

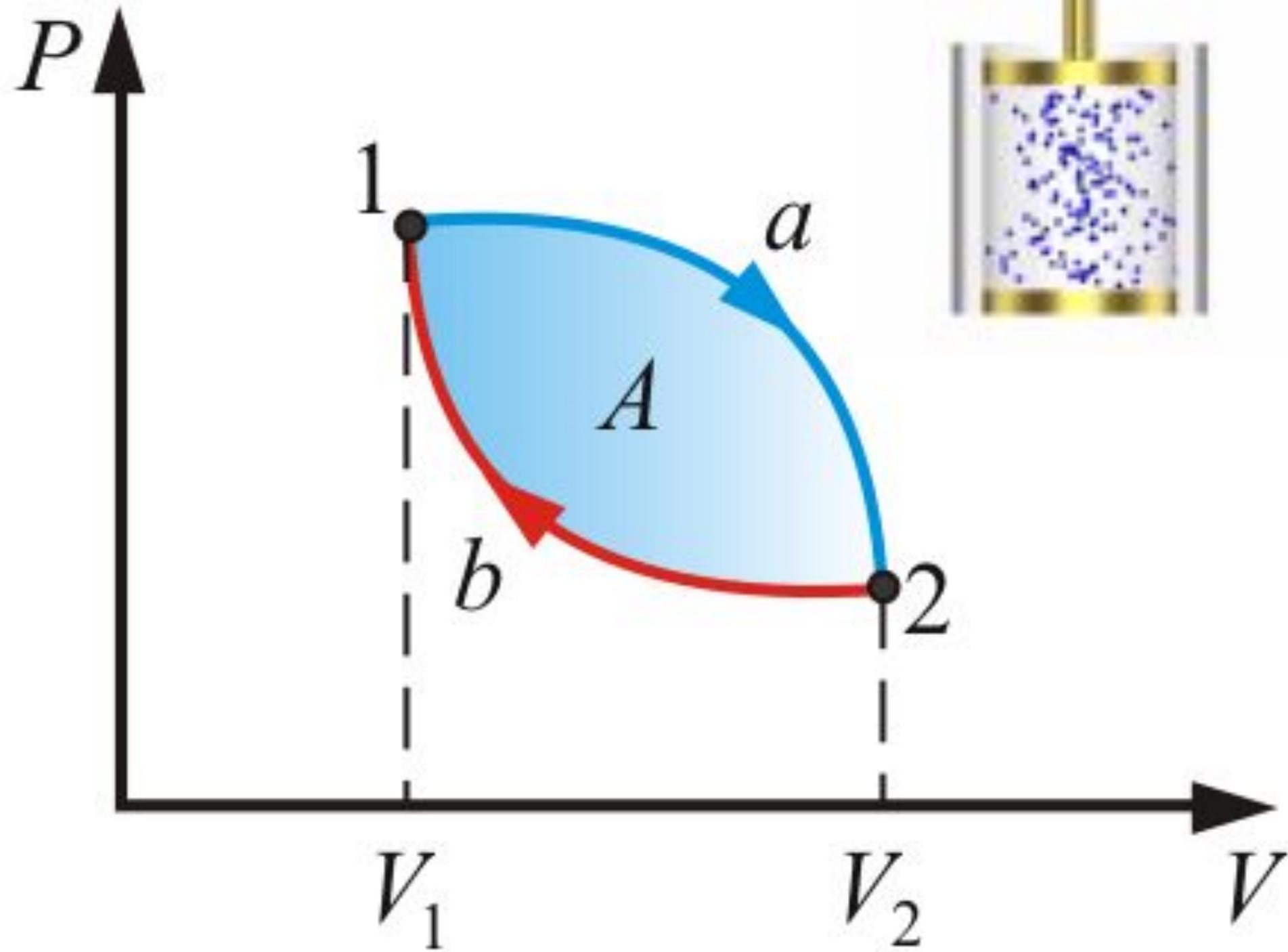
# Второй закон термодинамики, понятие о циклах и энтропии газа

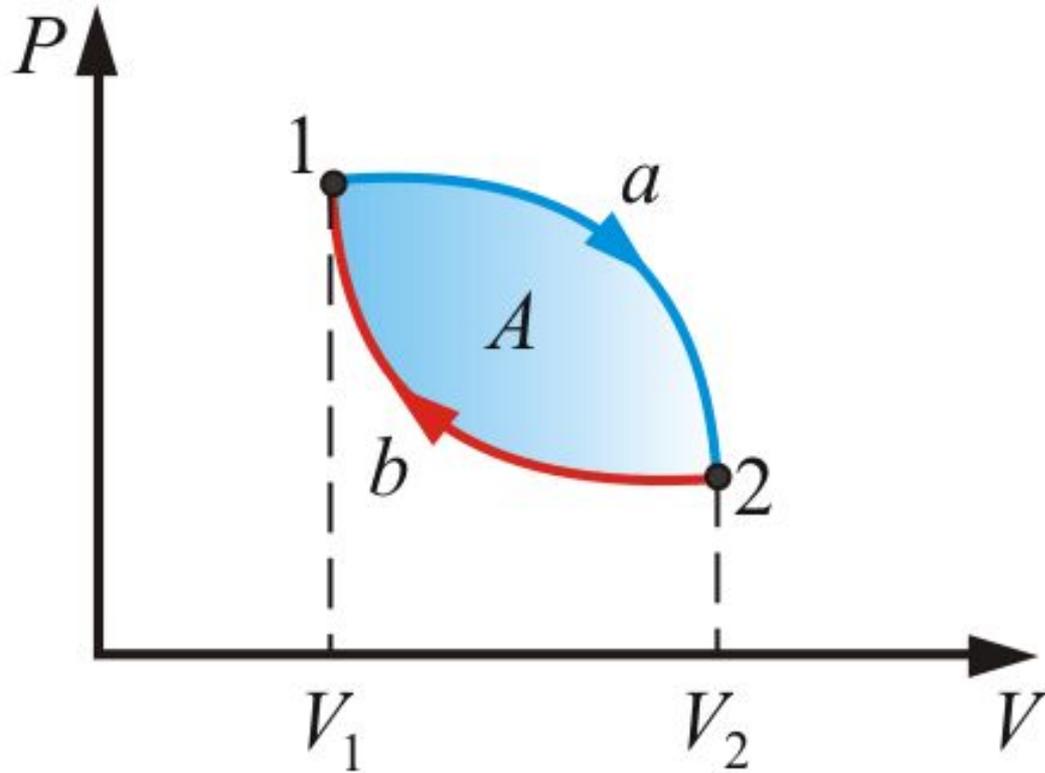
1. Понятие о круговом процессе
2. Понятие об энтропии газа
3. Цикл Карно и его термодинамическое значение
4. Понятие о TS-диаграмме

## 2. КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС

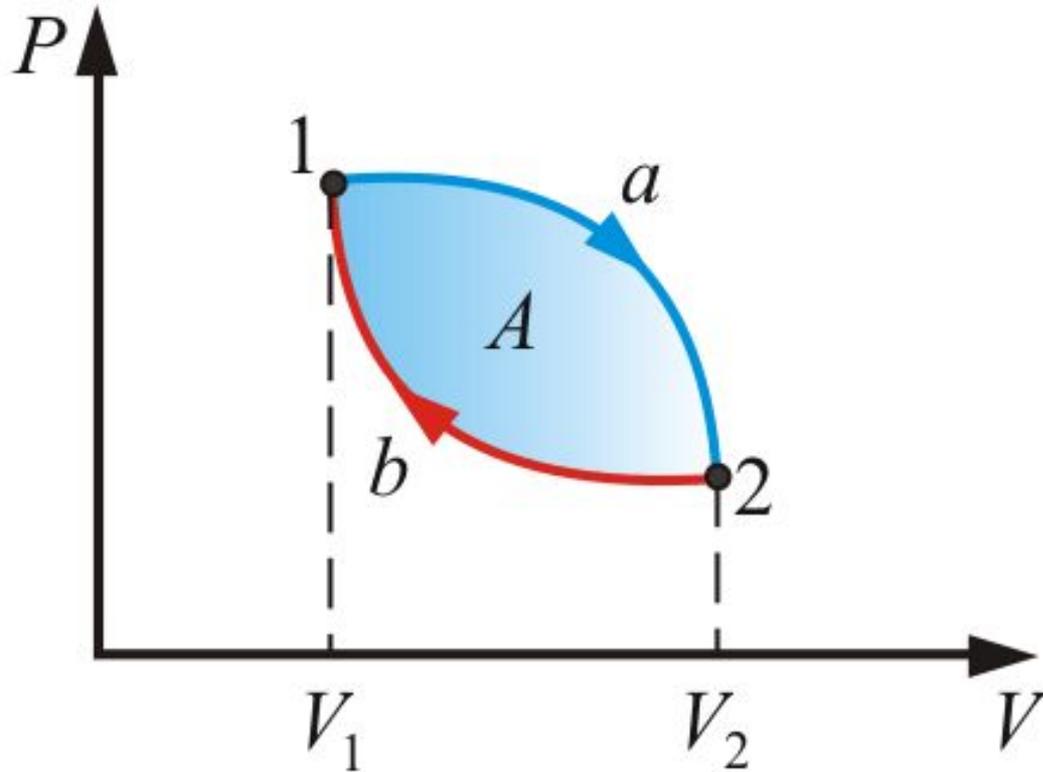
**Круговым процессом (циклом) называется процесс, в результате которого система после ряда изменений возвращается в исходное состояние.**

Изменение внутренней энергии за цикл равно нулю .





В диаграммах состояния  $P$ ,  $V$  и других круговые процессы изображаются в виде замкнутых кривых. Это связано с тем, что в любой диаграмме **два тождественных состояния** (начало и конец кругового процесса) изображаются одной и той же точкой на плоскости.



Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы:

**расширения (1 – 2)**

**сжатия (2 – 1) газа**

**Работа расширения (1a2V<sub>2</sub>V<sub>1</sub>1) -  
положительна (dV > 0)**

**Работа сжатия (2b1V<sub>1</sub>V<sub>2</sub>2) -  
отрицательна (dV < 0).**

Работа, совершаемая за цикл, определяется площадью, охватываемой кривой

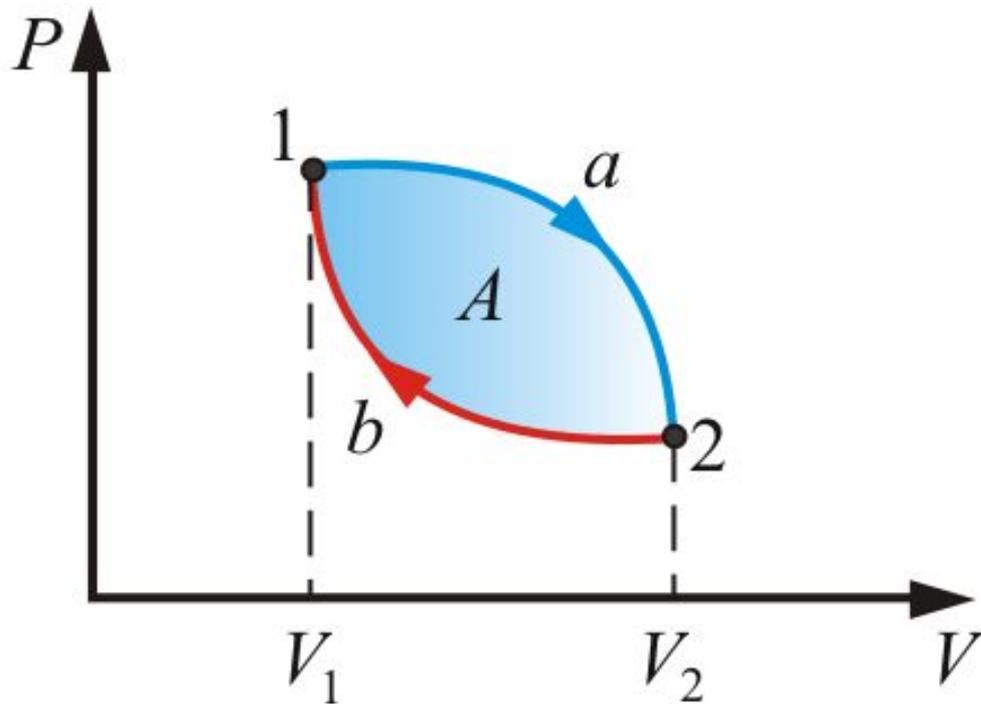
Если за цикл совершается положительная работа  
(цикл протекает по часовой стрелке), то он называется **прямым**

