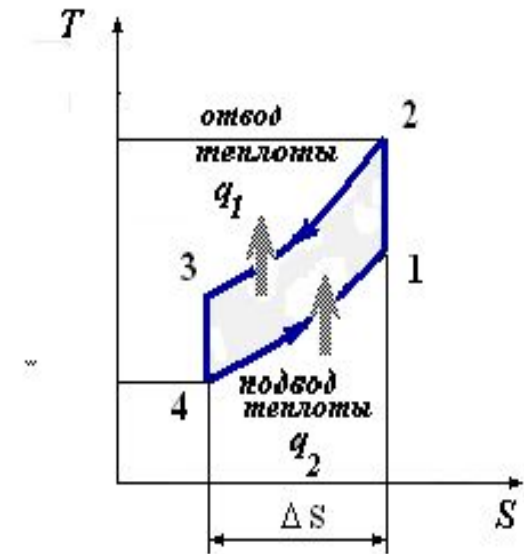
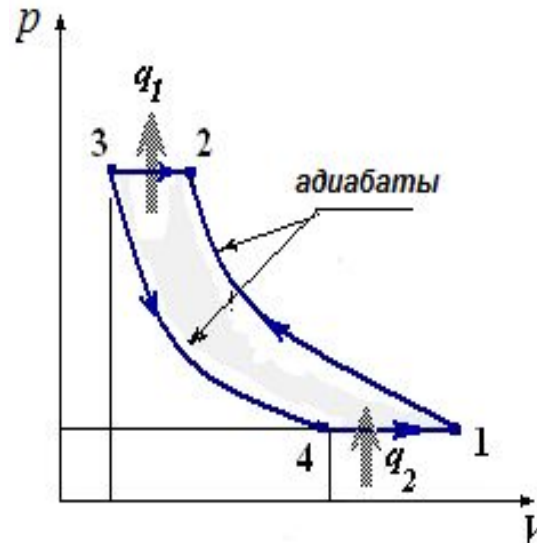
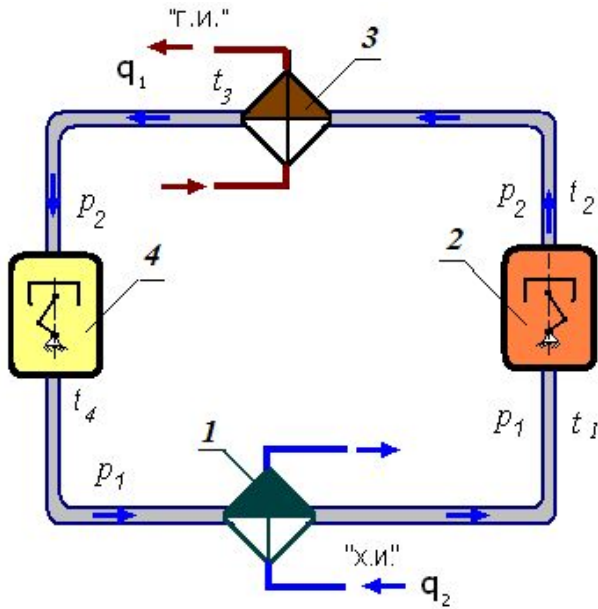
$$\xi_x = \frac{q_2}{|l_y|} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2}$$

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)



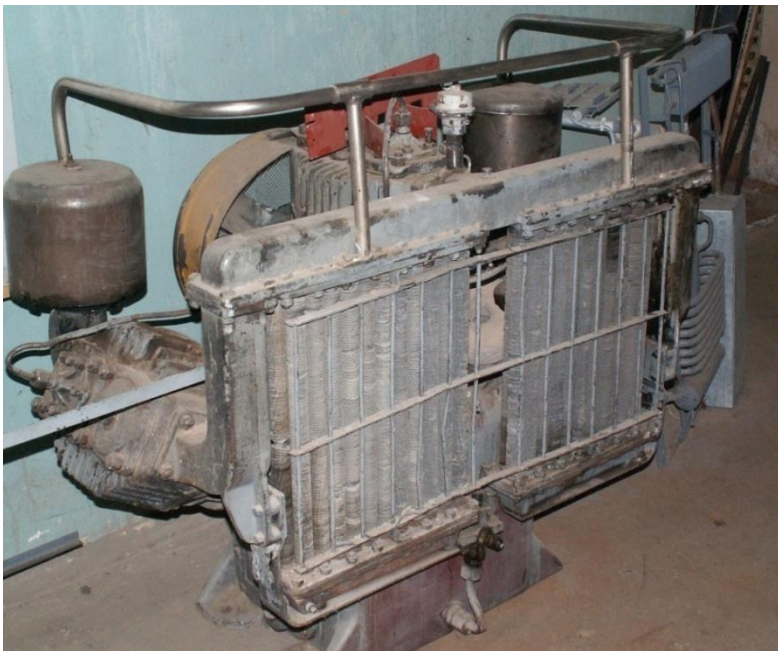
Принципиальная схема
воздушной компрессионной
холодильной установки:

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

Холодильный коэффициент

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

Термодинамические основы работы компрессора



Содержание раздела:

Показатели работы.

