

КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

1. Круговые обратимые и необратимые процессы
2. Тепловые машины
3. Цикл Карно (обратимый)
4. Работа и КПД цикла Карно
5. Необратимый цикл. Холодильная машина

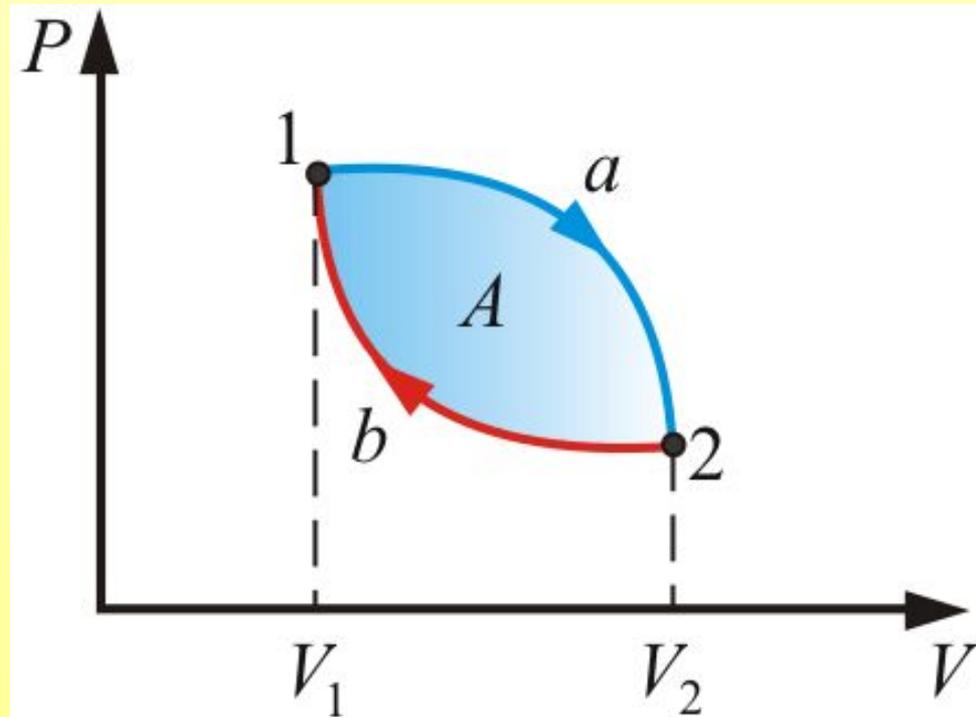
1. Круговые обратимые и необратимые процессы

Круговым процессом, или циклом, называется такой процесс, в результате которого термодинамическое тело возвращается в исходное состояние.

1-2 расширение газа $A > 0$

2-1 сжатие газа $A < 0$

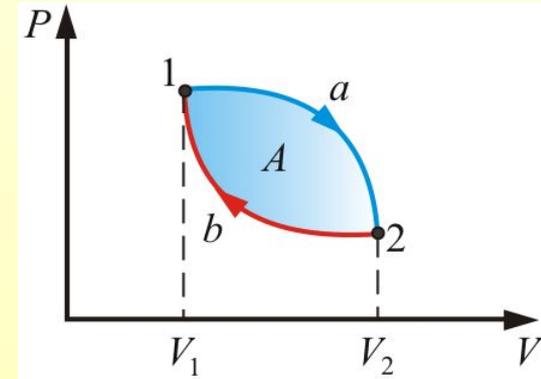
Работа, совершаемая за цикл, определяется площадью, охватываемой кривой



Если за цикл совершается положительная работа

$$A = \oint P dV > 0$$

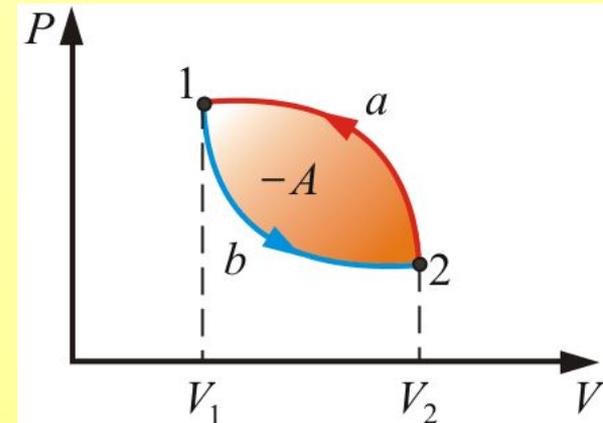
(цикл протекает по часовой стрелке),
то он называется **прямым**



Если за цикл совершается отрицательная работа

$$A = \oint P dV < 0$$

(цикл протекает против часовой стрелки),
то он называется **обратным**



В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно $dU = 0$

Тогда первое начало термодинамики для кругового процесса $Q = \Delta U + A = A$

Однако в результате кругового процесса система может теплоту как получать, так и отдавать, поэтому

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

Q_1 – количество теплоты, полученное системой;

Q_2 – количество теплоты, отданное системой

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Все термодинамические процессы, в том числе и круговые, делят на две группы: **обратимые и необратимые.**

Процесс называют **обратимым**, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.

Процесс называется **необратимым**, если он протекает так, что после его окончания систему нельзя вернуть в начальное состояние через прежние промежуточные состояния

Свойством обратимости обладают только
равновесные процессы

Максимальным КПД обладают машины у которых
только обратимые процессы.

Реальные процессы сопровождаются **диссипацией**
энергии

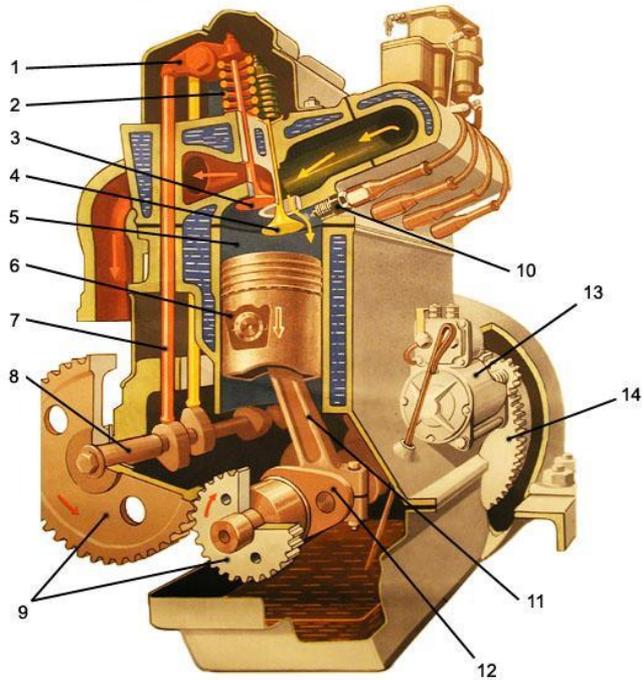
2. Тепловые машины

Тепловой машиной называется периодический действующий двигатель, совершающий работу за счет получаемого извне тепла.