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

Если за цикл совершается отрицательная работа

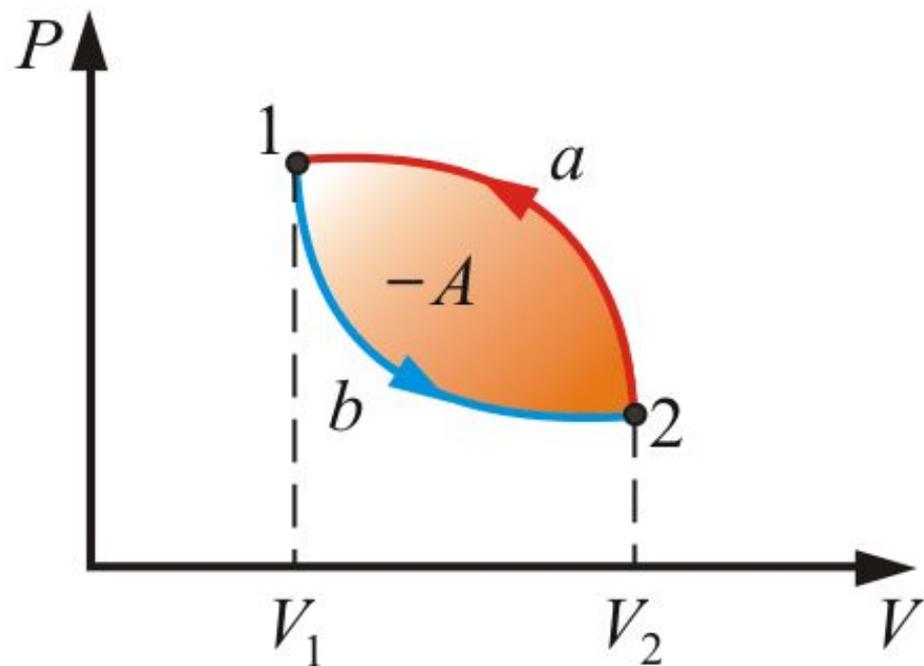
$$A = \oint P dV < 0$$

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



Прямой цикл

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



Обратный цикл

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

цикл

Круговые процессы лежат в основе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, паровых и холодильных машин и т. д.

*В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю:  $dU = 0$*

*Тогда первое начало термодинамики для кругового процесса*

$$Q = \Delta U + A = A$$

$$Q = A$$

Т.о. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты.

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.

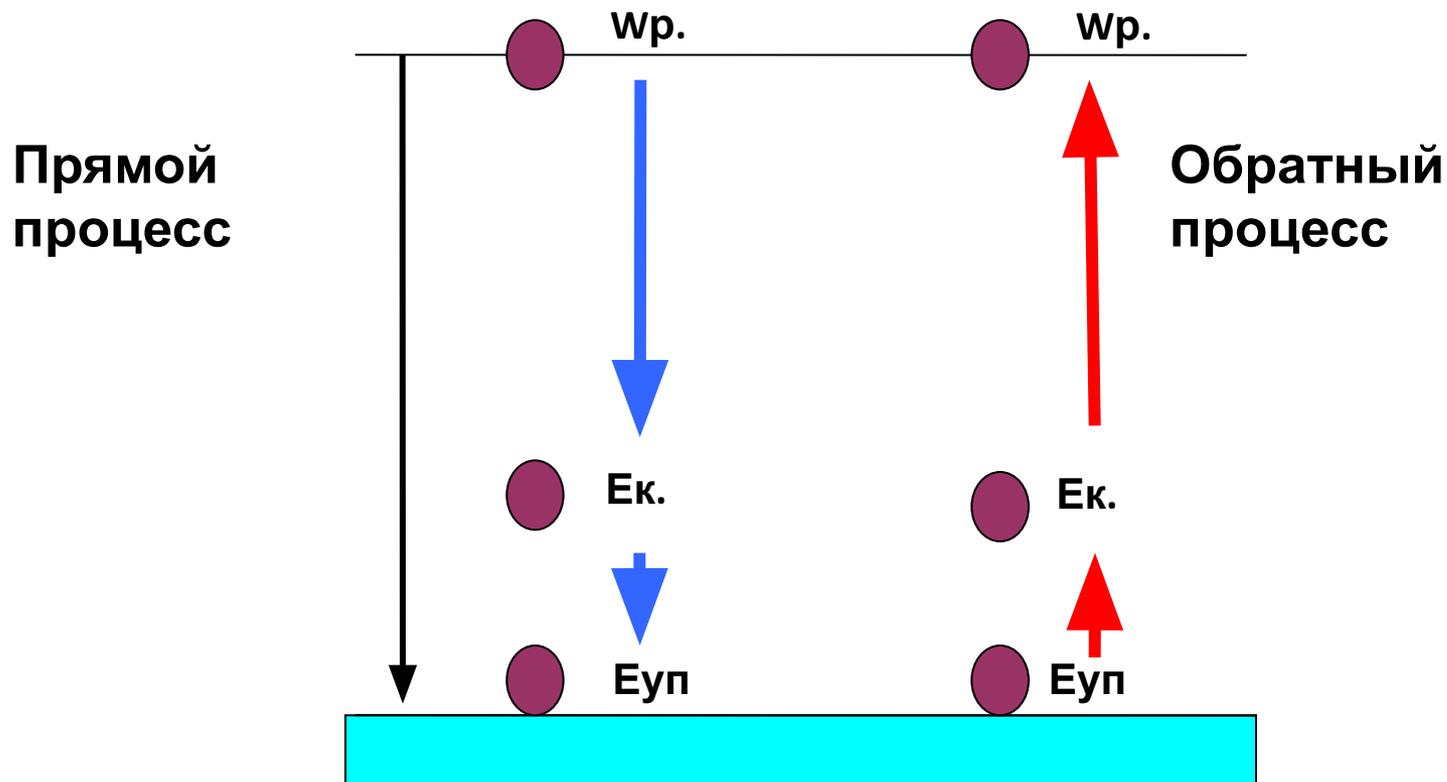
**Процесс называют обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.**

После проведения кругового обратимого процесса никаких изменений в среде, окружающей систему, не произойдет.

При этом под средой понимается совокупность всех не входящих в систему тел, с которыми система непосредственно взаимодействует.

# Пример обратимого процесса в механике

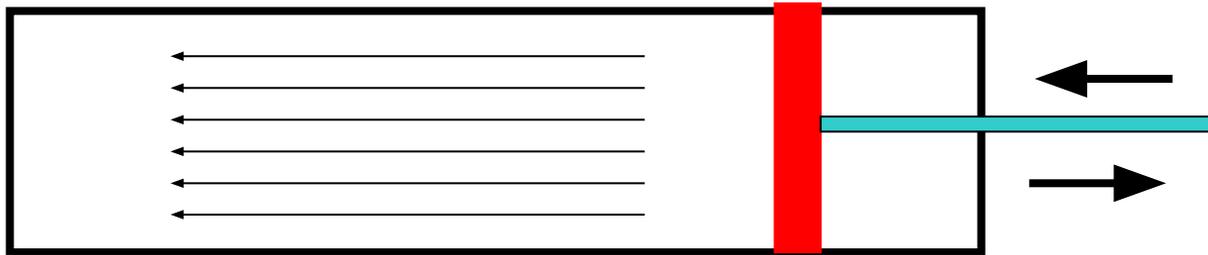
Падение упругого шарика на идеальную упругую плиту



## *Но при сжатии и расширении газа*

Быстро вдвигая и выдвигая поршень, получают распространение изменения давления в одном и том же направлении: от поршня!!!

При медленном движении поршня процесс будет обратимым



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

Нельзя осуществить необратимый круговой процесс, чтобы нигде в окружающей среде не осталось никаких изменений.

**Свойством обратимости обладают только равновесные процессы.**

Каждое промежуточное состояние является состоянием термодинамического равновесия, нечувствительного к тому, идет ли процесс в прямом или обратном направлении.

Например, **обратимым можно считать процесс адиабатического расширения или сжатия газа.**

При адиабатическом расширении газа условие теплоизоляции системы исключает непосредственный теплообмен между системой и средой. Поэтому, производя *адиабатическое расширение газа*, а затем *сжатие*, можно вернуть газ в исходное состояние так, что в окружающей среде никаких изменений не произойдет.

Конечно, в реальных условиях и в этом случае всегда имеется некоторая необратимость процесса, обусловленная, например, несовершенством теплоизоляции, трением при движении поршня и т.д.

Только в обратимых процессах теплота используется по назначению, не расходуется зря.

Если процесс неравновесный, то будет необратимый переход, т.е. часть энергии уйдет (необратимо).

**Максимальным КПД обладают машины у которых только обратимые процессы.**

**Реальные процессы** сопровождаются **диссипацией энергии** (из-за трения, теплопроводности и т.д.), которая нами не рассматривается.

**Обратимые процессы** – это в какой-то степени **идеализация реальных процессов**. Их рассмотрение важно по двум причинам:

- многие процессы в природе и технике практически обратимы;
- обратимые процессы являются наиболее экономичными и приводят к максимальному значению термического коэффициента полезного действия тепловых двигателей.

## 2. ПОНЯТИЕ ОБ ЭНТРОПИИ

Энтропия – функция состояния термодинамической системы.

Количественно изменение энтропии равно приведённой теплоте процесса.

$$\frac{\delta Q}{T} = dS$$

Тогда

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Применяя первое начало термодинамики, получим

$$\frac{\delta Q}{T} = \frac{\nu C_V dT}{T} + \frac{\nu RT}{V} dV$$

Таким образом, можно вычислить изменение энтропии для различных процессов.

Для адиабатного процесса  $dS = 0$ , то есть  $S = \text{const}$ . Поэтому адиабатный процесс является изоэнтропийным.

Физический смысл энтропии устанавливается в статистической физике.

Закон Больцмана:

$$S = k \ln W$$

$W$  – термодинамическая вероятность  
данного состояния системы.

Это - число различных микросостояний,  
соответствующих данному  
макросостоянию, иначе  $W$  называется  
статистическим весом данного  
макросостояния

$k$  – постоянная Больцмана

# 3. Второй закон термодинамики

# Второе начало термодинамики

- Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача теплоты от тела холодного к телу горячему. (Р. Клаузиус, 1850 г.)
- Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт охлаждения теплового резервуара (В. Томсон (лорд Кельвин), 1851 г.)
- Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счёт охлаждения теплового резервуара (Планк)
- Невозможен вечный двигатель второго рода (т.е. двигатель, работающий только за счёт охлаждения теплового резервуара). (В. Оствальд)