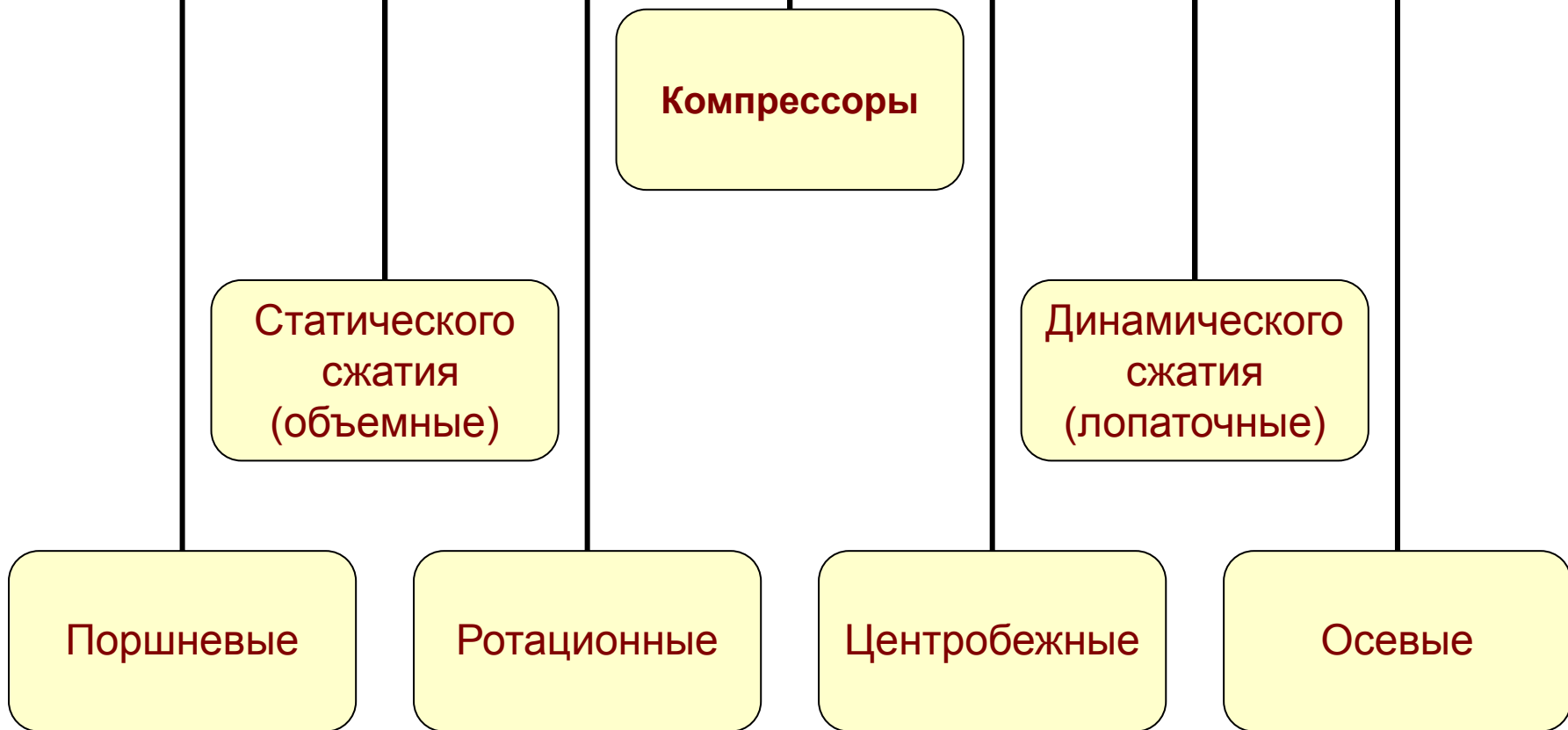
Процессы сжатия

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:

техническая работа компрессора должна быть возможно меньшей;

- температура после сжатия ограничена условиями смазки.

Показатели работы компрессора:

степень повышения давления

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

«техническая» работа

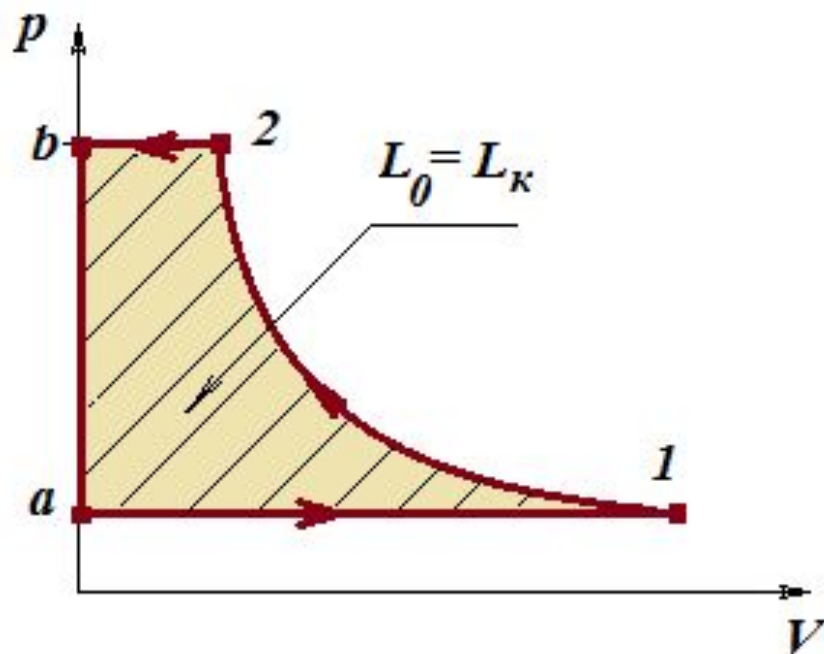
$$L_K = - \int_1^2 V \cdot dp$$

температура в конце сжатия

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

Термодинамические основы работы компрессора

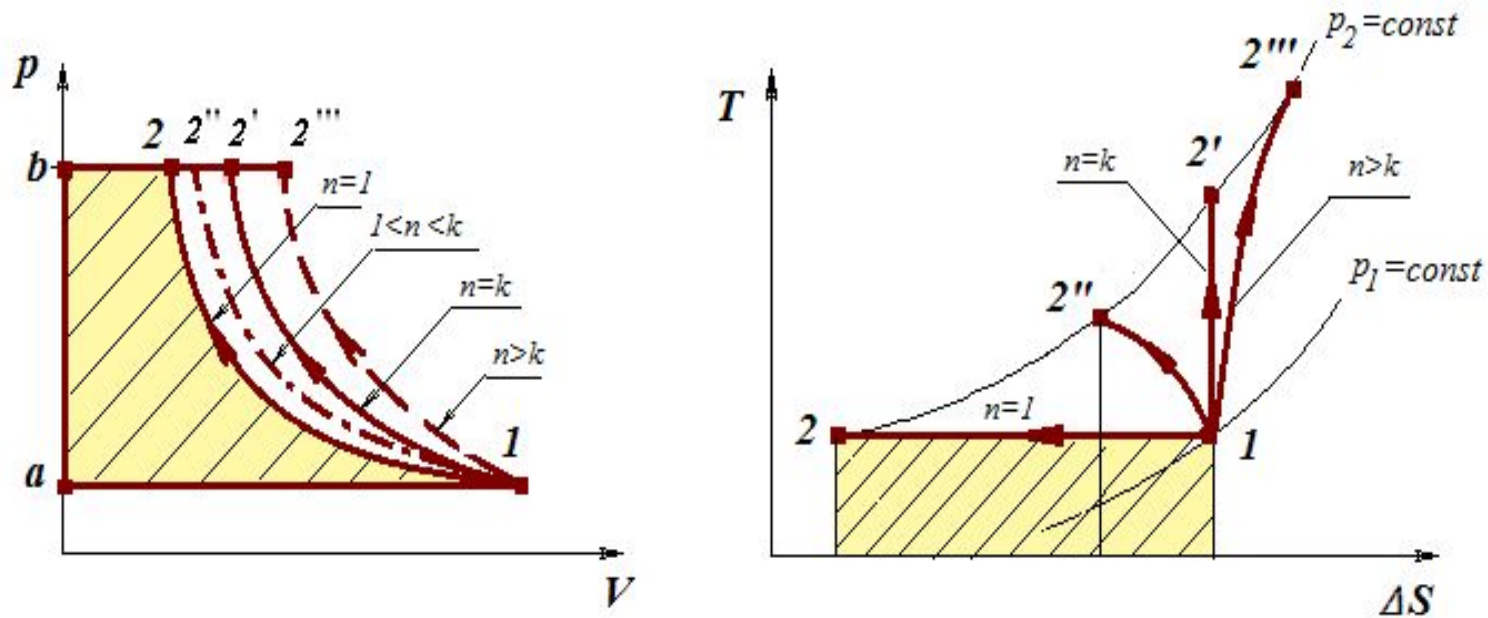
Рабочий цикл
одноступенчатого компрессора



