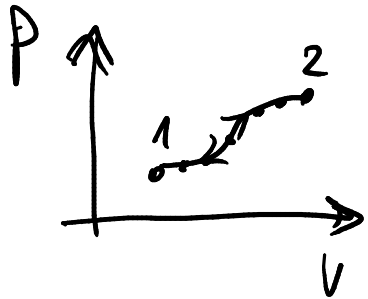


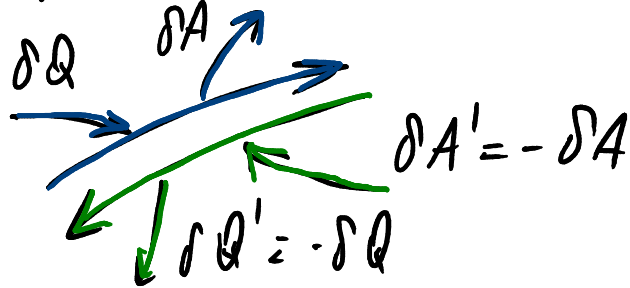
# Глава 16. Циклы. Второе начало термодинамики.

## 16.1 Обратимые и необратимые процессы.



Обратимый процесс — процесс, который можно провести в обратном порядке, при этом система будет проходить через те же состояния, что и при прямом ходе.

Обратимый процесс — равновесный.

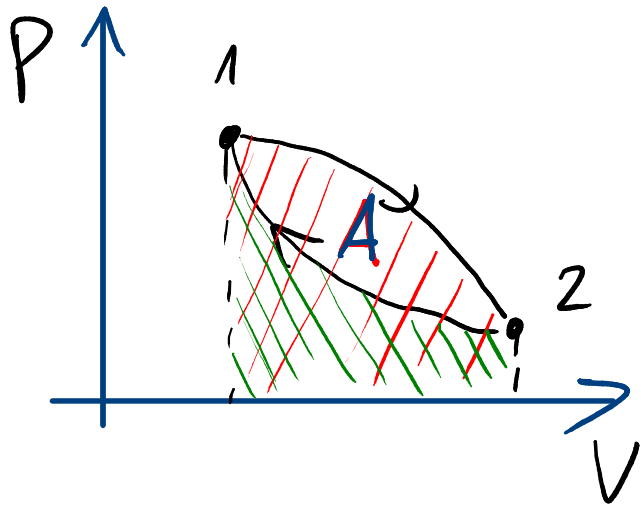


Свойство обратимого процесса

Если при прямом процессе системе сообщают  $\delta Q$  и система соверш. работу  $\delta A$ , то при обратном  $\delta Q' = -\delta Q$ ,  $\delta A' = -\delta A$

Необратимый процесс - нельзя провести в обратном порядке.

Цикл (круговой процесс) - процесс, при котором система после ряда изменений приходит в исходное состояние.



Работа, совершенная в цикле.

$$A = A_{12} + A_{21} = \underline{A_{12} - |A_{21}|}$$

$$\underline{A_{21} < 0} ; A_{12} > 0$$

## 16.2 Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины.

---

Тепловая машина (ТМ) — устройство, которое преобразует тепло в механическую работу или работу в тепло.

---

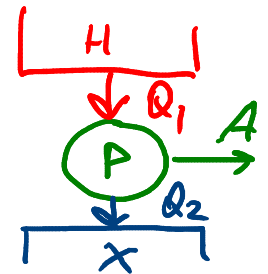
ТМ работают циклически. В работе используется некий круговой процесс.