# 4. Цикл Карно и его термодинамическое значение

# Тепловые машины

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

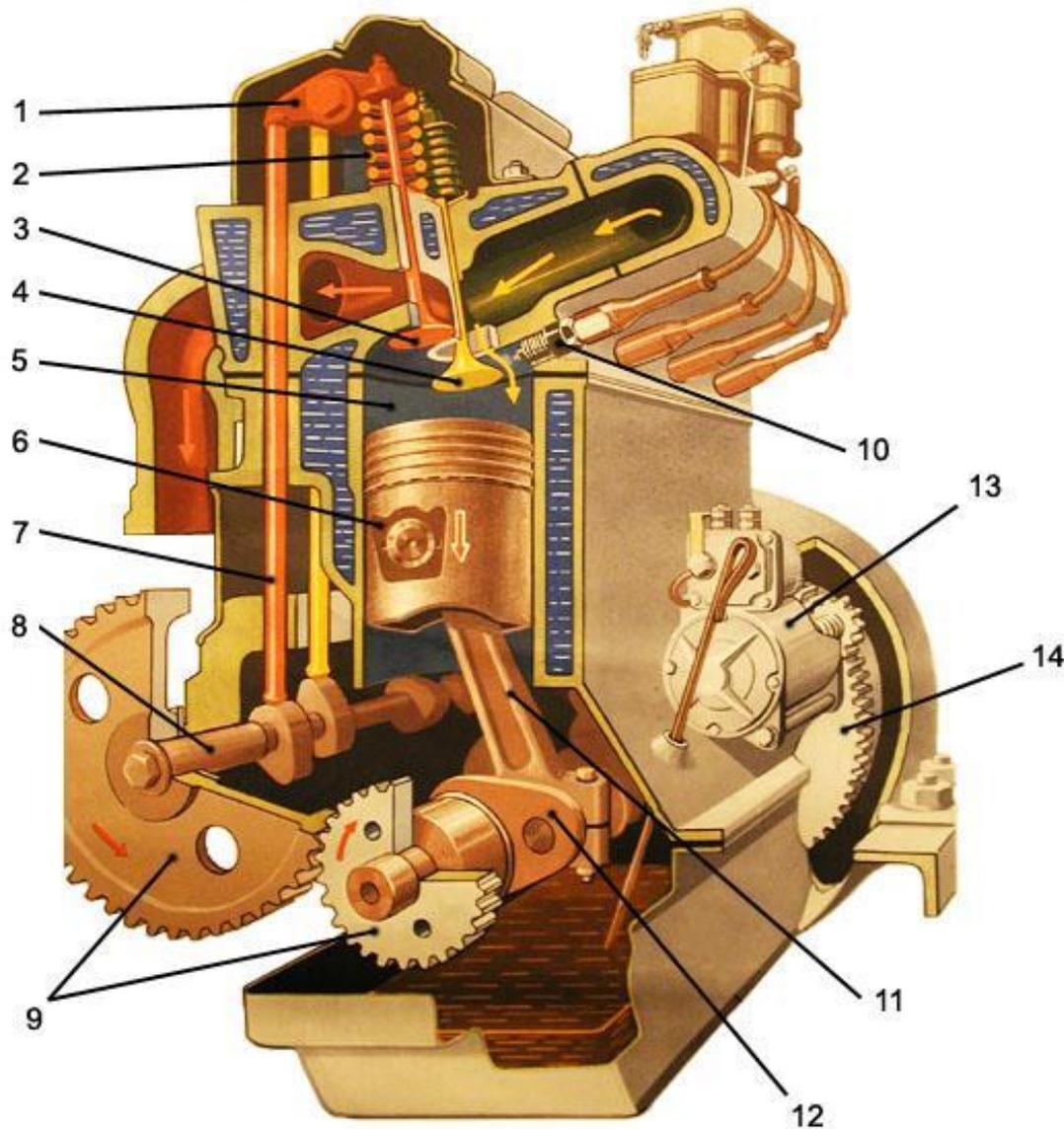
# Принцип действия тепловых двигателей



# Реактивный двигатель

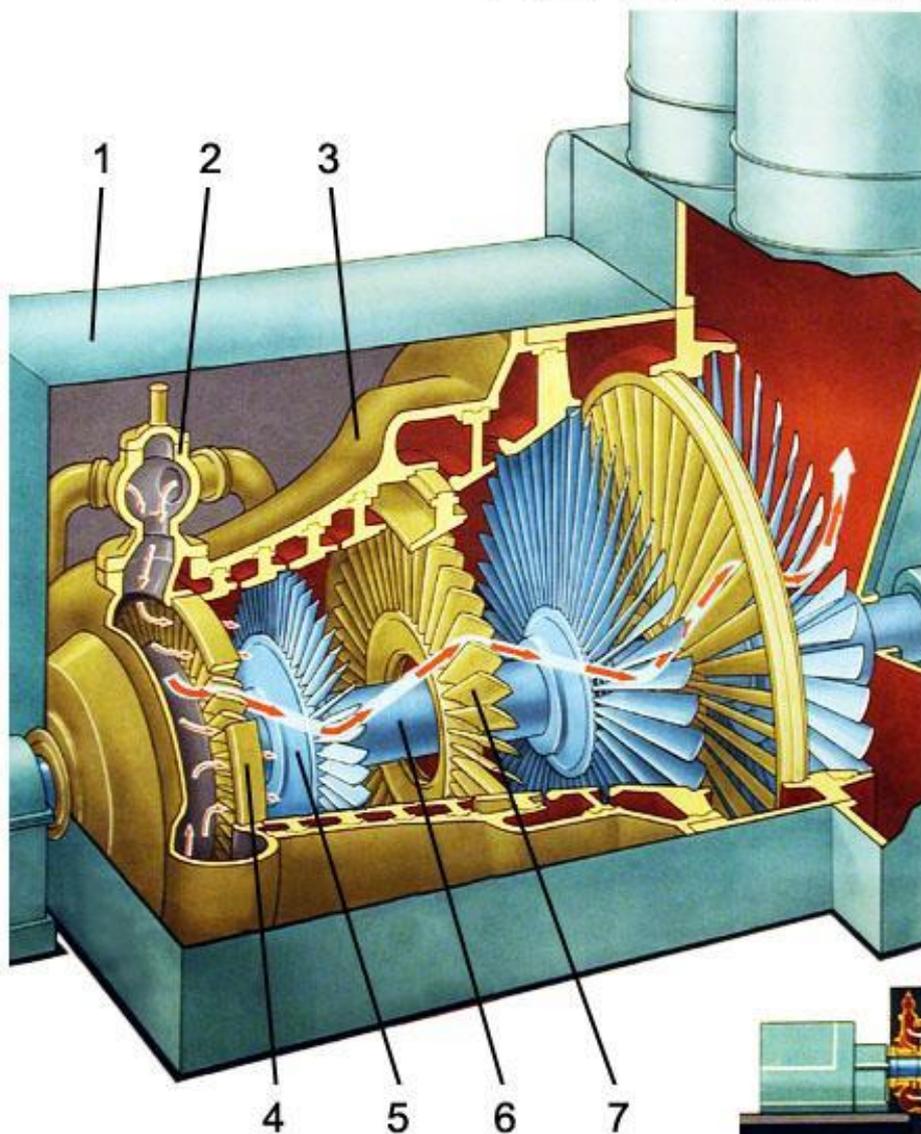


# ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

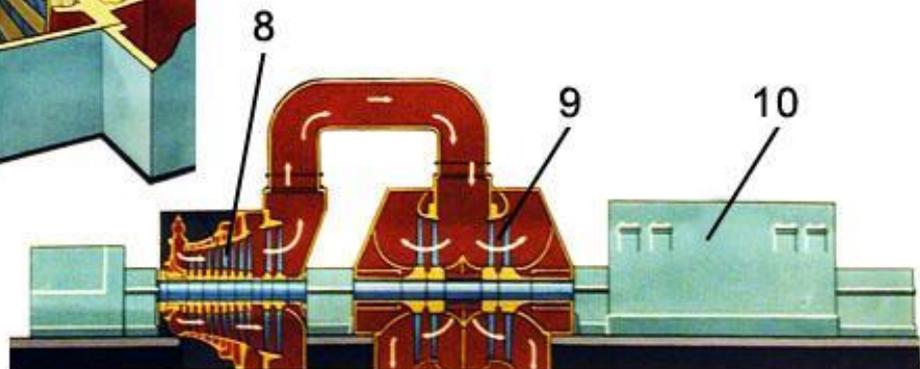


1. Коромысло
2. Пружина клапана
3. Выпускной клапан
4. Впускной клапан
5. Цилиндр
6. Поршень
7. Штанга
8. Распределительный вал
9. Распределительные шестерни
10. Свеча
11. Шатун
12. Коленчатый вал
13. Стартер
14. Маховик