$a-1$ – 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:

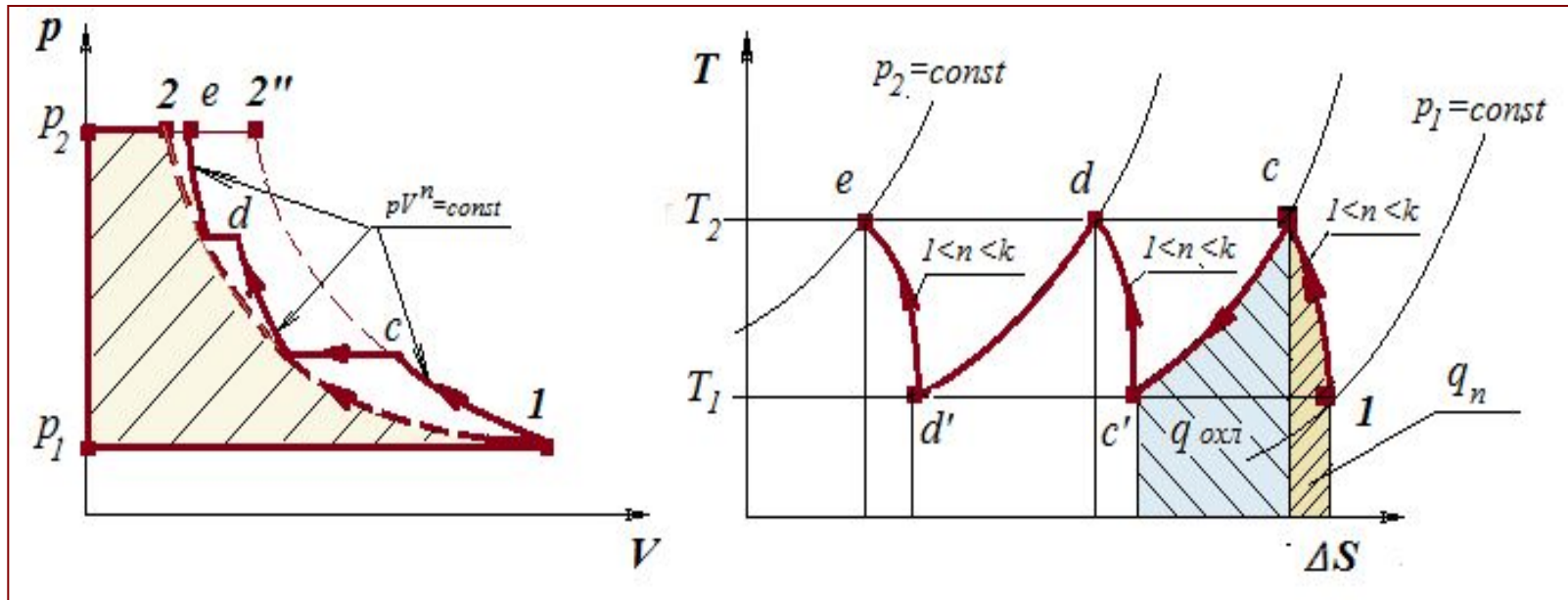
$$q = -R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

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

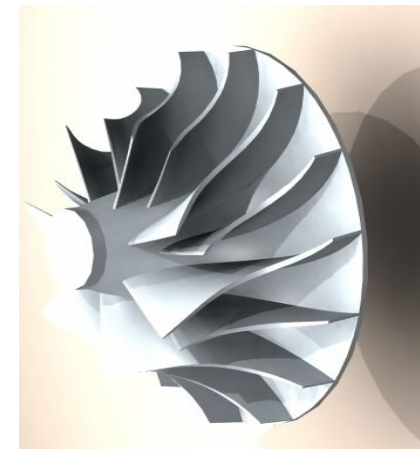
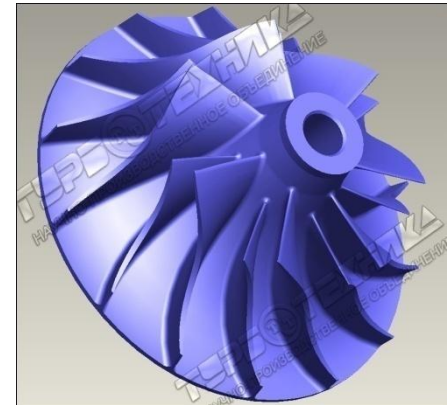
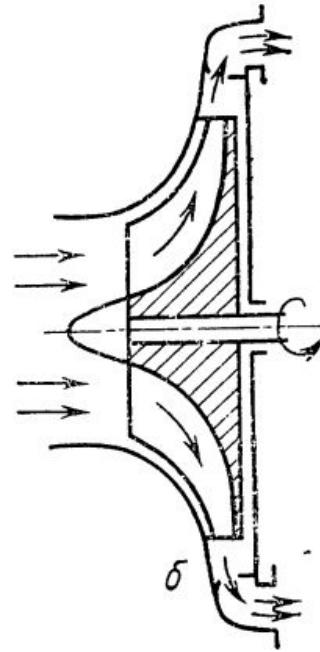
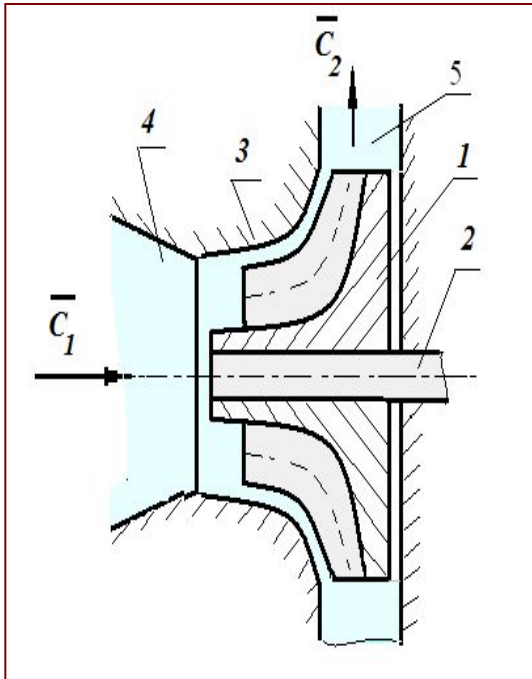
Процессы в многоступенчатом компрессоре



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.