Типичная ТМ состоит из:

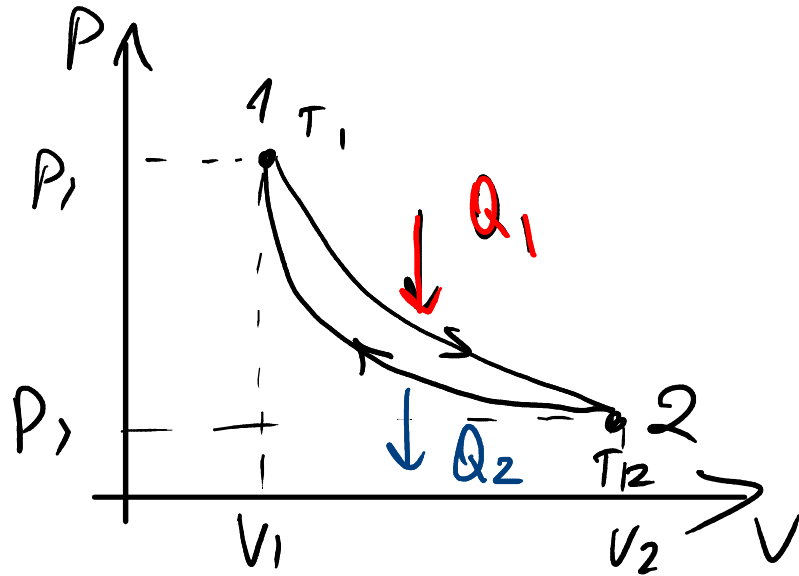
1) 2<sup>х</sup> резервуара тепла (термосагов)

нагревателя ( $T_1$ ) и холодильника ( $T_2$ );  $T_1 > T_2$

2) рабочее тело.



Рассмотрим цикл :



$$Q_2 > 0; \underline{A_2 > 0}$$

Сложим 2 ур-я;

$$Q_1 - Q_2 = \underline{A_1 - A_2 = A}, \text{ где } A - \text{полная работа в } \underline{\text{цикле}},$$

$$\underline{\text{Сост. 1}}: T_1, V_1, P_1, U_1$$

$$\underline{\text{Сост. 2}}: T_2, V_2, P_2, U_2$$

1<sup>е</sup> и 2<sup>е</sup> А :

$$\underline{1-2} \quad Q_1 = \Delta U_{12} + A_1 = U_2 - U_1 + A_1$$

$$\underline{2-1} \quad Q_2' = \Delta U_{21} + A_2' = U_1 - U_2 + A_2'$$

$$\begin{array}{cc} \text{"} & \text{"} \\ -Q_2 & -A_2 \end{array}$$

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2$$

Основная характеристика эффективности тепловой машины - КПД.

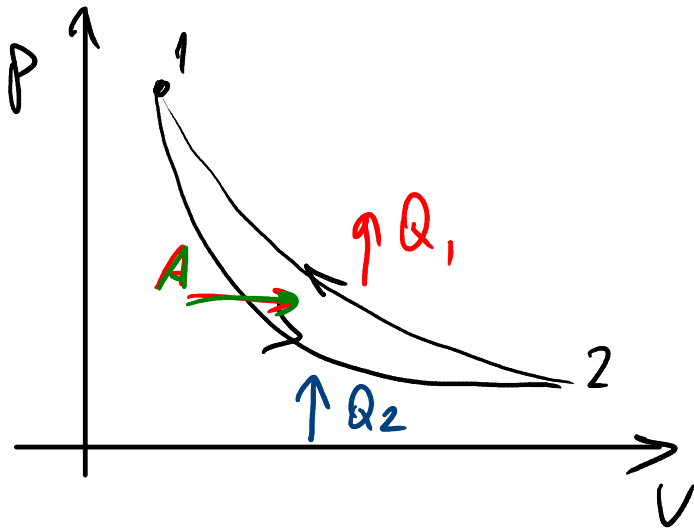
$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$	Термический КПД ТМ	$\eta < 1$
--	-----------------------	------------

$A$  - работа, совершаемая ТМ

$Q_1$  - тепло, подводимое к рабочему телу от нагревателя

$Q_2$  - тепло, отводимое в холодильник.

Если цикл обратим (т.е. состоит из обратимых процессов),  
то его можно провести в обратную сторону.



1-2. Тепло  $Q_2$  забирается у  
холодильника

2-1 Тепло  $Q_1$  отдается нагревателю

Над рабочим телом совершается  
работа  $A$ .