# 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

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

$\eta$  – коэффициент полезного действия  
(КПД) теплового двигателя

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

$Q$  – общее количество теплоты,  
полученное двигателем, Дж

# КПД тепловых двигателей

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

*КПД* – коэффициент полезного действия  
теплового двигателя

$Q_1$  – количество теплоты, полученное  
рабочим телом от нагревателя

$Q_2$  – количество теплоты, отданное рабочим  
телом холодильнику

# КПД тепловых двигателей

Двигатель внутреннего сгорания

КПД = 25-30%



# КПД тепловых двигателей

Газовая турбина

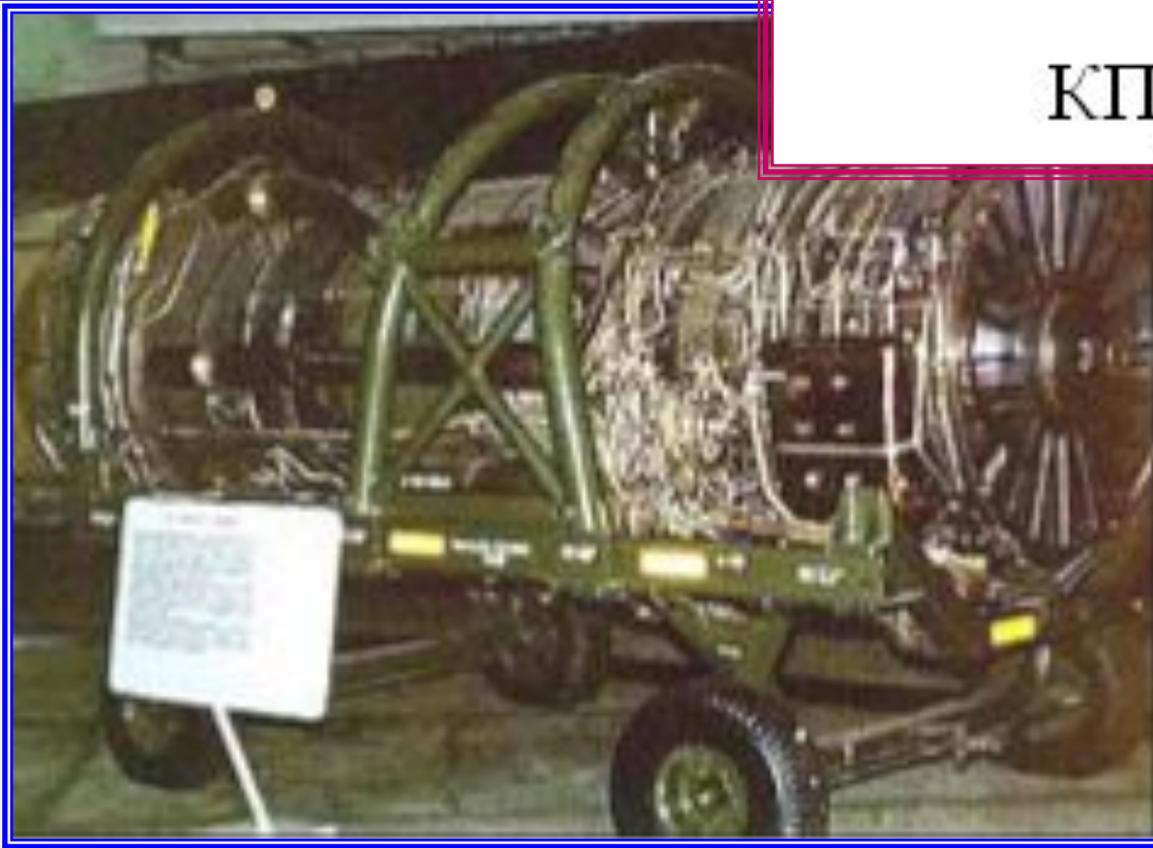
КПД = 25-29%



# КПД тепловых двигателей

Турбореактивный двигатель

КПД = 20-30%



# КПД тепловых двигателей

Паровая турбина

КПД = 25-40%



# КПД тепловых двигателей

Паровая машина

КПД = 15%

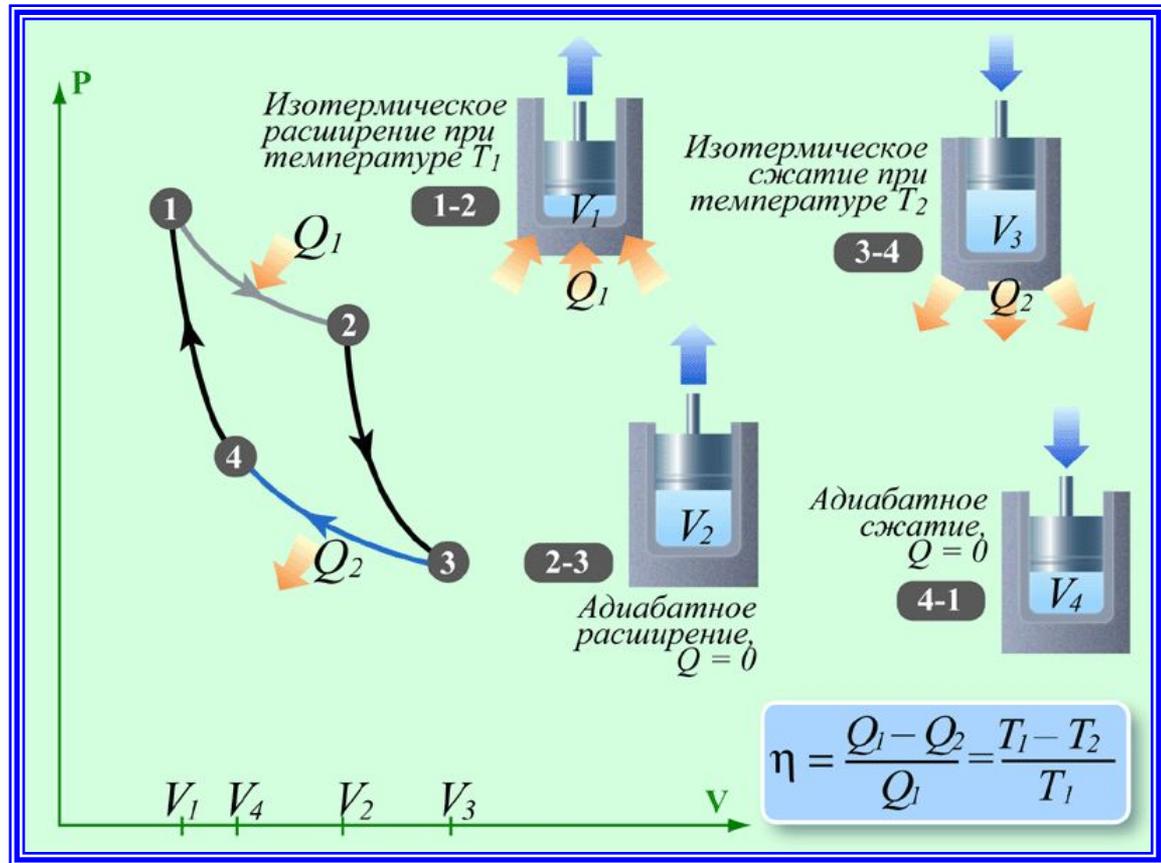


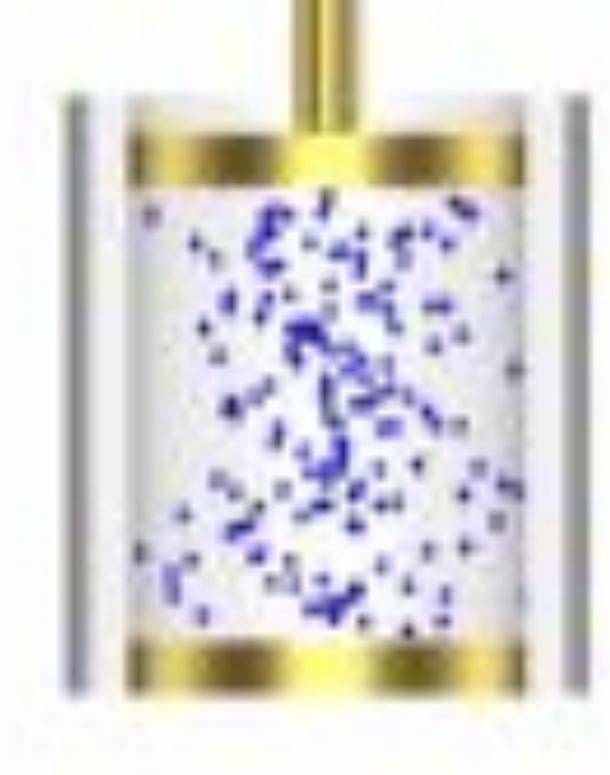
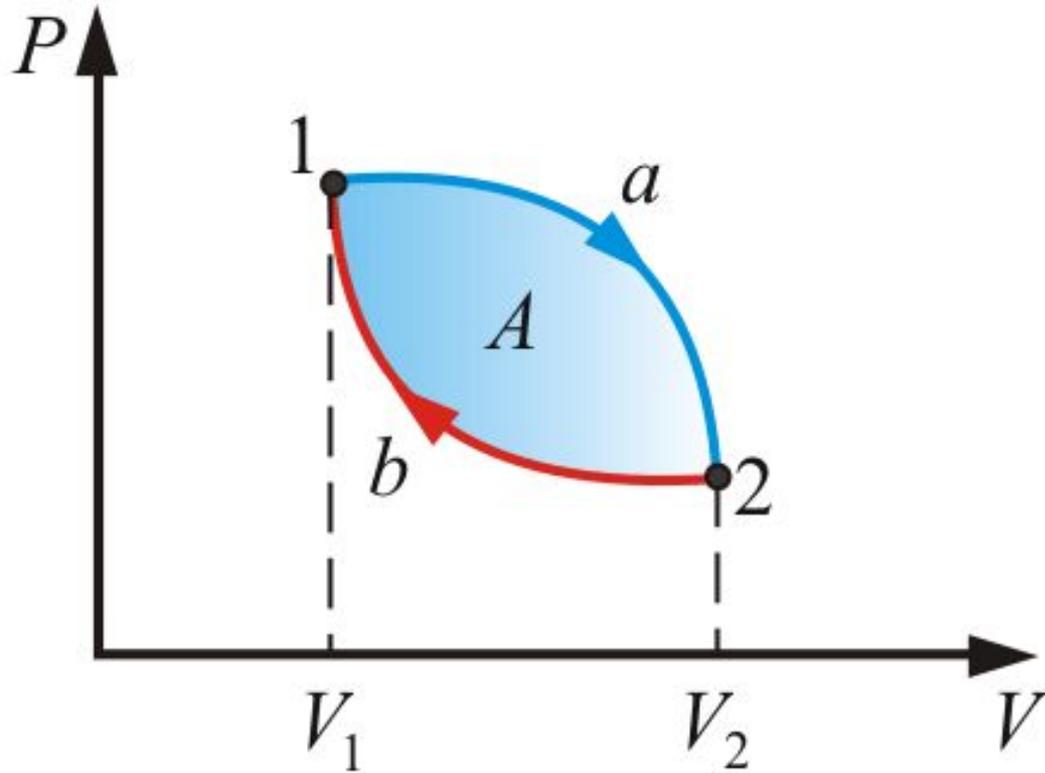
# Идеальная тепловая машина

- 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)



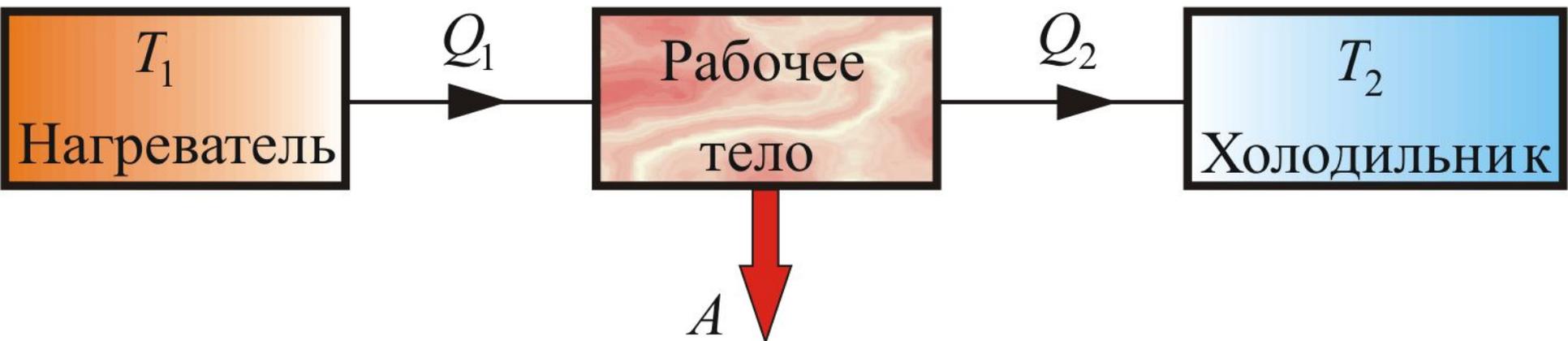


Любая тепловая машина работает по принципу кругового (циклического) процесса, т.е. возвращается в исходное состояние.

Но чтобы при этом была совершена полезная работа, возврат должен быть произведен с наименьшими затратами.

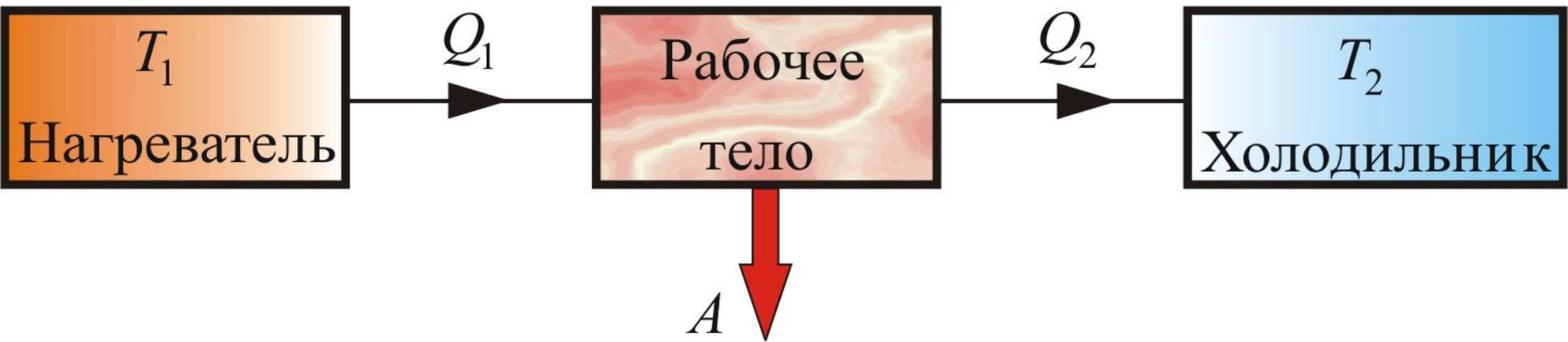
Полезная работа равна разности работ расширения и сжатия, т.е. равна площади, ограниченной замкнутой кривой.

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



Зачем холодильник? Так как в тепловой машине реализуется круговой процесс, то вернуться в исходное состояние можно с меньшими затратами, если отдать часть тепла.

Если охладить пар, то его легче сжать, следовательно, работа сжатия будет меньше работы расширения. Поэтому в тепловых машинах используется холодильник.

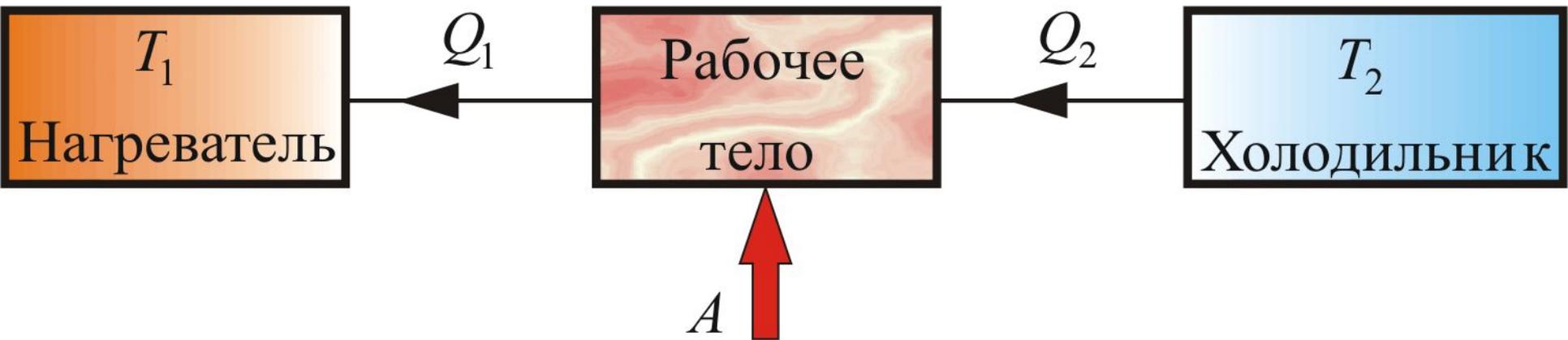


**Прямой цикл используется в тепловом двигателе – периодически действующей тепловой машине, совершающей работу за счет полученной извне теплоты.**

$$A = Q_1 - Q_2$$

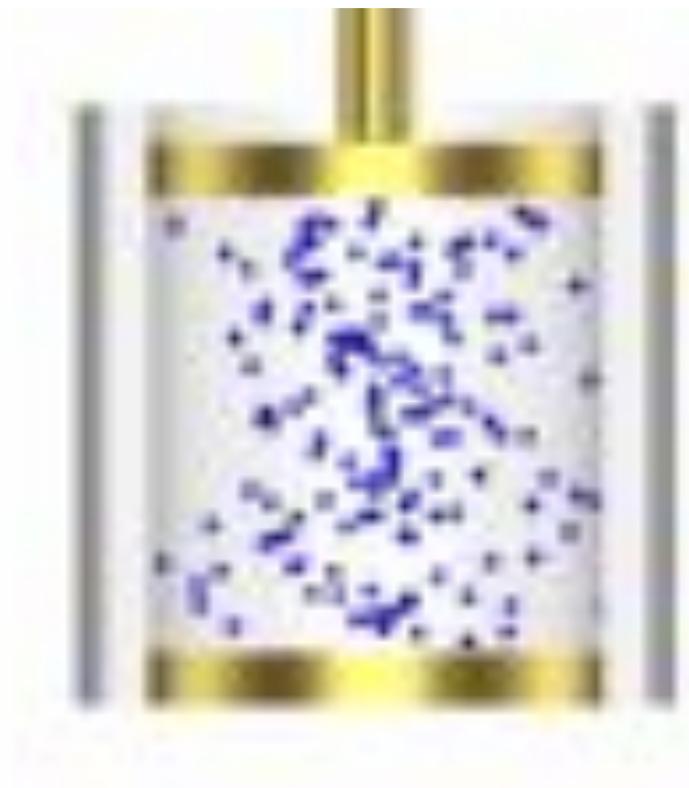
От термостата с более высокой температурой  $T_1$ , называемого нагревателем, за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более низкой температурой  $T_2$ , называемому холодильником, за цикл передается количество теплоты  $Q_2$  и совершается работа  $A$ :

$$A = Q_1 - Q_2$$



**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.**

# Цикл Карно (обратимый)





## **Карно Никола Леонард Сади**

(1796 – 1832) – французский физик и инженер, один из создателей термодинамики. Впервые показал, что работу можно получить в случае, когда тепло переходит от

нагретого тела к более холодному (второе начало термодинамики). Ввел понятие кругового и обратимого процессов, идеального цикла тепловых машин, заложил тем самым основы их теории. Пришел к понятию механического эквивалента теплоты. В 1824 г. опубликовал сочинение «**Размышления о движущей силе огня и о машинах способных развить эту силу**».