Принцип действия тепловых двигателей



ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ



1. Коромысло
2. Пружина клапана
3. Выпускной клапан
4. Впускной клапан
5. Цилиндр
6. Поршень
7. Штанга
8. Распределительный вал
9. Распределительные шестерни
10. Свеча
11. Шатун
12. Коленчатый вал
13. Стартер
14. Маховик

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{Q}$$

η – коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя

$A_{\text{полезн}}$ – полезная работа, совершенная двигателем, Дж

Q – общее количество теплоты, полученное двигателем, Дж

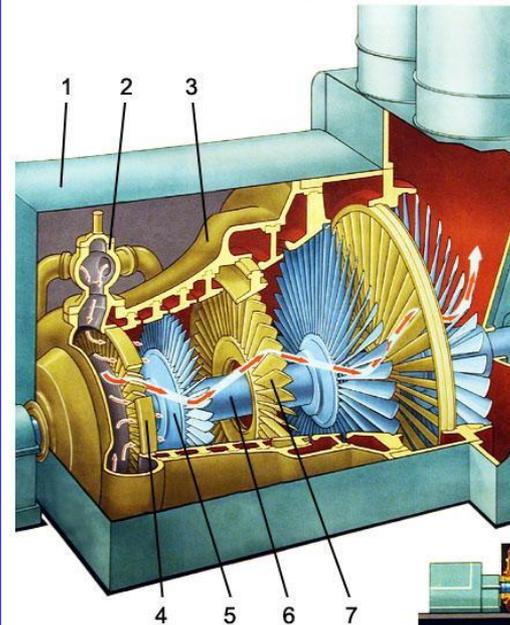
$$\text{КПД} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%$$

КПД – коэффициент полезного действия теплового двигателя

Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя

Q_2 – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику

ПАРОВАЯ ТУРБИНА



1. Кожух
2. Парораспределительное устройство
3. Корпус турбины
4. Сопловый аппарат
5. Диск ротора
6. Вал турбины
7. Диск статора (направляющего аппарата)
8. Цилиндр высокого давления
9. Цилиндр низкого давления
10. Генератор