## 2 применение обратного цикла

Холодильная машина ←

$$\epsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

холодильный коэффициент  
мера эфф-сти хол. машины

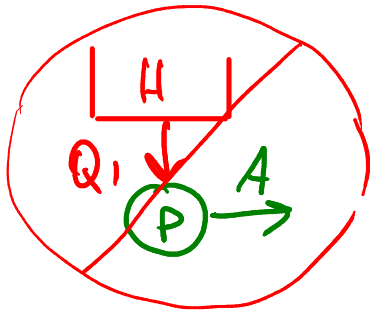
coefficient of performance | Тепловой насос

Мера эффективности - коэффициент  
трансформации (преобразование теплоты)

$$COP = \zeta = \frac{Q_1}{A} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \quad | \quad \zeta > 1$$

### 16.3. Второе начало термодинамики.

Формулировка Кельвина.  
(1851г)



Невозможен циклический процесс, единственным результатом которого является производство работы и теплообмен с одним тепловым резервуаром.

Альт.  
формула 1  
Невозможен  
В 1 2 рода

Вечный двигатель.

1<sup>го</sup> рода.  $A > Q_1 \Rightarrow \boxed{\eta > 1}$

его существование запрещается 1НТД (ЗСГ)

2<sup>го</sup> рода.  $A = Q_1$   
переходит

, т.е. все тепло нагревателя  
в работу.  $\eta = 1$ , Запрещается 2НТД.

## 16.4. КПД обратной и необратимой машин

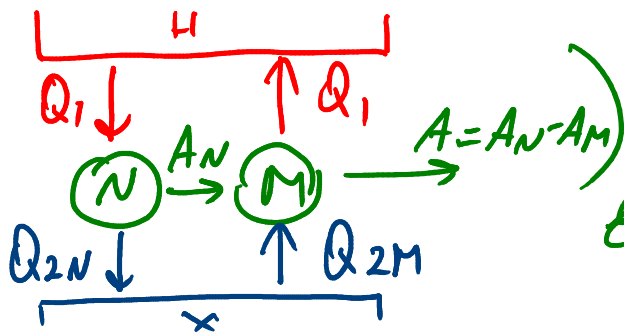
Рассм. 2 обратимых ТМ с одинаковыми тепловыми резервуарами.

Пусть КПД :  $\eta_N = \frac{Q_{1N} - Q_{2N}}{Q_{1N}}$  ;  $\eta_M = \frac{Q_{1M} - Q_{2M}}{Q_{1M}}$  ;

N, M - ТМ. Можно считать, что  $Q_{1N} = Q_{1M} = Q_1$

(Если  $Q_{1N} \neq Q_{1M}$ , то и  $Q_{2N} = m Q_{2M}$ )

Если  $A_N < A_M$ ,  
то  $N \Leftrightarrow M$



Обратим у нас машин M и подключаем машину N, т.е. N приводит в действие M.

Если  $A_N > A_M$ , то в результате совершается работа  $A = A_N - A_M$ .



В результате: 1) тепловой баланс нагревателя — неизменен,

2) от холодильника забрали тепло  $\Delta Q_2 = Q_{2M} - Q_{2N}$



3) совершена работа  $A = A_N - A_M$ .

т.е. получили ВД 2<sup>го</sup> рода, что невозможно.

$\Rightarrow$  Раз  $\Delta Q_1 = 0$ , то  $\Delta Q_2 < 0$ ;  $A = 0$ ;  $\Rightarrow$   $A_N = A_M$ ;

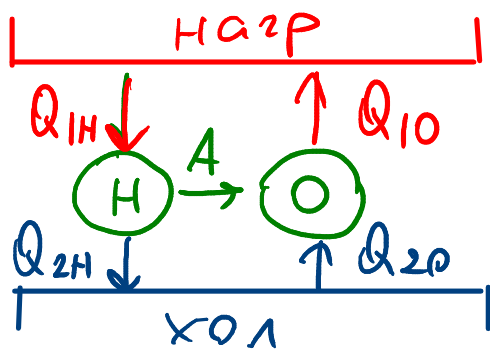
$$\text{Тогда } \eta_N = \frac{A_N}{Q_{1N}} = \eta_M = \frac{A_M}{Q_{1M}}$$

---

КПД всех обратимых ТМ, работающих с одними и теми же  
тепловыми резервуарами одинаков и не зависит от устройства  
и рабочего тела

---

Рассм. обратную и обратную ТМ.