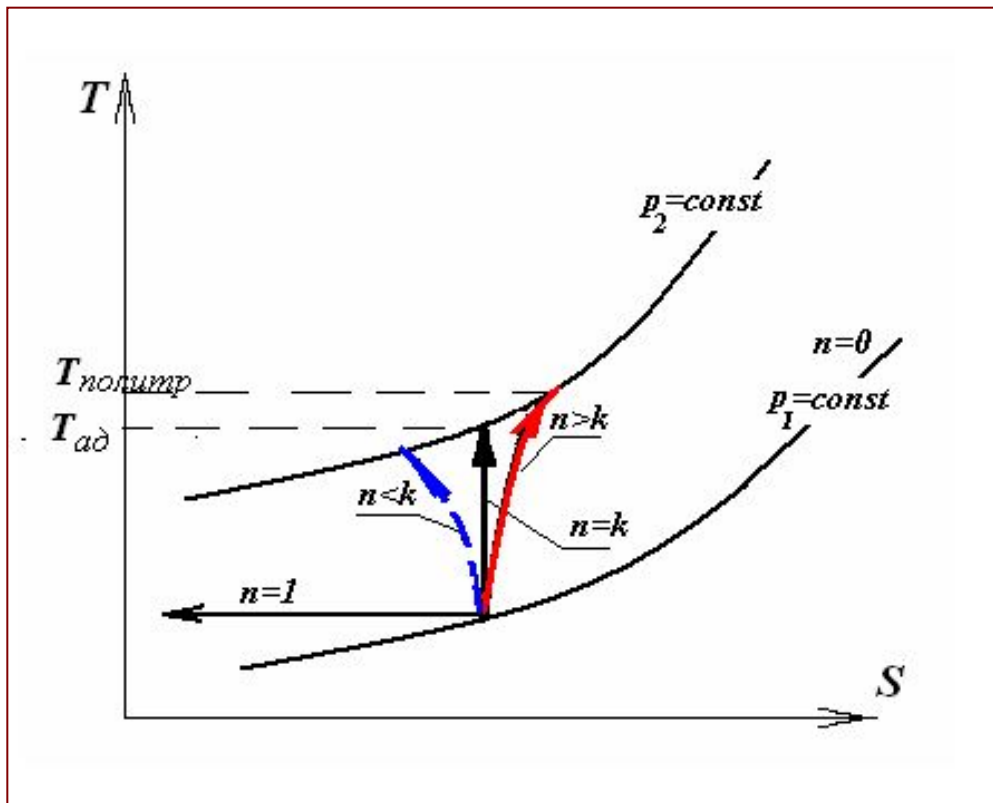
Термодинамические основы работы компрессора

Устройство и работа центробежного компрессора



Термодинамические основы работы компрессора

Процессы в центробежном компрессоре (нагнетателе)



$$\eta_{ад}^κ = \frac{l_{ад}}{l_{политр}}$$

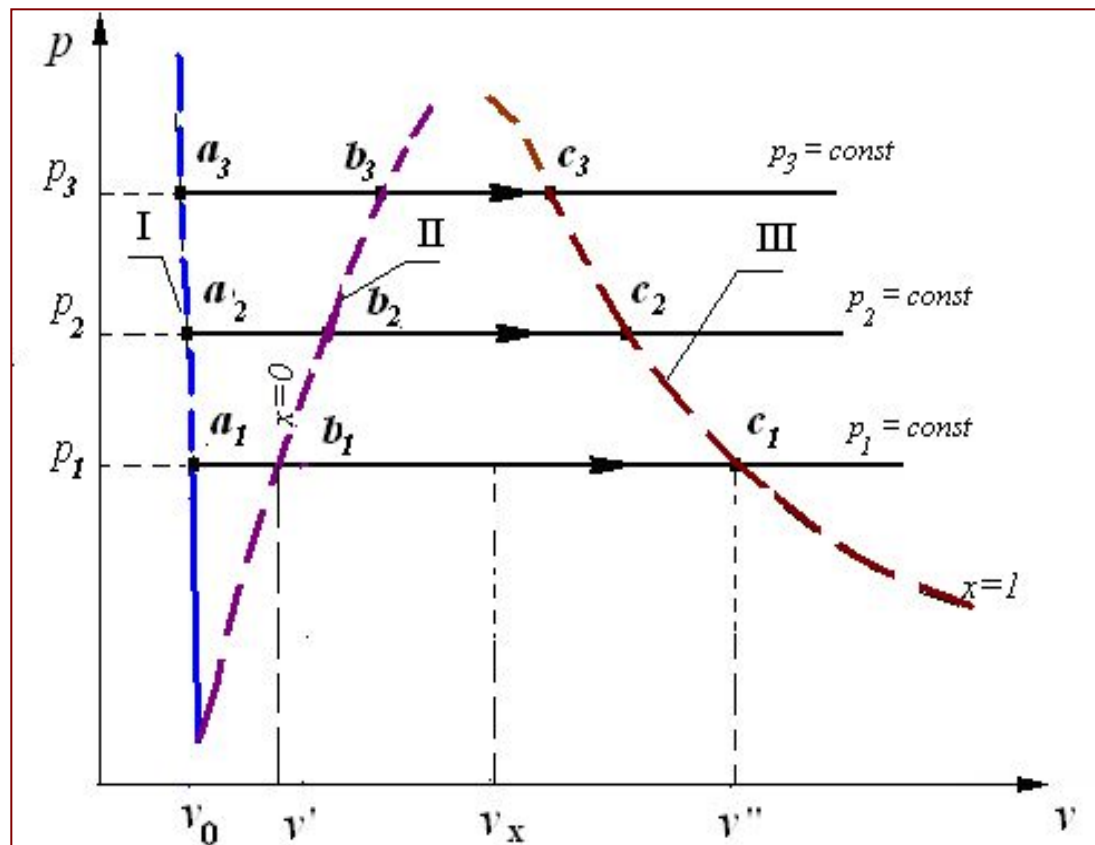
Адиабатический КПД для центробежных нагнетателей **0,7—0,8.**

Водяной пар.

Диаграммы состояния водяного пара.