КПД тепловых двигателей



Двигатель внутреннего сгорания

КПД = 25-30%



Газовая турбина

КПД = 25-29%



Турбореактивный двигатель

КПД = 20-30%



Паровая турбина

КПД = 25-40%



Паровая машина

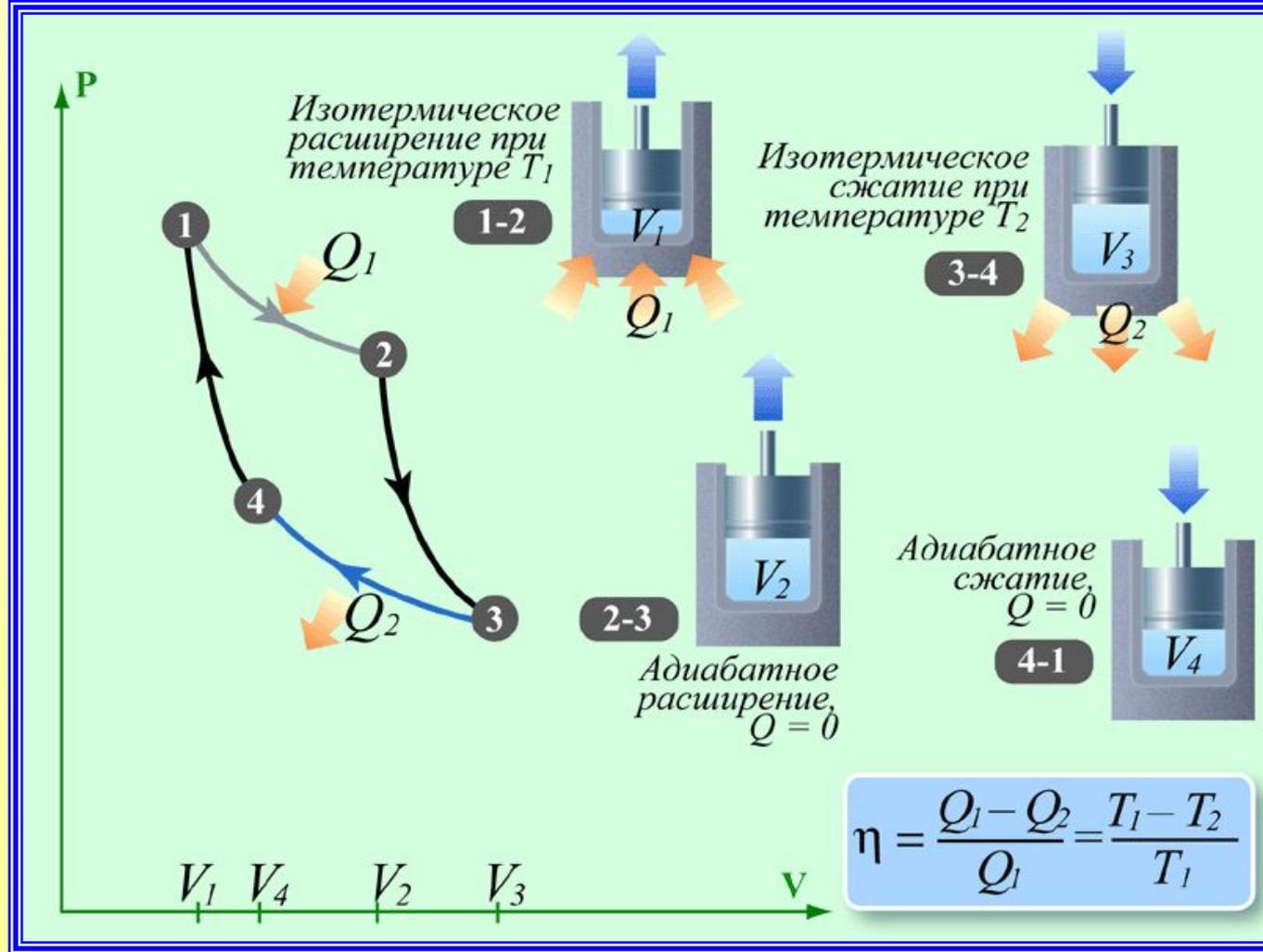
КПД = 15%

Идеальная тепловая машина

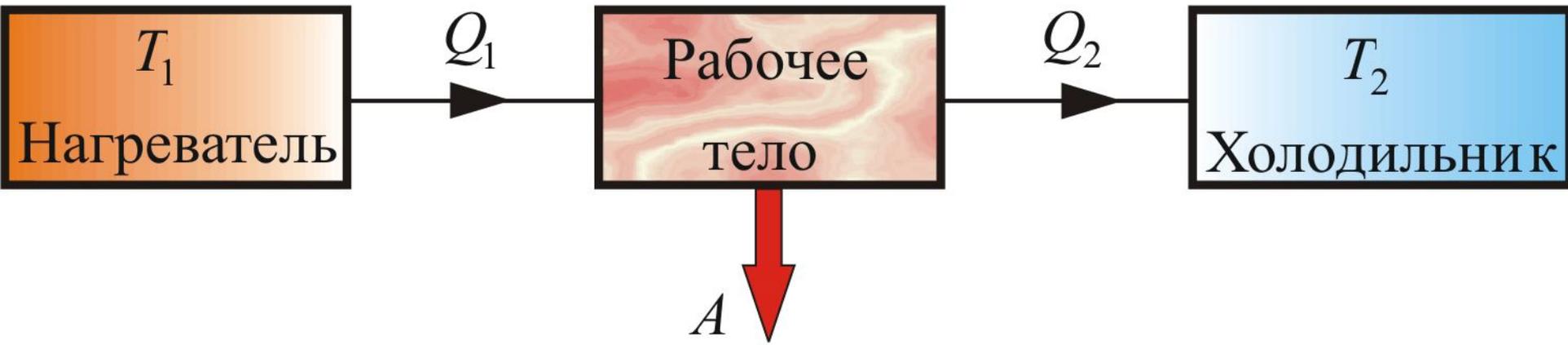
Наибольшим КПД при заданных температурах нагревателя T_1 и холодильника T_2 обладает тепловой двигатель, где рабочее тело расширяется и сжимается по *циклу Карно* график которого состоит из двух изотерм и двух адиабат



Сади Карно
(1796 – 1832)

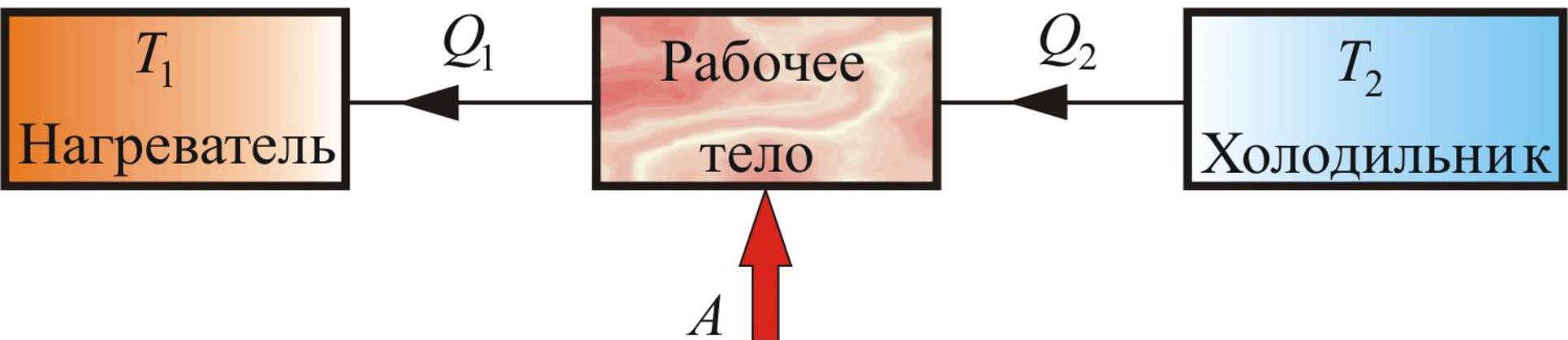


Обязательными частями тепловой машины являются **нагреватель** (источник энергии), **холодильник**, **рабочее тело** (газ, пар).



Прямой цикл используется в **тепловом двигателе** – периодически действующей тепловой машине, совершающей работу за счет полученной извне теплоты.

$$A = Q_1 - Q_2$$



Обратный цикл используется в холодильных машинах – периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота Q_2 от холодного тела переносится к телу с более высокой температурой.

3. Цикл Карно (обратимый)

Основываясь на втором начале термодинамики, **Карно** вывел **теорему**, носящую теперь его имя:

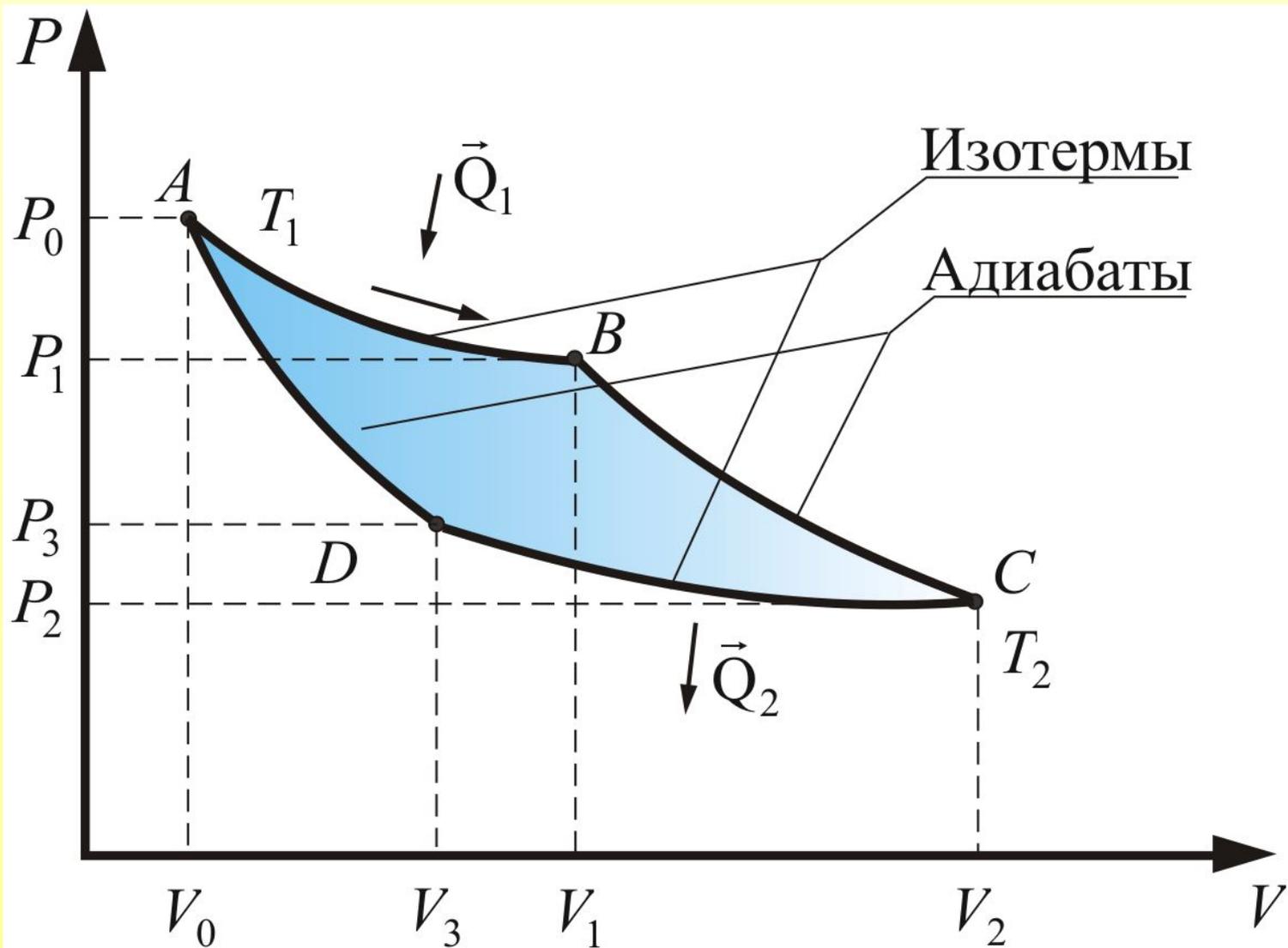
ТЕОРЕМА КАРНО

Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей и холодильников, наибольшим КПД обладают обратимые машины.

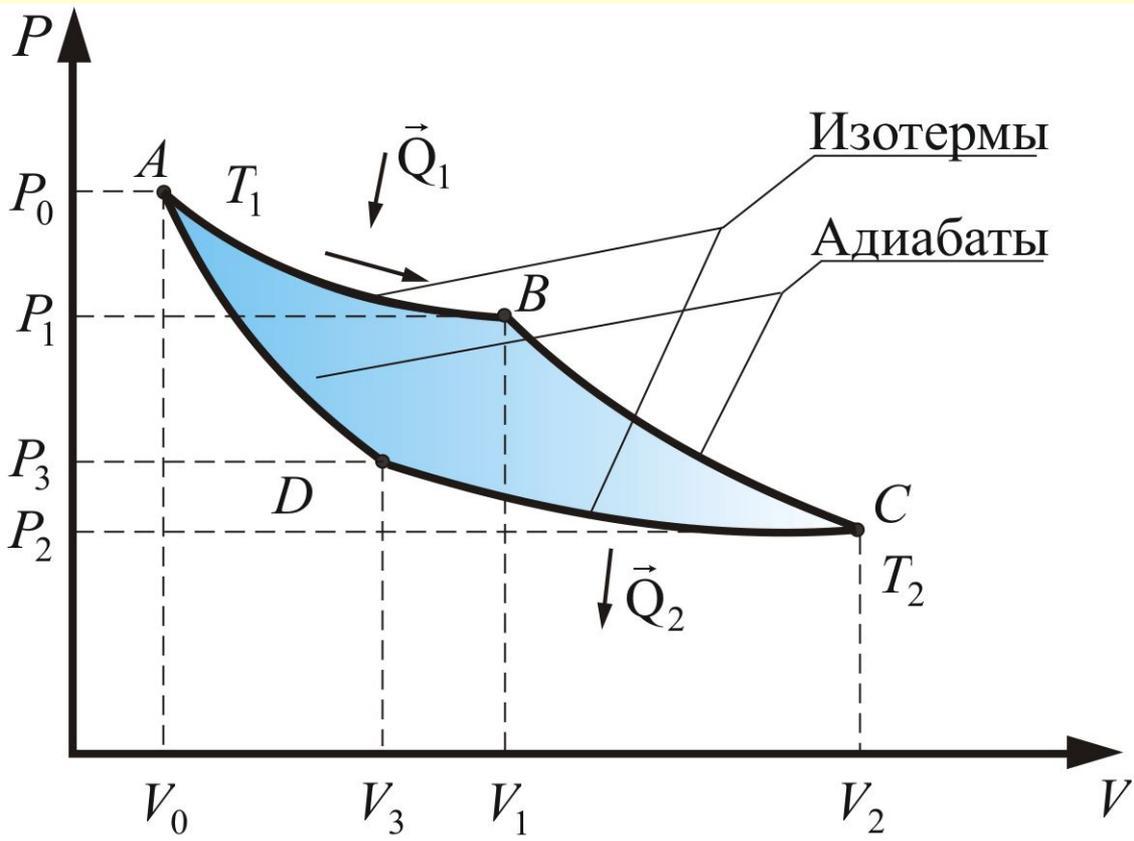
Причем КПД обратимых машин, равны друг другу и не зависят от конструкции машины и от природы рабочего вещества.