Обратная - в режиме холодильной машины

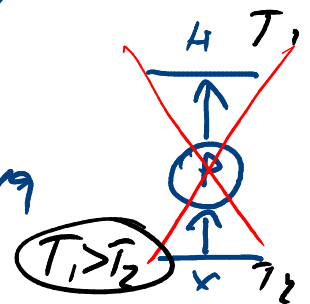
Подключим обратную ТМ так, чтобы она приводила в действие обратную.

$$A_H = A_O = A = Q_{1H} - Q_{2H} = Q_{1O} - Q_{2O}$$

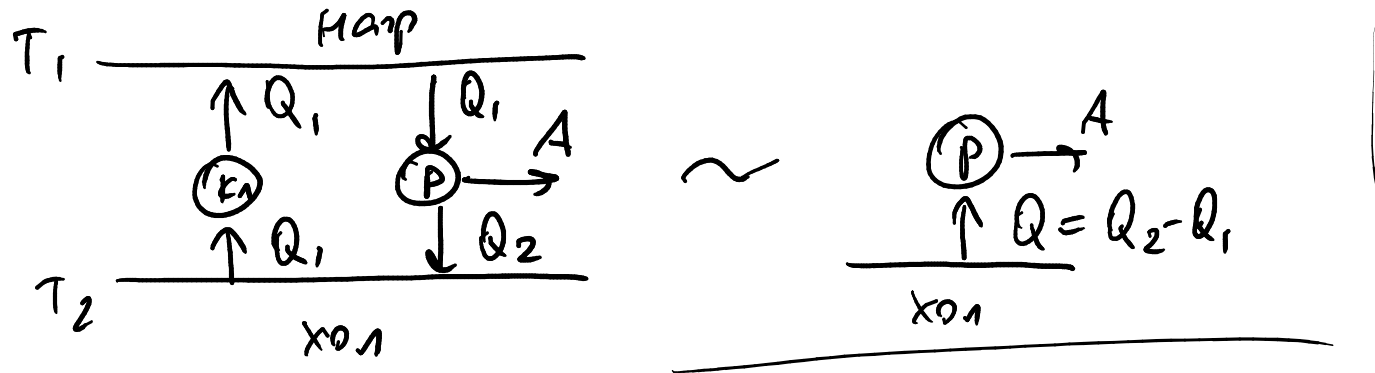
Баланс · <sup>нагр</sup>  $\Delta Q_1 = Q_{1O} - Q_{1H}$ ; хол ·  $\Delta Q_2 = Q_{2H} - Q_{2O}$

\* 2НТД в формулировке Клаузиуса. (1850г., 1854г.)

Невозможен циклический процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому



Формулировки эквивалентности:



Чтобы выполнялось 2НТД, необход.  $\Delta Q_1 = Q_{10} - Q_{1H} < 0$

$$\eta_H = \frac{A}{Q_{1H}}; \quad \eta_0 = \frac{A}{Q_{10}}; \quad \Rightarrow \quad \frac{A}{Q_{10}} - \frac{A}{Q_{1H}} < 0$$

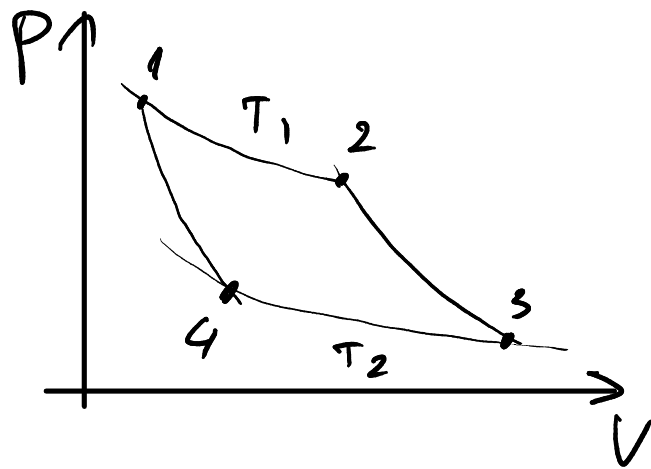
$$\boxed{\eta_0 > \eta_H}$$

КПД обратной машины  
всегда больше, чем у необратимой.