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

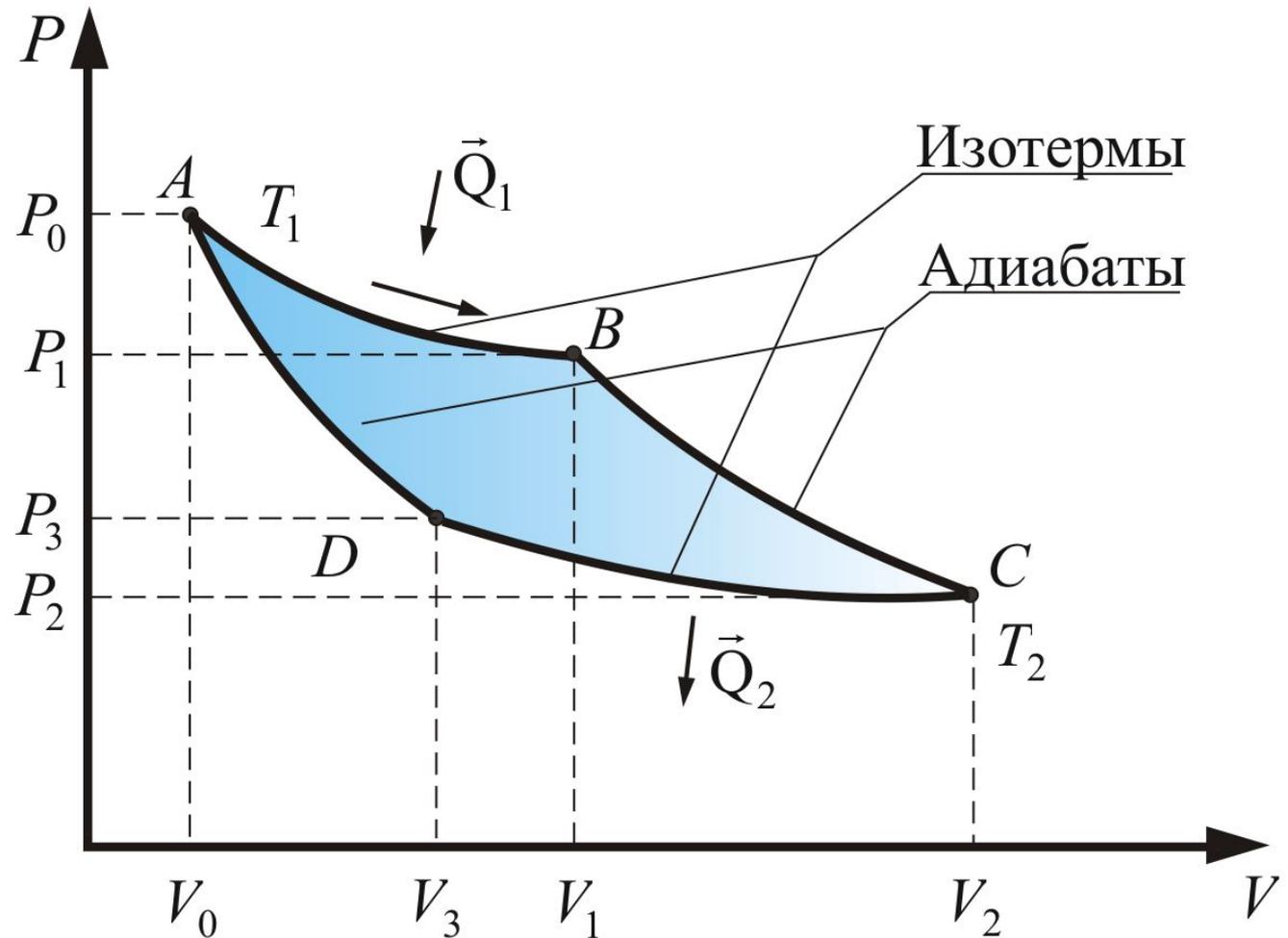
## **ТЕОРЕМА КАРНО**

**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**





Рассмотрим **прямой цикл Карно**, в котором в качестве рабочего тела используется **идеальный газ**, заключенный в **сосуд с подвижным поршнем**.

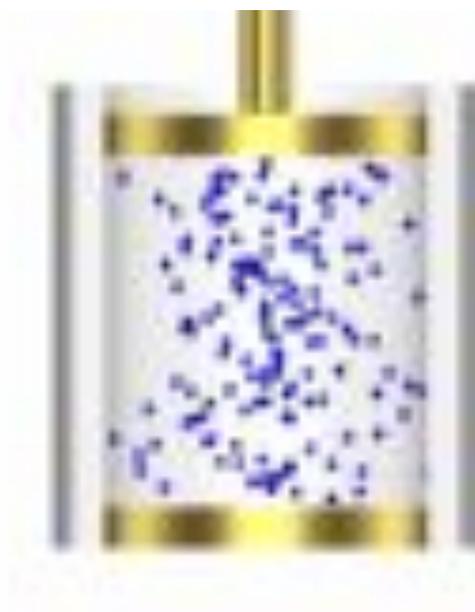
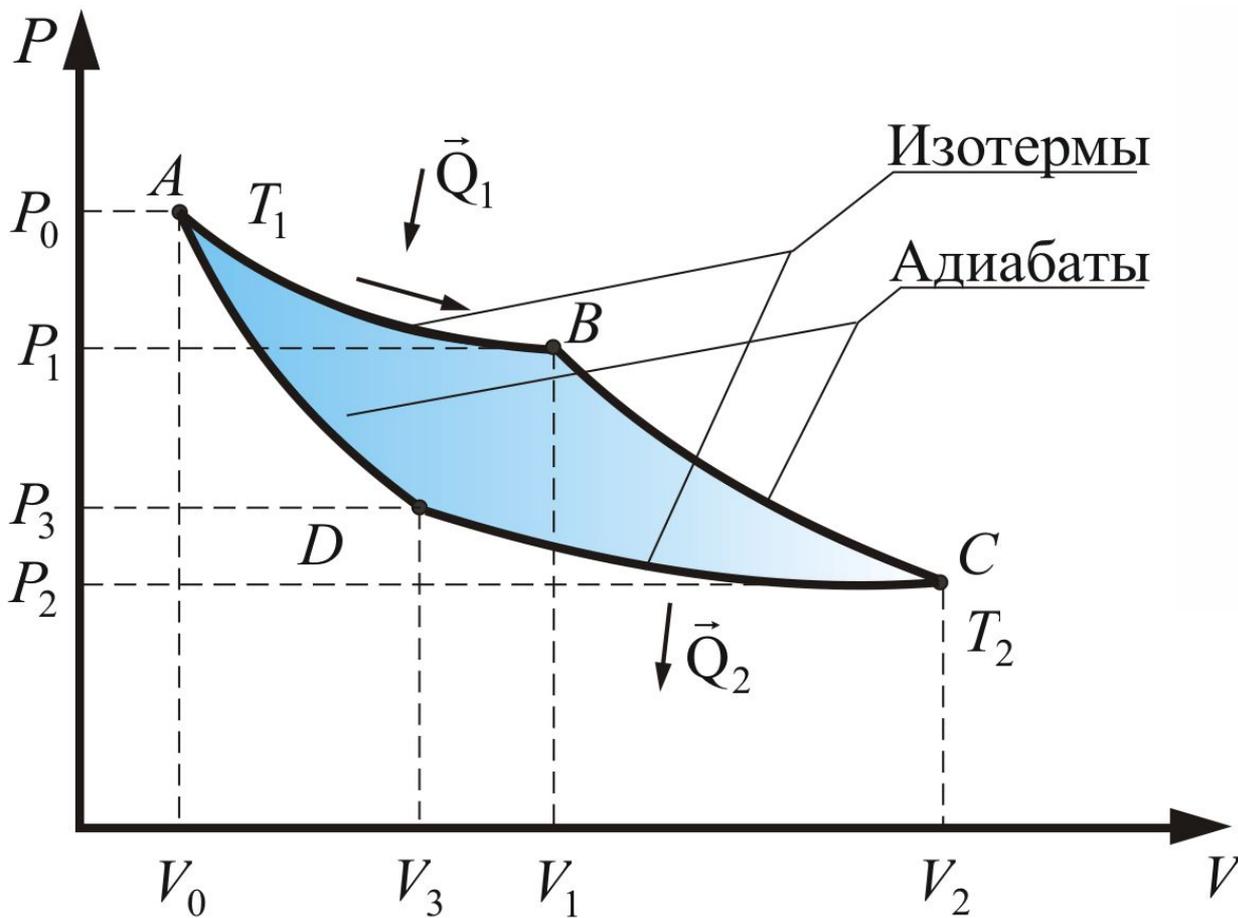
Определим его КПД.

Рассмотрим круговой процесс, при котором тепло можно превратить в работу, притом, наилучшим образом, т.е. чтобы работа была максимальна.

Напомним, что **тепловой машиной** называется периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет, получаемого извне тепла и имеющего нагреватель, холодильник и рабочее тело.

Будем считать, что **нагреватель и холодильник имеют бесконечную теплоемкость, т.е. их температуры не изменяются** в процессе передачи тепла.

# Работа и КПД цикла Карно



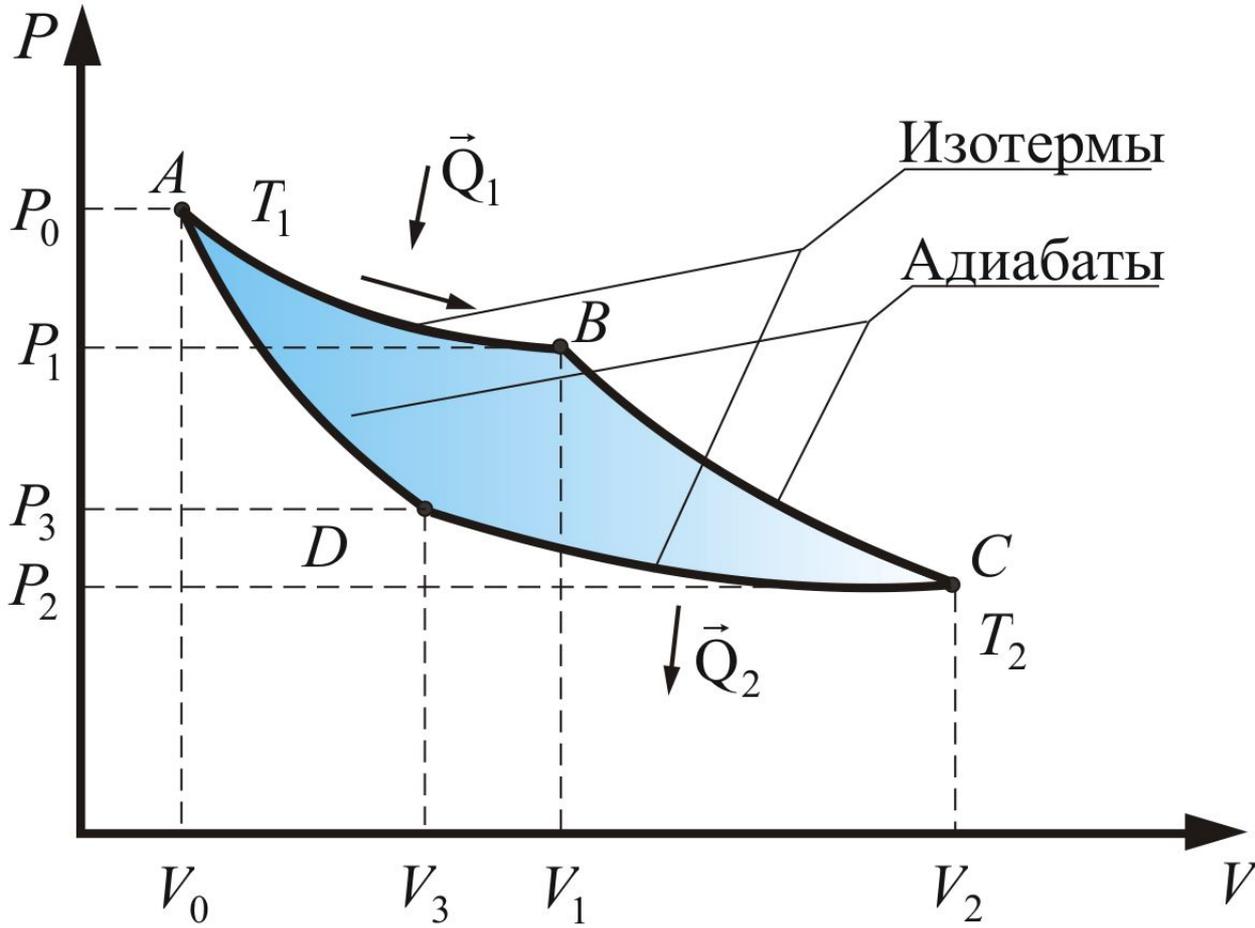
Рассмотрим процесс сначала качественно. Начнем процесс из т. А. Газ сжат до давления  $P_0$  и находится в контакте с нагревателем при  $T_1$ .  
Расширение газа при каком процессе даст максимальную работу? Вспомним закон сохранения энергии в термодинамике, или **I начало**:

$$dQ = dU + dA.$$

В изотермическом процессе  $dU = 0$ ,  
значит *все тепло перейдет в работу*:

$$dQ = dA$$

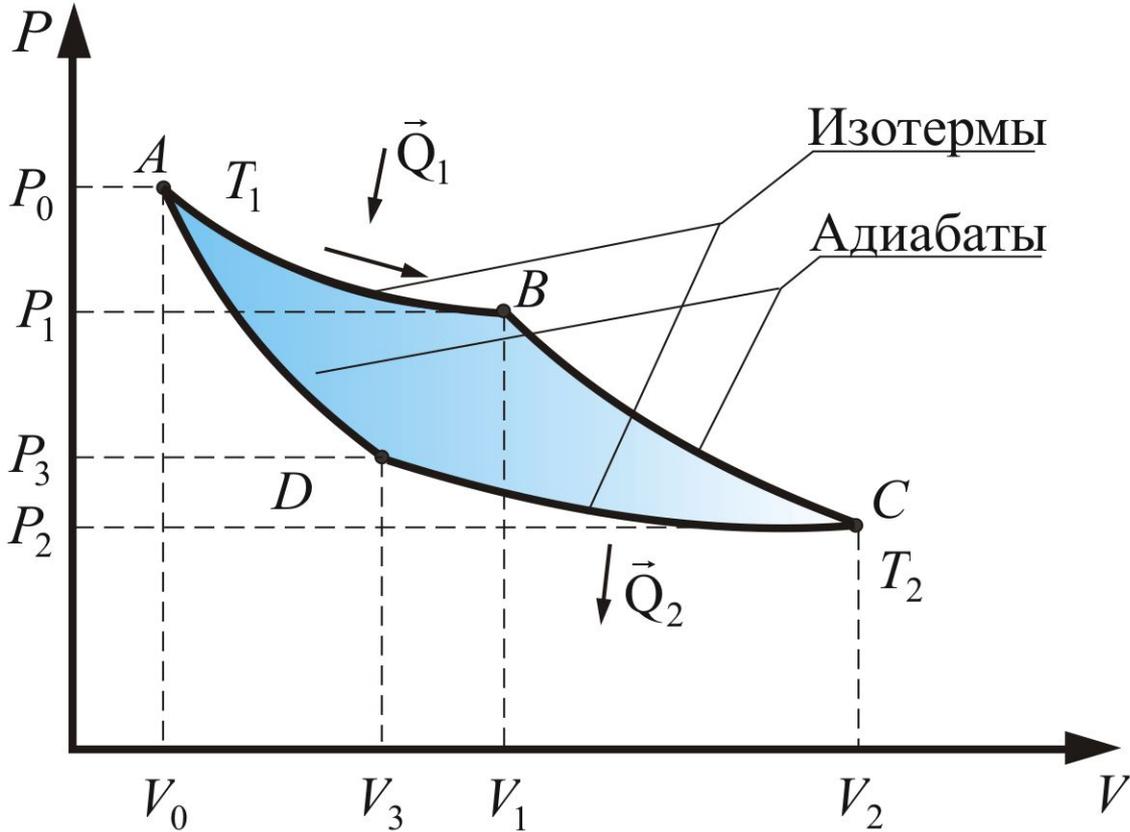
Итак, на участке ***AB – изотермическое расширение при температуре  $T_1$***   
(процесс теплопередачи не происходит, т. к. нет разности температур, не происходит и передача тепла без совершения работы, т.е. процесс обратимый)



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



$$A_1 = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2} = Q_1,$$



Полученное рабочим телом тепло нужно передать холодильнику. Но если просто привести его к соприкосновению с холодильником, то произойдет передача тепла без совершения работы.

Нужно сначала **рабочее тело охладить до  $T_2$** , а затем, уже присоединять к холодильнику.

**Охлаждение без затрат тепла – это адиабатическое расширение – участок BC**

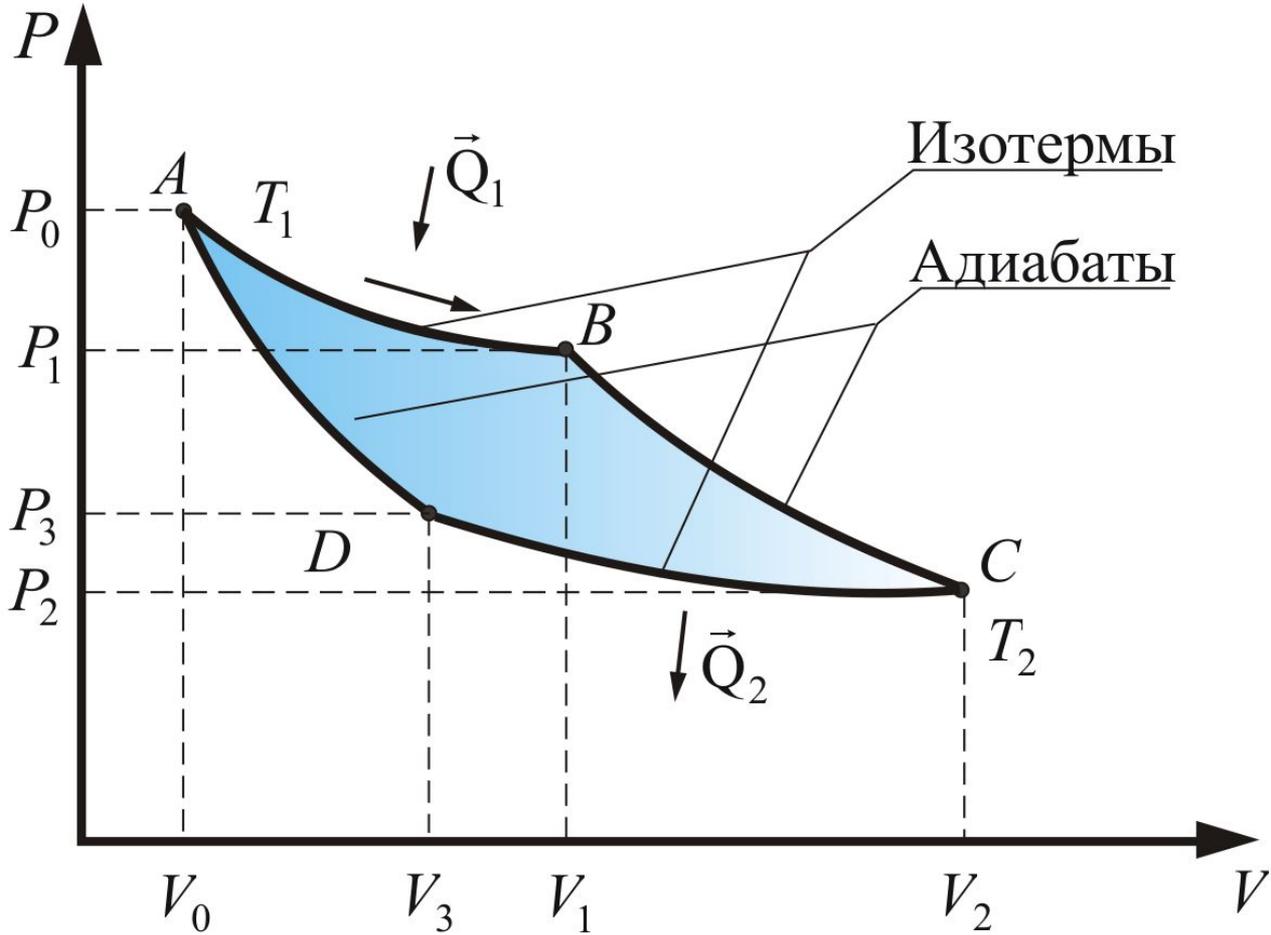
## Процесс В-С – адиабатическое расширение.

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  $\gamma$  – коэффициент Пуассона

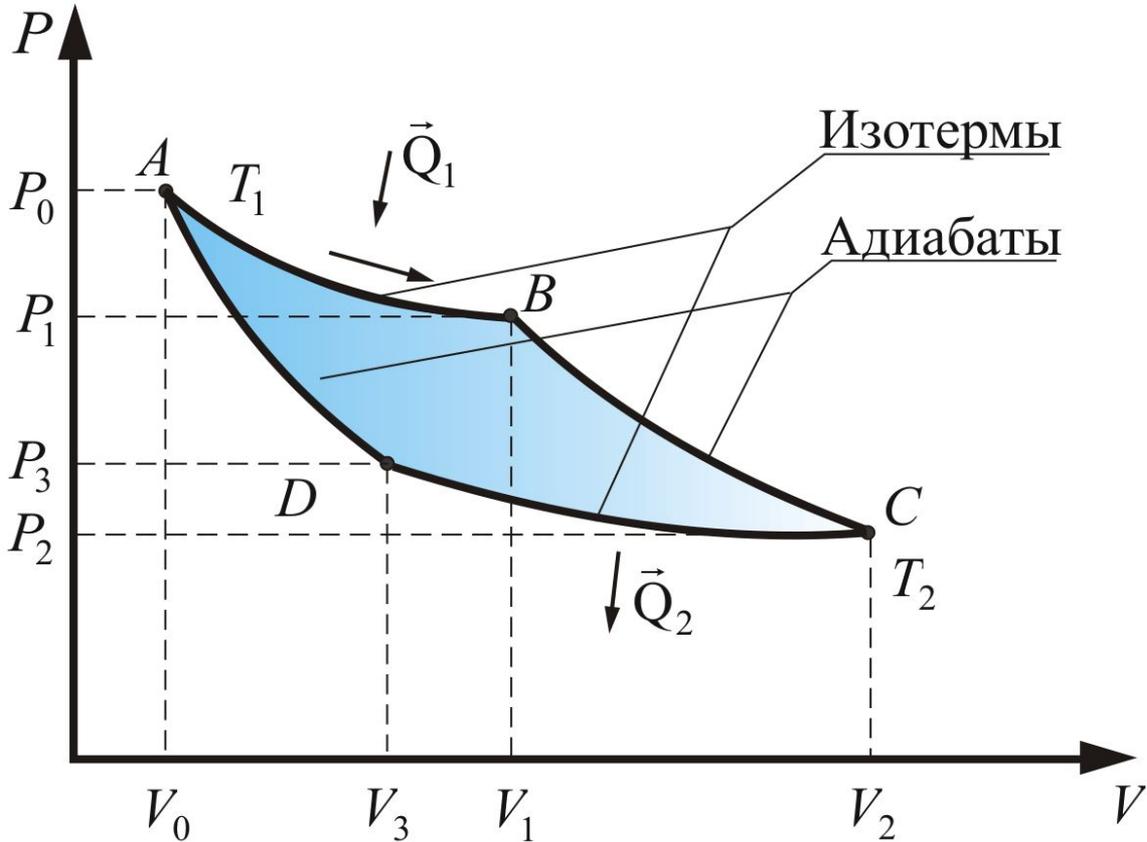
$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$