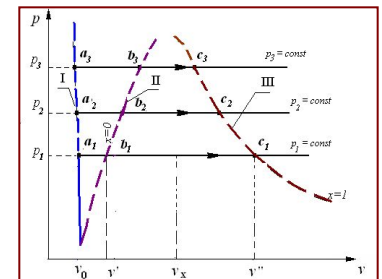
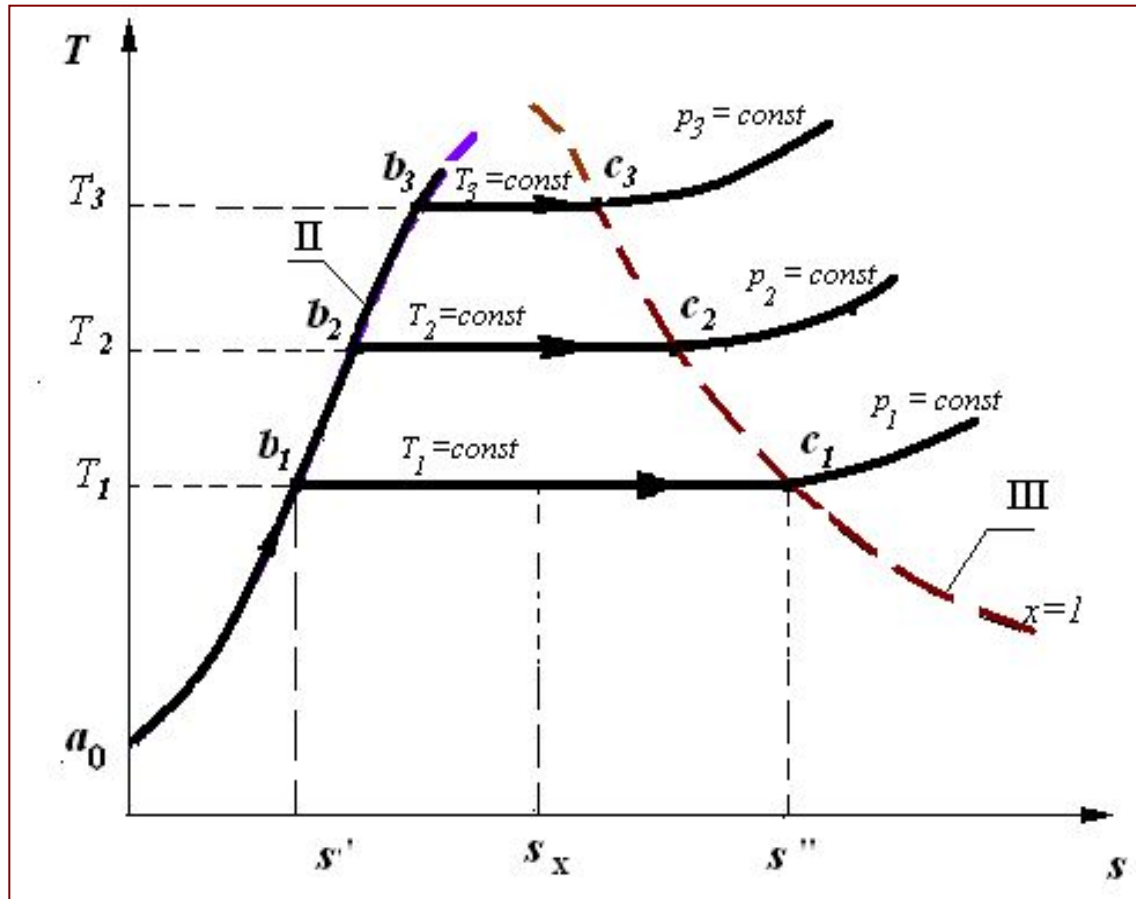
Пар - это реальный газ, способный в условиях применения переходить в жидкость.

p, v -диаграмма состояния водяного пара

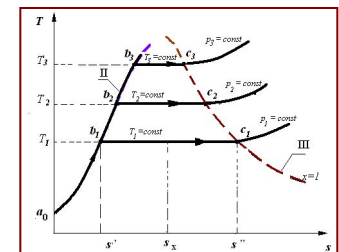
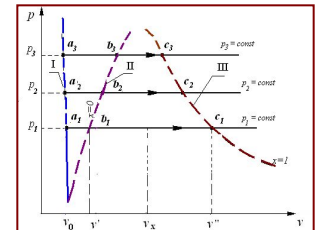
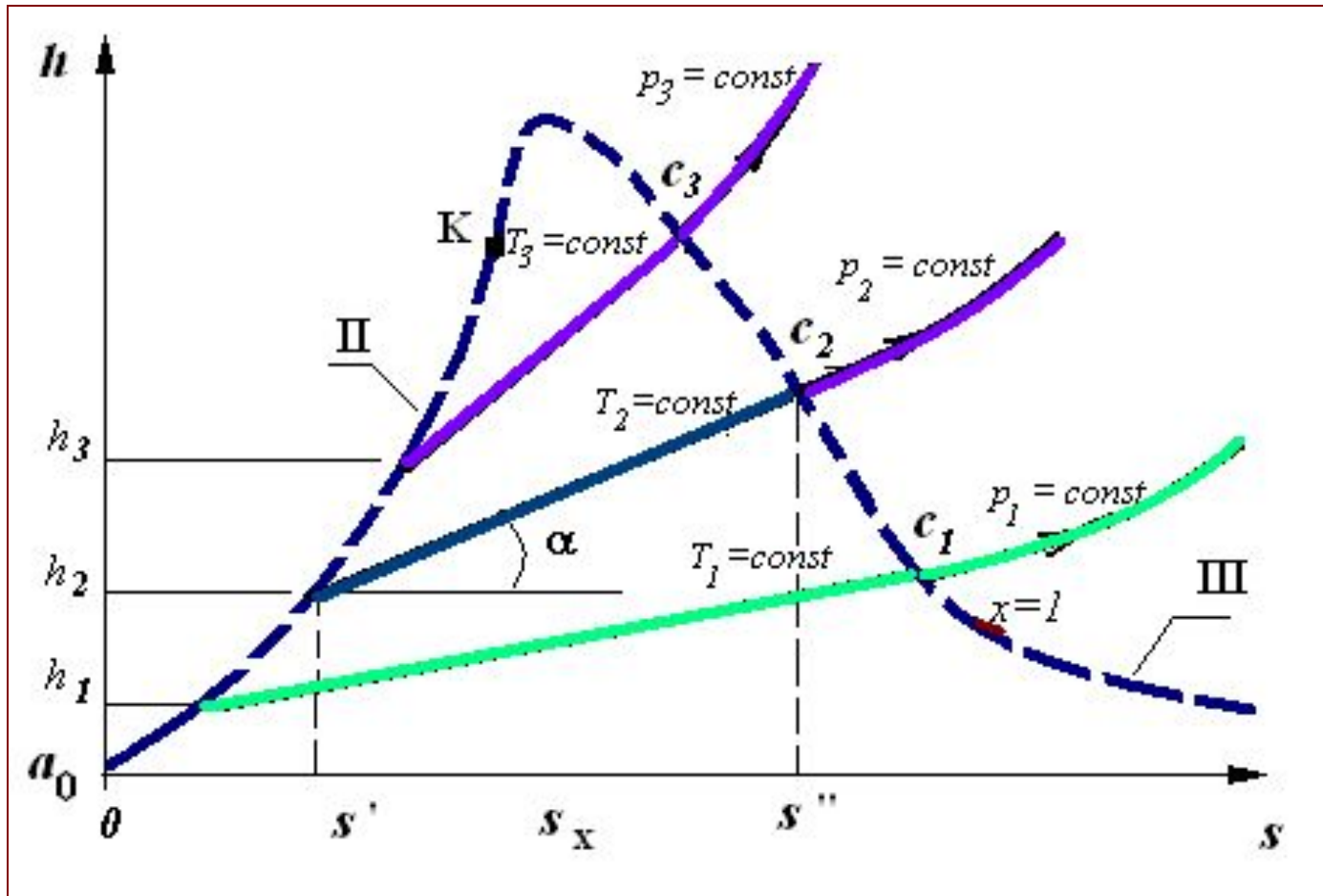