## 16.5. Цикл Карно

— это обратимый цикл, состоящий из 2<sup>x</sup> изотерм и 2<sup>x</sup> адиабат.

1824г. Сади Карно.



Найдем КПД цикла Карно для ИТ.

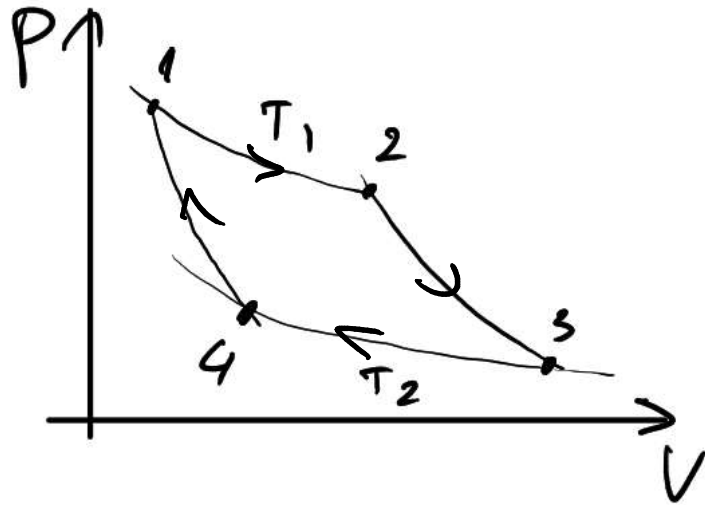
1-2. Изотермич. расширение

$$T = T_1 = \text{const}$$

$A_{12} > 0$ ;  $Q_{12} = Q_1$  — сист. получает тепло от нагревателя.

$$A_{12} = Q_1 = \underline{\underline{\nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}}$$

2-3. Адиабатическое расширение.  $Q_{23} = 0$ ;  $A_{23} = -\Delta U_{23} = -\nu C_V \Delta T$   
 $\underline{\underline{\Delta T = T_2 - T_1}}$



3-4. Изотермич. сжатие.

$A_{34} < 0$ ;  $Q_{34} = -Q_2$  —  
— тепло отдается холодильнику.

$$A_{34} = -Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

4-1. Адиабатич. сжатие.  $Q_{41} = 0$ ;  $A_{41} = -\Delta U_{41} = \nu C_V \Delta T$

т.е.  $A_{41} = -A_{23}$ .

$$\Rightarrow \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

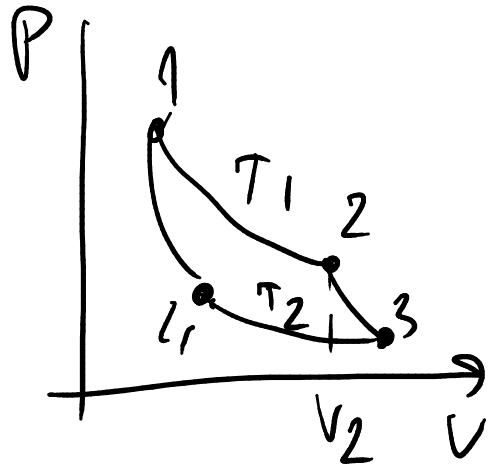


Уравнение адиабат.  $PV^\gamma = \text{const}$ ;

$$PV = \nu R \hat{T}$$

$$P = \frac{\nu R \hat{T}}{V}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$



2-3.  $T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$

4-1.  $T_2 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$

$$\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_3}{V_4}$$

$$\frac{T_2 V_3^{\gamma-1}}{T_2 V_4^{\gamma-1}} = \frac{T_1 V_2^{\gamma-1}}{T_1 V_1^{\gamma-1}}$$

$$\Rightarrow \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$$

$\Rightarrow$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

КПД цикла Карно