При этом КПД меньше единицы.

Цикл, изученный Карно, является самым экономичным и представляет собой круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат



4. Работа и КПД цикла Карно



Процесс А-В.
Положительная
работа,
совершенная
газом при
изотермическом
расширении газа
от V_0 до V_1

$$A_1 = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_0} = Q_1,$$

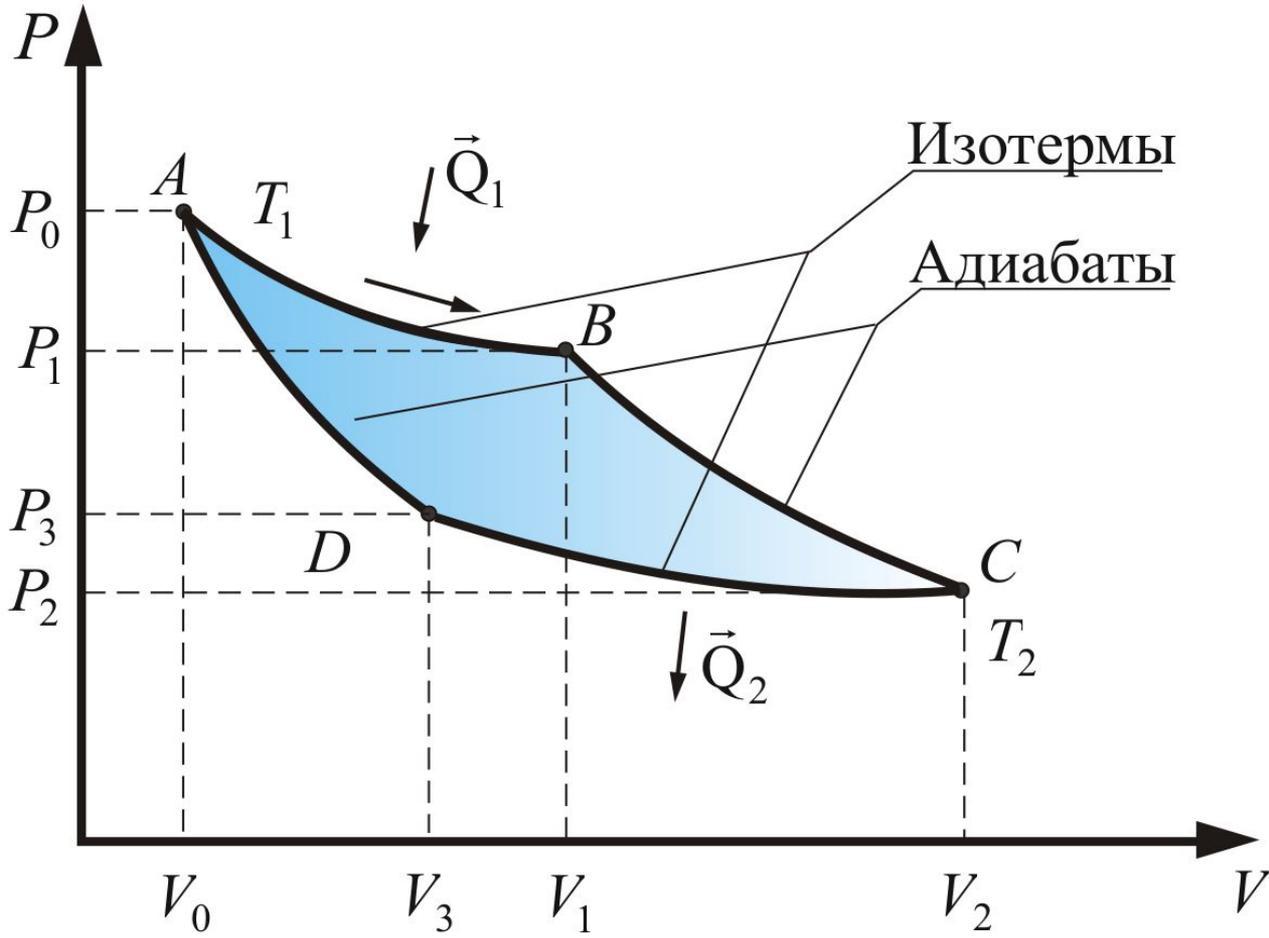
Процесс В-С – адиабатическое расширение.

При адиабатическом расширении теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения A_2 совершается за счет изменения внутренней энергии. Уравнение адиабаты:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1},$$

где γ – коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$



Давление в процессе ***B-C*** уменьшается до P_2 , температура падает до T_2
Полученная ***работа на стадии B-C:***

$$A_2 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2)$$

Процесс С-D -изотермическое сжатие

На третьем этапе газ изотермически сжимается V_2 до V_3 отдавая теплоту Q_2

Теплота Q_2 , отданная газом холодильнику при изотермическом сжатии, равна **работе сжатия A_3**

A_3 -это работа совершаемая над газом

$$A_3 = -RT_2 \ln \frac{V_2}{V_3} = -Q_2$$

где Q_2 – тепло, отданное холодильнику.

Процесс D-A – адиабатическое сжатие.

Уравнение адиабаты:

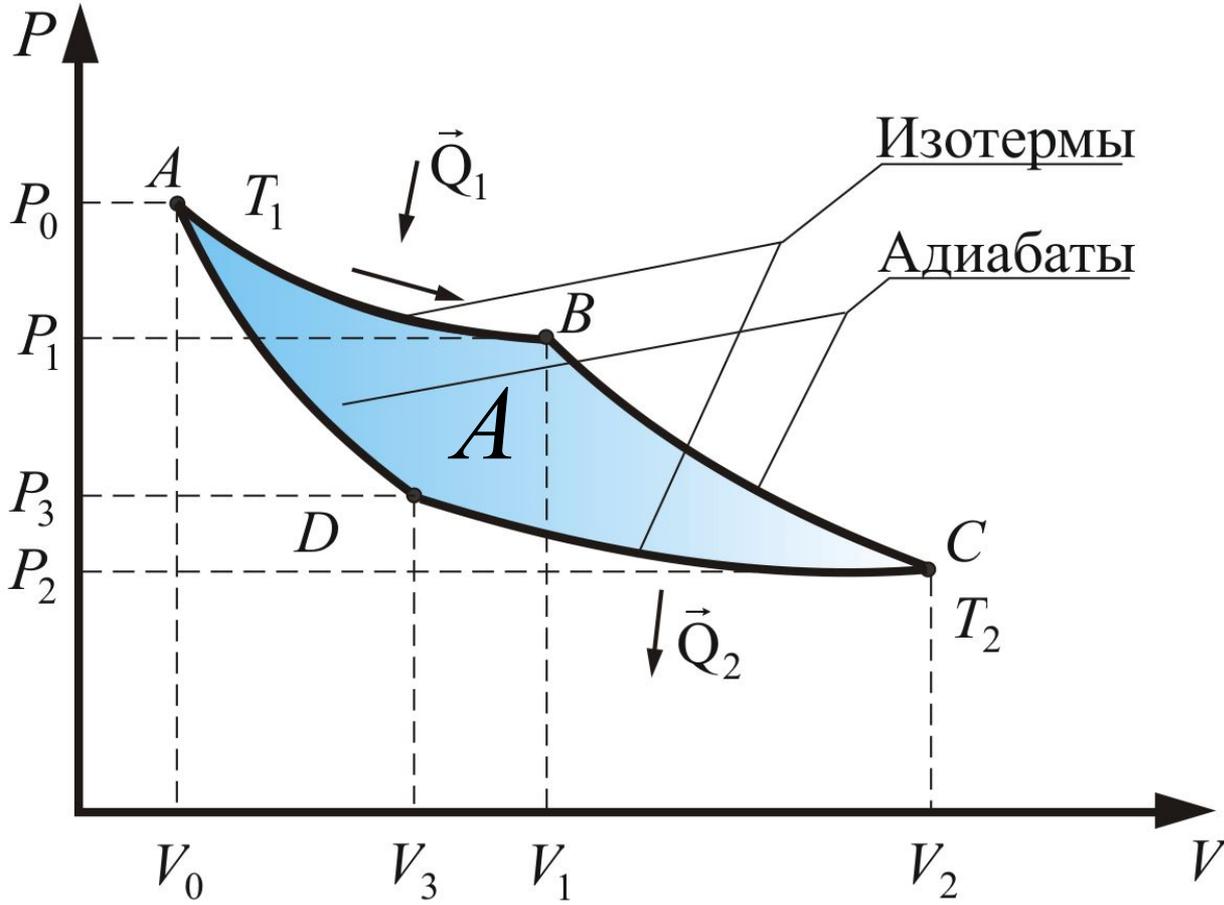
$$\left(\frac{V_3}{V_0}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_2}$$

Работа сжатия на последнем этапе D-A:

$$A_4 = -\frac{R}{\gamma-1}(T_1 - T_2),$$

тогда общая работа цикла:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$



**Полезная
 работа равна
 площади
 ограниченной
 кривой
 ABCDA.**

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$A = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_0} + \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1} - RT_2 \ln \frac{V_2}{V_3} - \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$

$$A = Q_1 - Q_2 = R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_3} > 0$$

Значит работа совершаемая газом
больше работы внешних сил.

Из равенств следует: $\left| \frac{Q_1}{Q_2} \right| = \left| \frac{T_1}{T_2} \right|$

полезная работа

$$A = Q_1 - Q_2.$$

КПД η равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

5. Необратимый цикл

Предположим, что необратимость цикла обусловлена тем, что теплообмен между рабочим телом и источником теплоты происходит при конечных разностях температур.

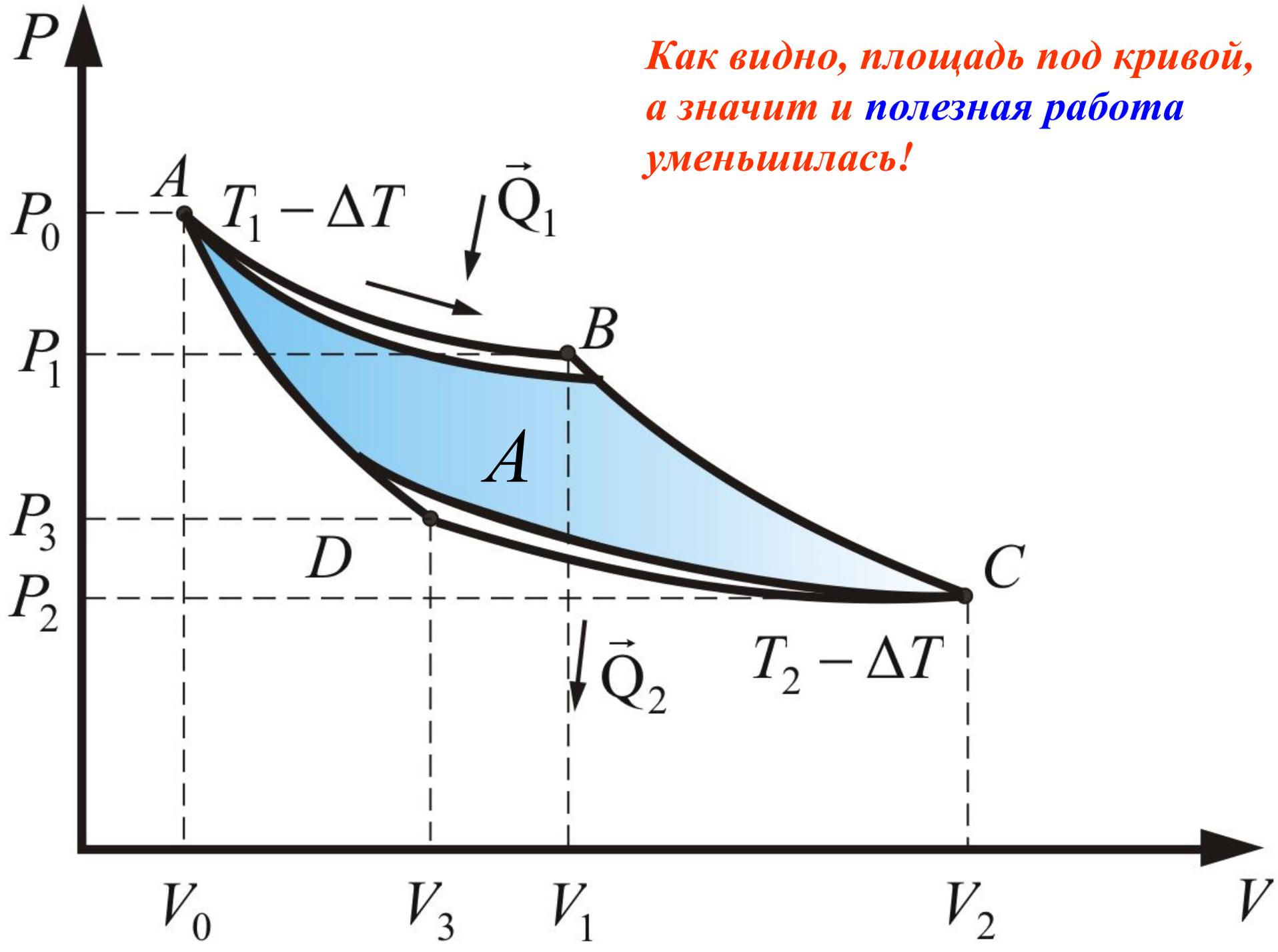
Нагреватель и холодильник не идеальны, они не обладают бесконечной теплоемкостью, поэтому нагреватель, отдавая тепло, охлаждается на ΔT , а холодильник нагревается на ΔT .