Водяной пар

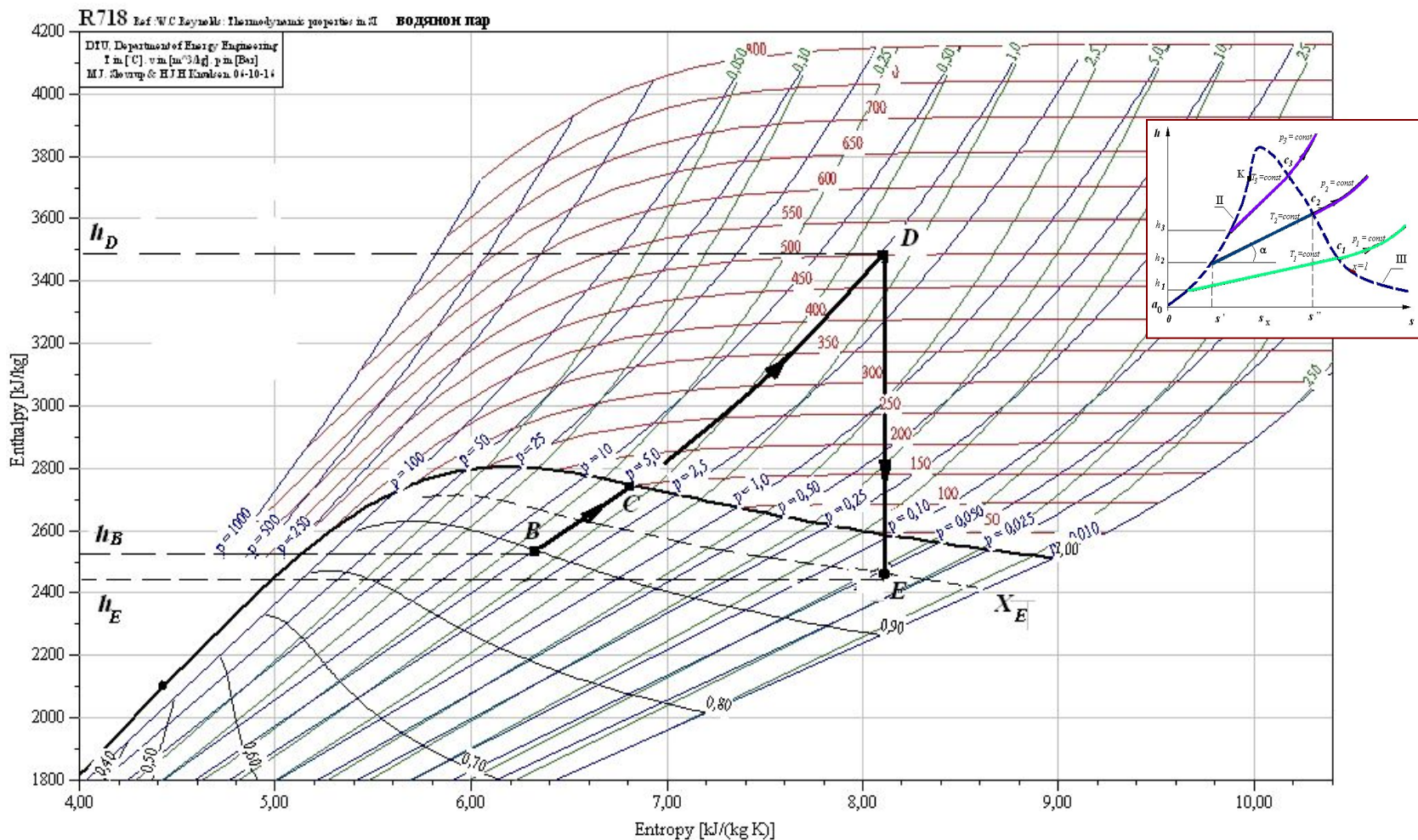
T, s -диаграмма состояния водяного пара



h,d-диаграмма состояния водяного пара



Процессы с водяным паром на h, s -диаграмме.

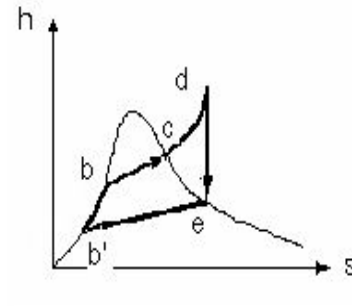
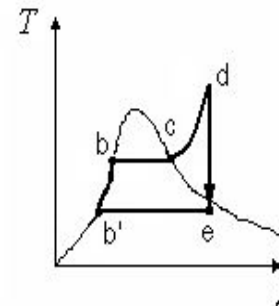
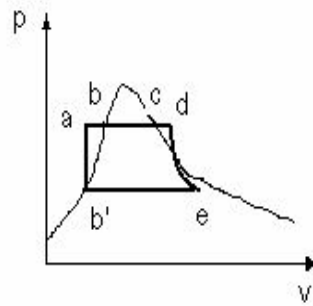
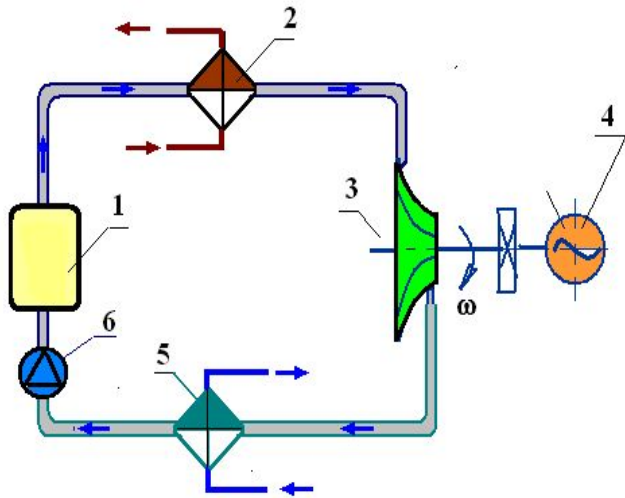


B-C – переход пара из влажного состояния в сухой насыщенный;

C-D – получение перегретого пара при постоянном давлении;