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

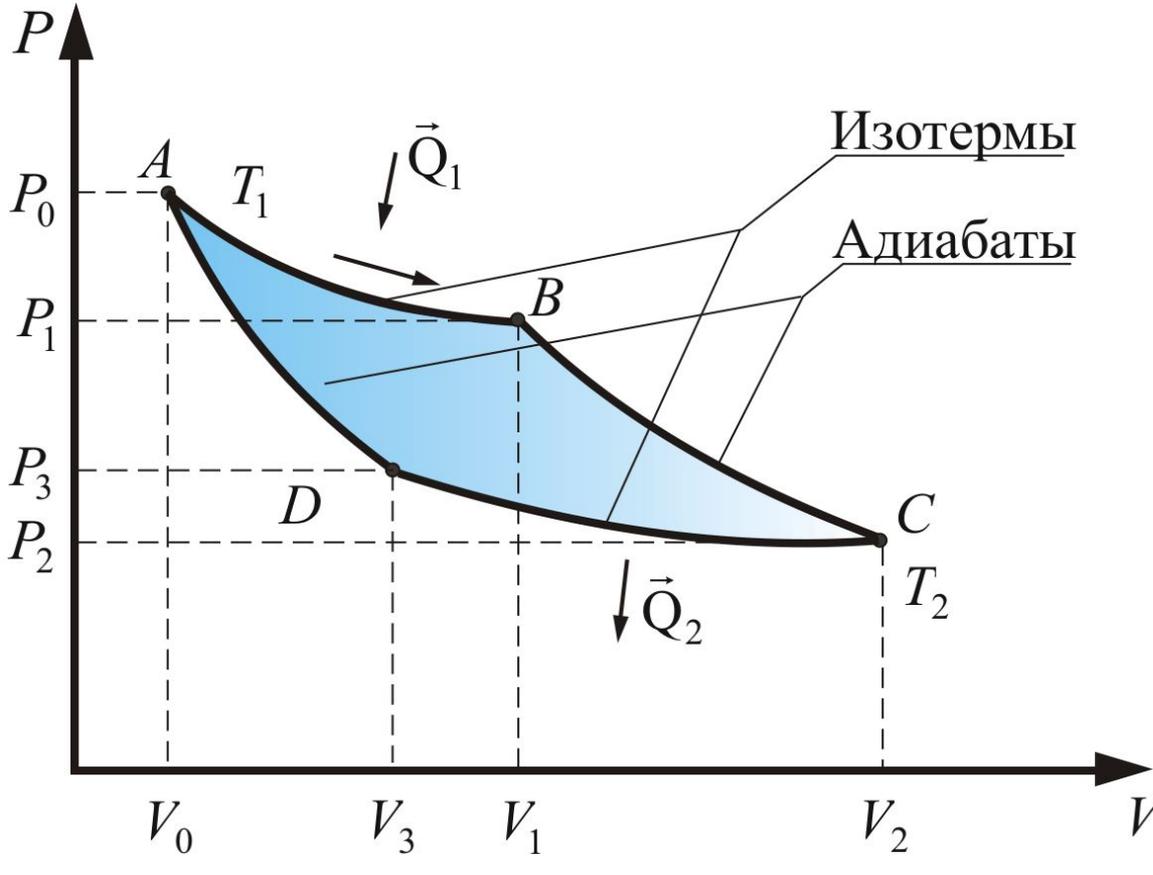


$$A_2 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2)$$



**Адиабатическим расширением ВС заканчивается первая половина цикла — совершение полезной работы.**

**Возвращение в т. А опять происходит в два этапа: сначала рабочее тело сжимают не прерывая контакта с холодильником, при этом холодильнику отдается тепло  $Q_2$  (изотермическое сжатие CD).**



Затем тело  
 изолируют от  
 холодильника,  
 адиабатно  
 сжимают (DA),  
 при этом  
 температура его  
 повышается до  
 $T_1$

Почему рабочее тело нагревается?

**При адиабатическом сжатии (DA)** тело  
 нагревается за счет внешней работы, совершенной  
 над ним.

## Процесс C-D -изотермическое сжатие

На третьем этапе газ изотермически сжимается  $V_2$  до  $V_3$  отдавая теплоту  
Теплота  $Q_2$ , отданная газом холодильнику при изотермическом сжатии, равна  
работе сжатия  $A_3$

**Работа сжатия  $A_3$  - это работа совершаемая над газом (отрицательная):**

$$A_3 = -RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_2$$

где  $Q_2$  – тепло, отданное холодильнику.

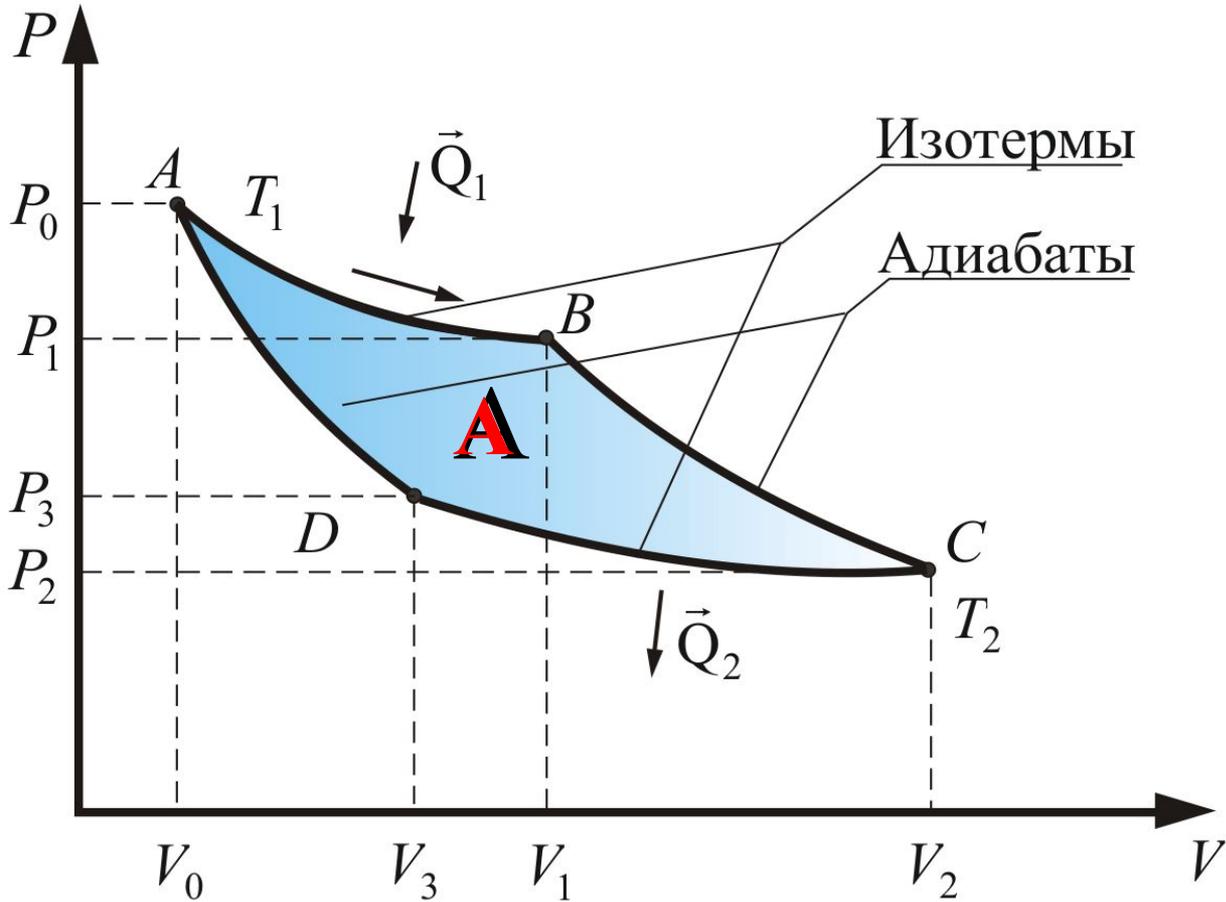
## Процесс D-A – адиабатическое сжатие.

Работа сжатия на последнем этапе D-A:

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

тогда общая работа цикла:

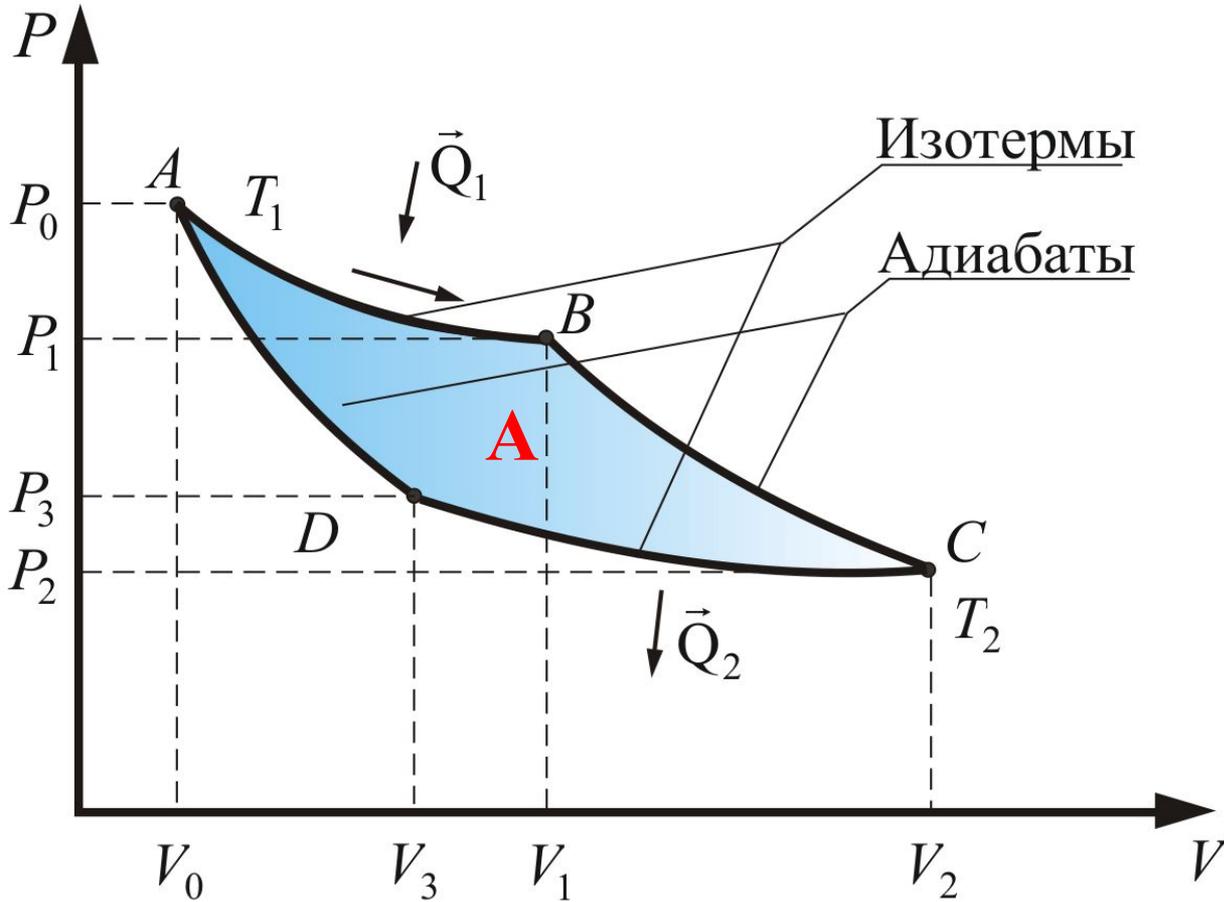
$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$