Примером необратимого процесса является процесс торможения тела под действием сил трения.

При этом скорость тела уменьшается, и оно останавливается. Энергия механического движения тела расходуется на увеличение энергии хаотического движения частиц тела и окружающей среды. Происходит **диссипация энергии**.

Для продолжения движения необходим компенсирующий процесс охлаждения тела и среды.

И так, в случае тепловых машин, **нагреватель и холодильник – не идеальны, они не обладают бесконечной теплоёмкостью** и в процессе работы получают или отдают добавочную температуру ΔT .



Для обратимого цикла Карно

$$\eta_{\text{обр}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Для необратимого цикла

$$\eta_{\text{необр}} = 1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1 - \Delta T} < 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Всегда

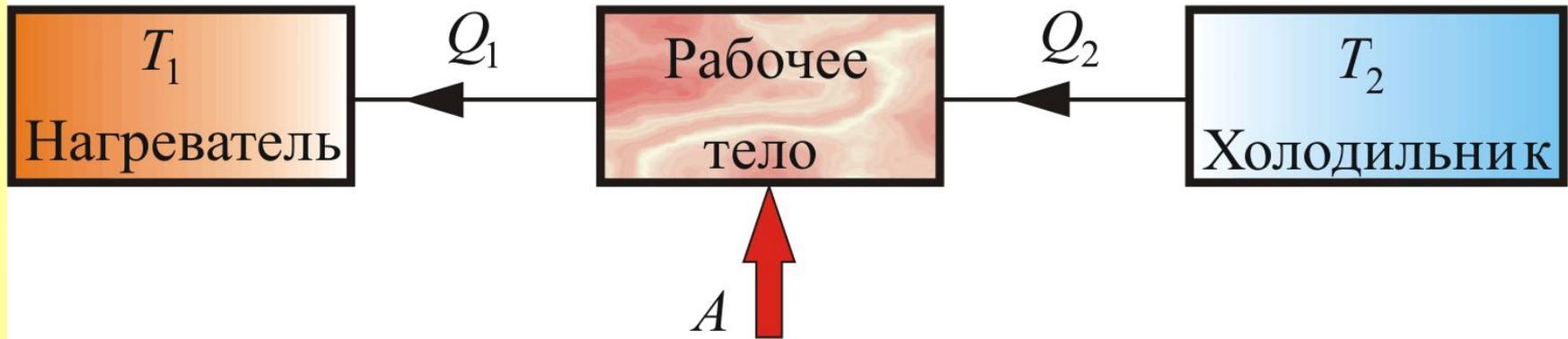
$$\eta_{\text{обр}} > \eta_{\text{необр}}$$

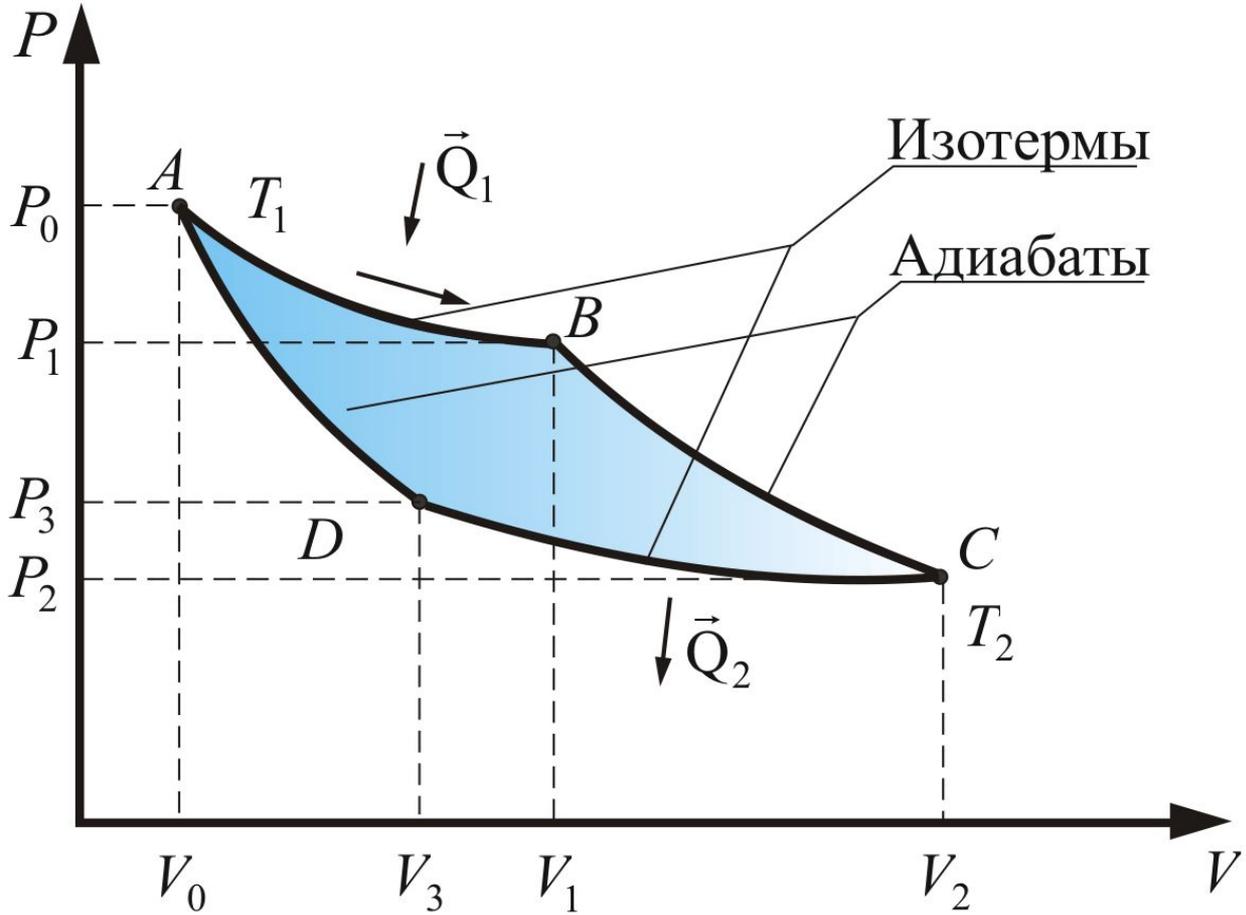
– ЭТОТ ВЫВОД СПРАВЕДЛИВ НЕЗАВИСИМО ОТ ПРИЧИН НЕОБРАТИМОСТИ ЦИКЛА КАРНО.