D-E – 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

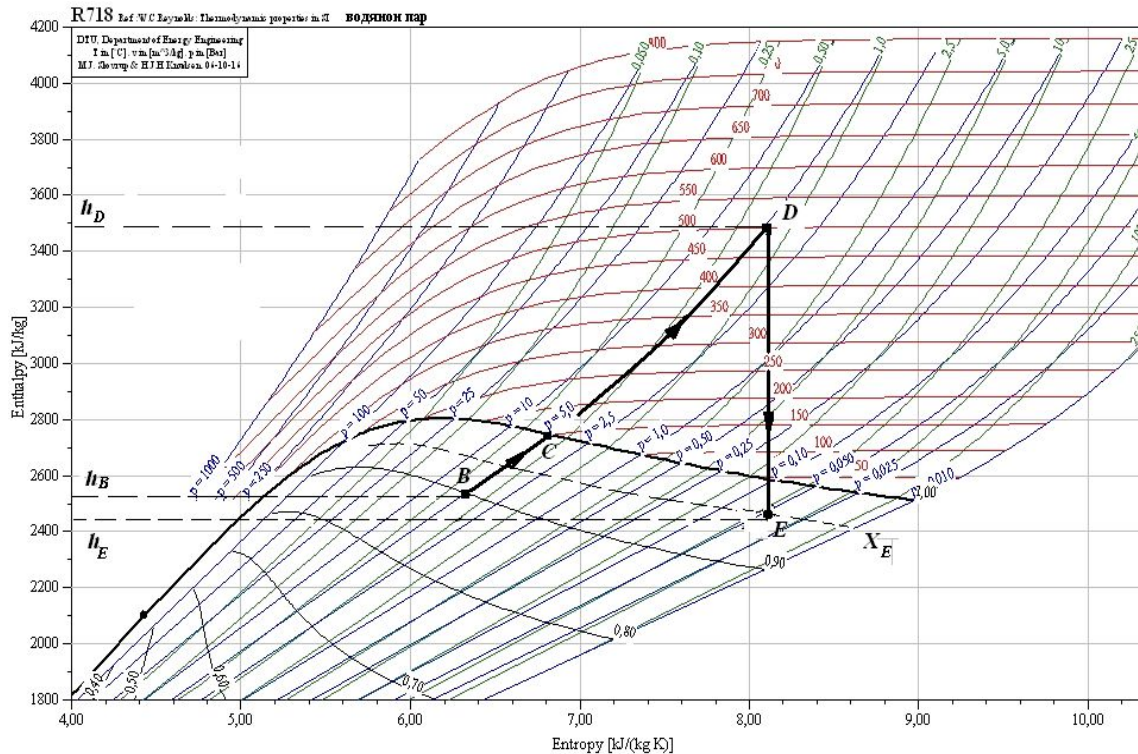
Цикл Ренкина паротурбинной установки на перегретом паре:

- 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.

$$\eta = \frac{l_{\dot{o}}}{q_1}$$

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

Процессы цикла Ренкина на h,d-диаграмме



Количество теплоты, подводимое в пароперегревателе:

$$q = h_d - h_b$$

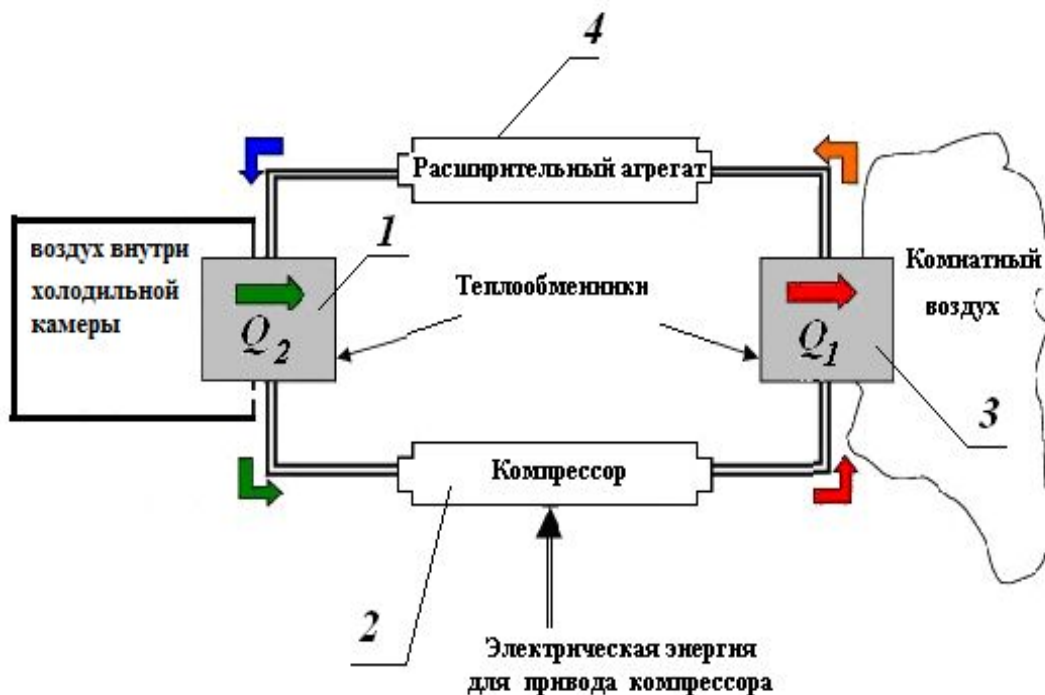
Располагаемая работа пара в турбине:

$$l_o = h_d - h_e$$

Коэффициент полезного действия турбины:

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

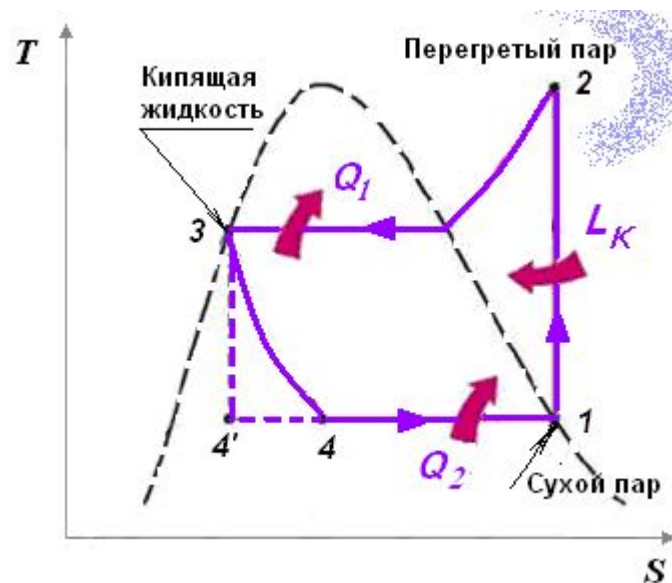
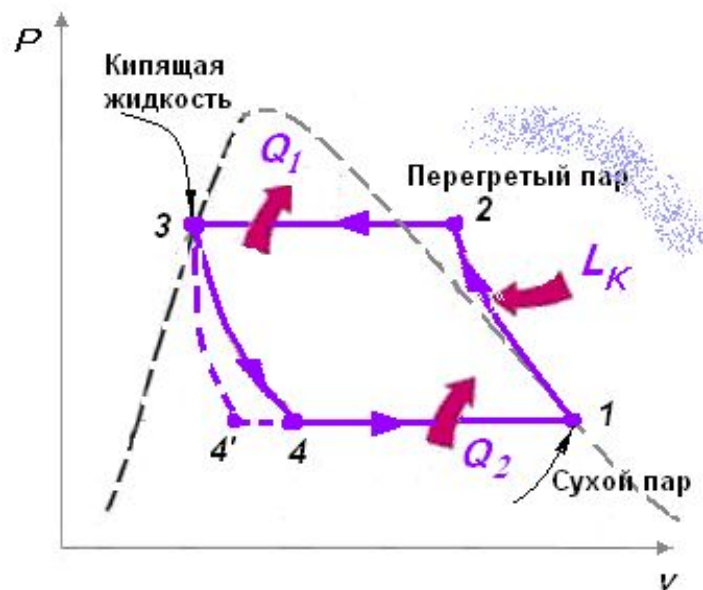
Парокомпрессионные холодильные установки



Принципиальная схема и элементы паровой компрессионной холодильной установки:

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

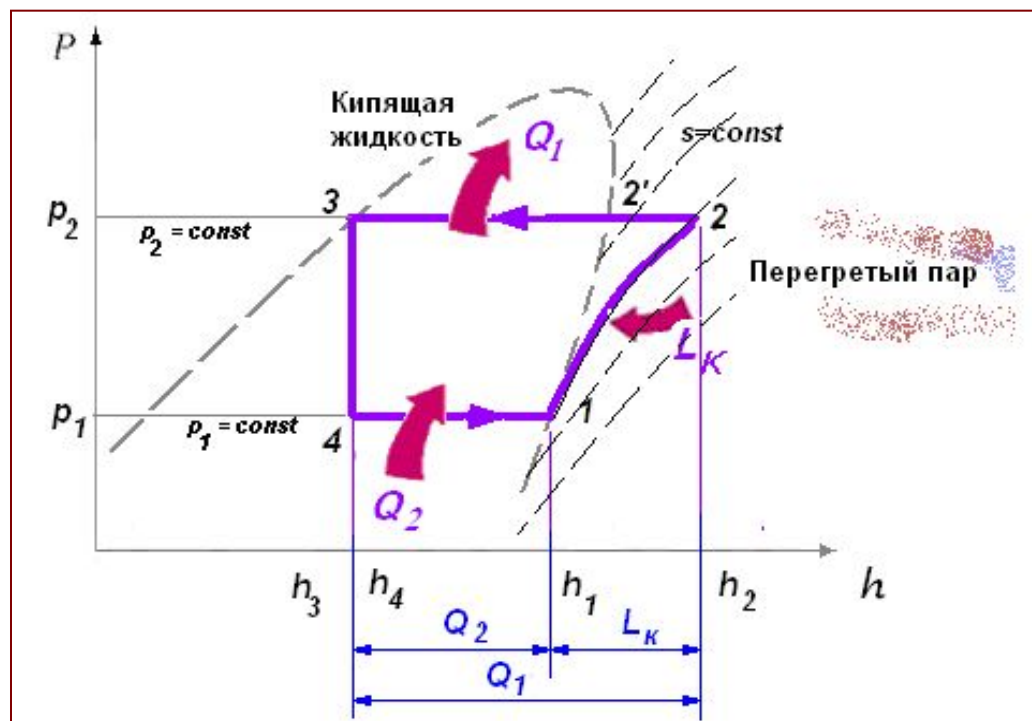
Парокомпрессионные холодильные установки



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



$$q_2 = h_1 - h_5$$

$$l_k = h_2 - h_1$$

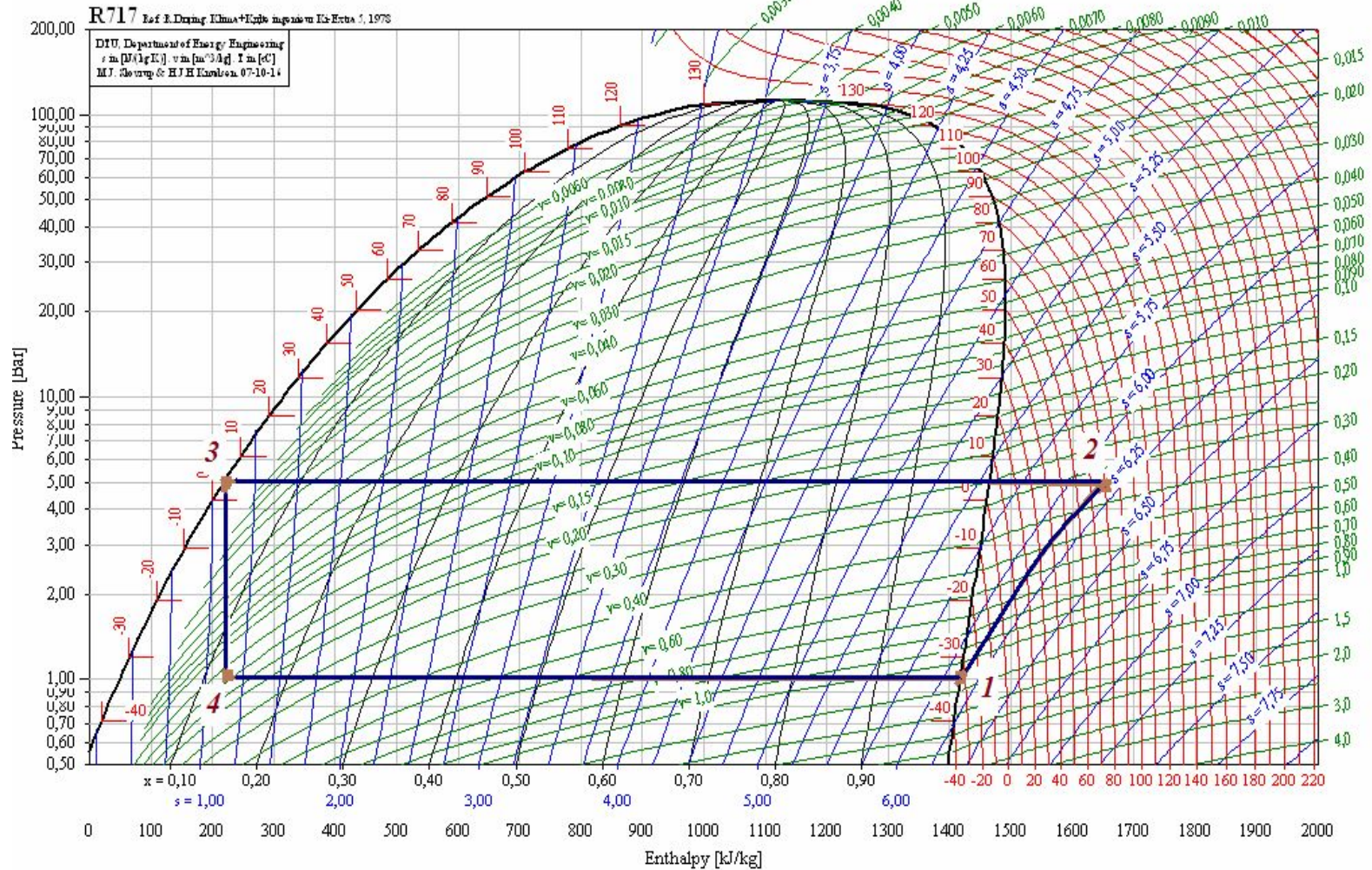
$$q_1 = h_2 - h_3$$

$$\xi_x = \frac{q_2}{l_0}$$

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 , г, 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, NH_3	R717	1370*	-33,4	0,728	0,291	2,31
Углекислота, CO_2	R744	350**	-78,5	5,08	2,64	-
Хлористый метил CH_3Cl	R-40		-23,7	0,42	0,175	
Дифтордихлорметан, CF_2Cl_2	R-12	166*	-30,6	0,49	0,22	1,37
Дифтормонохлорметан, CHF_2Cl	R-22	233*	-40,85	0,79	0,355	2,17
Тетрафторэтан CF_3CFH_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, C_3H_8	R-290	424	-42,17	0,72	0,34	1,9