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

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

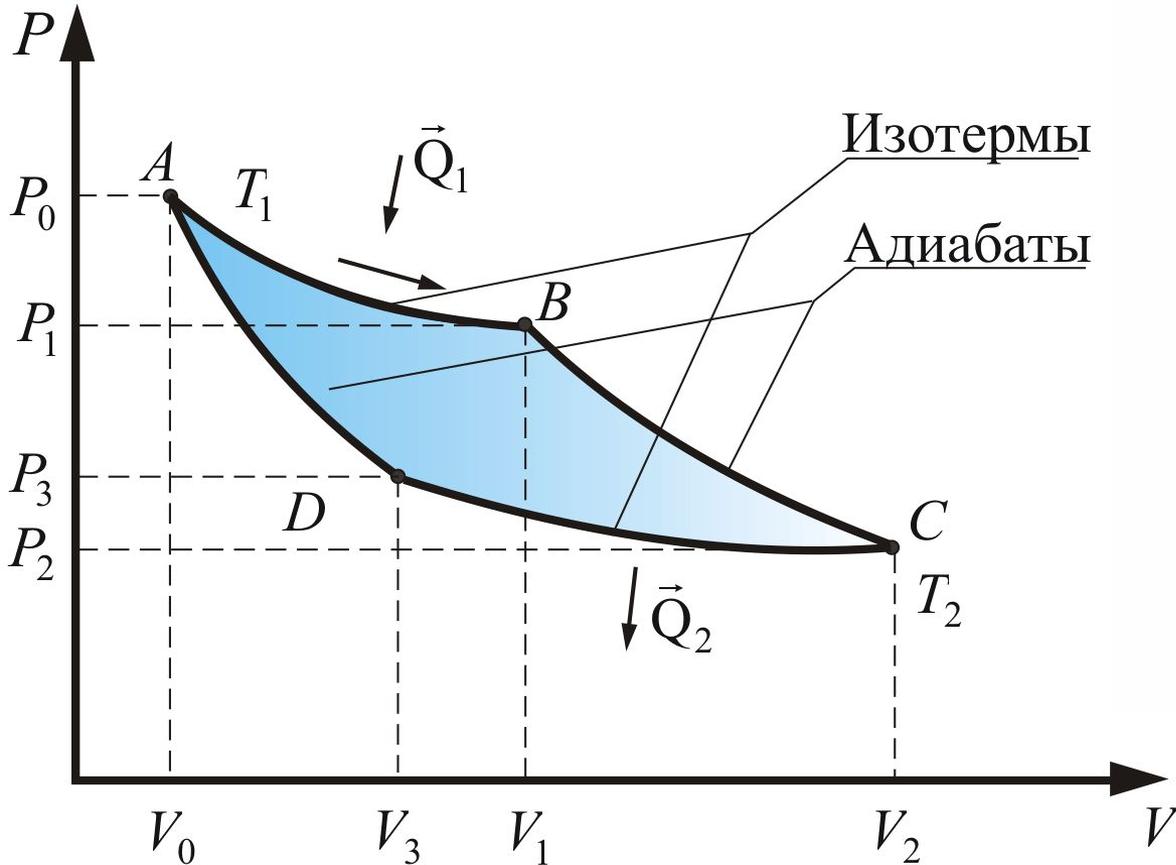
$$A = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_0} + \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1} - RT_2 \ln \frac{V_2}{V_3} - \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$



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

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

**Значит работа совершаемая газом  
больше работы внешних сил.**



Как видим, на всех стадиях кругового процесса нигде не допускается соприкосновение тел с разной температурой, т.е. **нет необратимых процессов** теплопроводности. Весь цикл проводится обратимо (**бесконечно медленно**), значит  **$\eta$ -max**

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

Итак, **полезная работа**

$$A = Q_1 - Q_2.$$

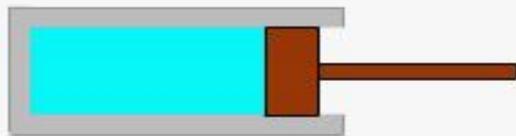
**КПД  $\eta$  равен:**

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

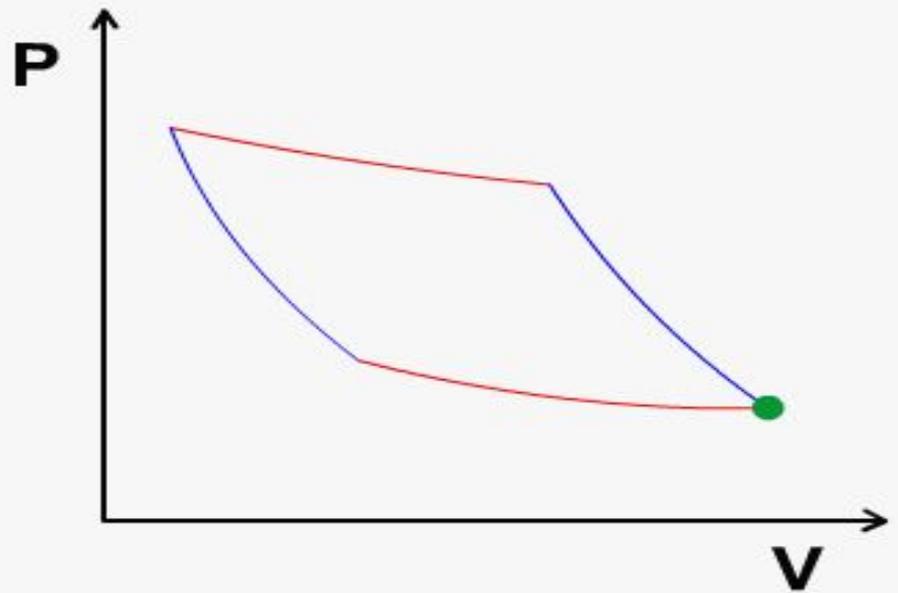
Cooler



$Q_2$



Heater



$$A = Q_1 - Q_2$$

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

**Видно, что  $\eta < 1$  зависит от разности температур между нагревателем и холодильником (и не зависит от конструкции машины и рода рабочего тела). Это ещё одна формулировка теоремы Карно.**

Цикл Карно, рассмотренный нами, был на всех стадиях проведен так, что не было необратимых процессов, (не было соприкосновения тел с разными температурами). Поэтому здесь самый большой КПД. Больше получить в принципе невозможно.

# Необратимый цикл

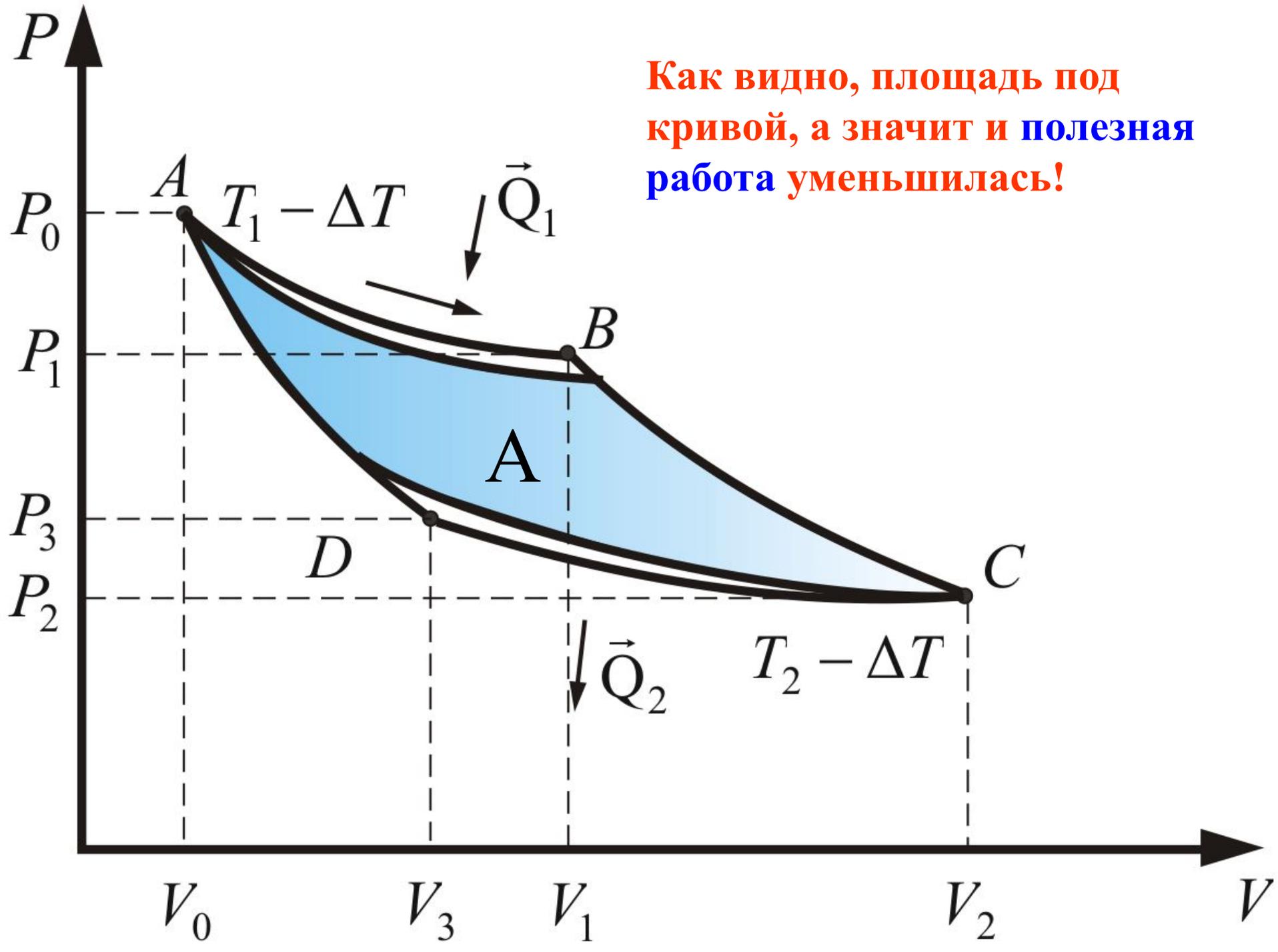
Предположим для простоты, что необратимость цикла обусловлена тем, что теплообмен между рабочим телом и источником теплоты (считаем холодильник тоже «источником», только отрицательной температуры) происходит при конечных разностях температур. **Нагреватель и холодильник не идеальны, они не обладают бесконечной теплоемкостью, поэтому нагреватель, отдавая тепло, охлаждается на  $\Delta T$ , а холодильник нагревается на  $\Delta T$ .**

Любой процесс, не удовлетворяющий условию обратимости, мы называем **необратимым процессом**.

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  $\Delta T$ .



**КПД 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.

# Формулировка второго начала термодинамики

**В изолированной системе все процессы протекают так, что энтропия не убывает.**

$$\Delta S \geq 0$$

То есть изолированная система стремится перейти в равновесное состояние, вероятность такого состояния максимальна.

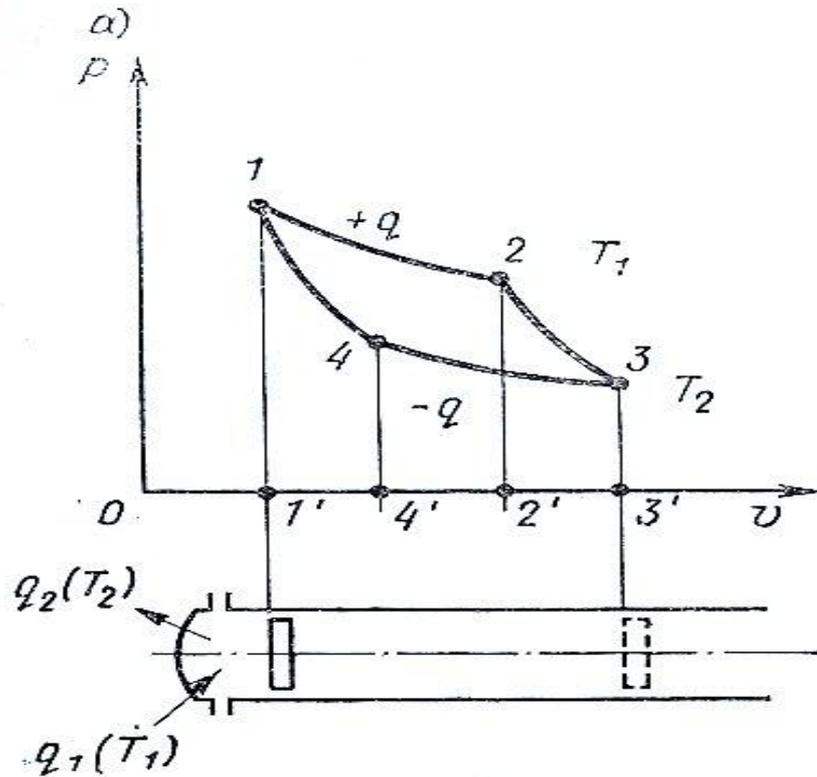
# Второе начало термодинамики – закон возрастания энтропии

- В замкнутой системе энтропия  $S$  при любом реальном процессе либо возрастает, либо остаётся неизменной  $\Delta S \geq 0$ ;
- для обратимых процессов.  
 $\Delta S = 0$
- В состоянии равновесия  
 $S \rightarrow \max$   
энтропия замкнутой системы достигает максимума и никакие макроскопические процессы в такой системе невозможны.

# 5. Понятие о TS-диаграмме

# Цикл Карно

- $p$ - $V$  - диаграмма



- $T$ - $S$  - диаграмма