Холодильная машина

Эта машина, работающая по обратному циклу Карно.

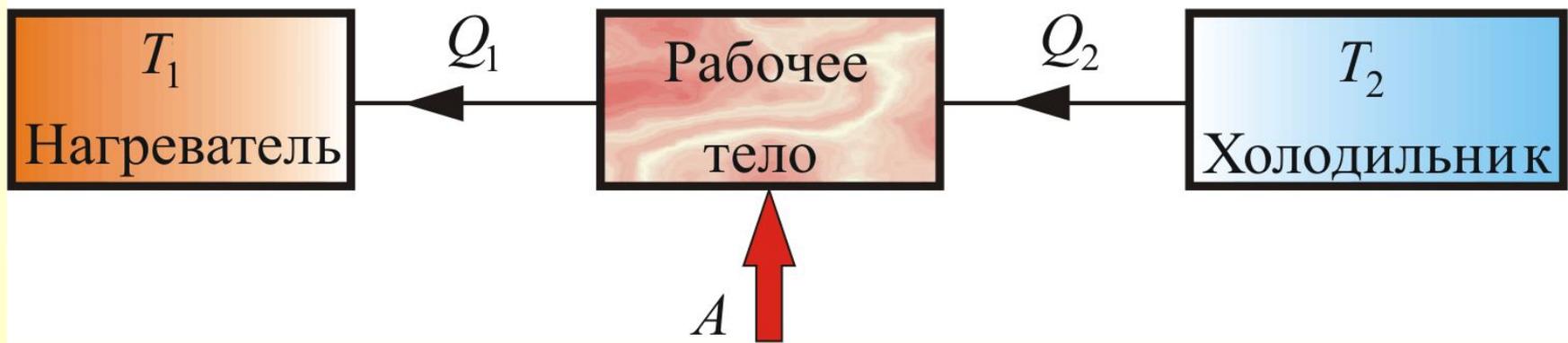
Если проводить цикл в обратном направлении, **тепло** будет забираться у холодильника и передаваться нагревателю (за счет работы внешних сил).





Обратный цикл
Карно можно
рассмотреть на
примере

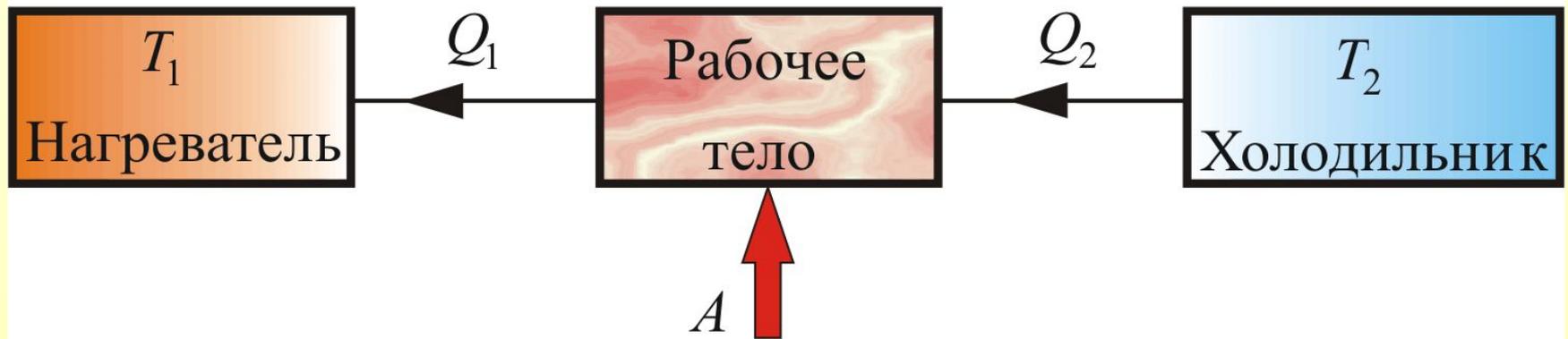
При изотермическом сжатии $B-A$ от газа отводится количество теплоты Q_1 при T_1 . В процессе $D-C$ – изотермического расширения к газу подводится количество теплоты Q_2 .



В этом цикле $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$ и работа, совершаемая над газом – отрицательна, т.е.

$$A = (Q_1 + Q_2) < 0.$$

Если рабочее тело совершает обратный цикл, то при этом можно переносить энергию в форме тепла от холодного тела к горячему за счет совершения внешними силами работы.



КПД *для холодильных машин Карно*

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

