

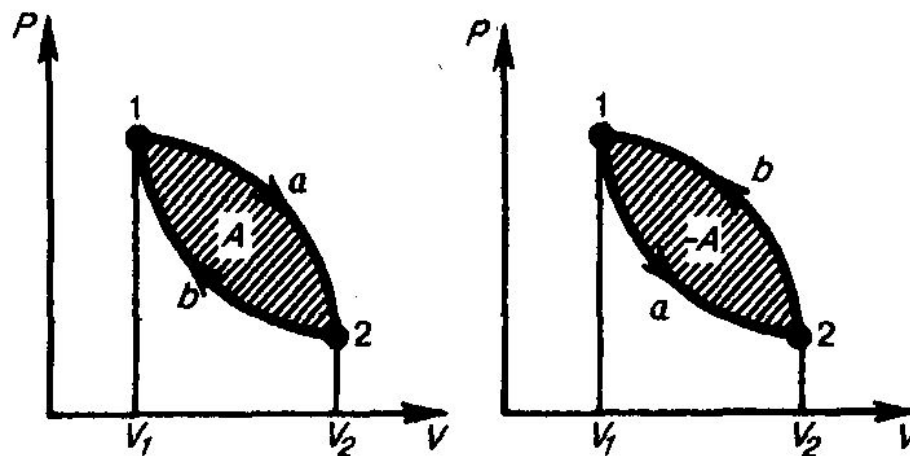
**Физика**

**Термодинамика**  
(продолжение)

## 8.8. Круговой процесс (цикл)

**Круговым процессом** (или циклом) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное.

Цикл,  
совершаемый  
идеальным газом:



Процессы: расширения (1—2), сжатия (2—1) .

Работа расширения положительна и определяется площадью фигуры ( $dV > 0$ ).

Работа сжатия отрицательна ( $dV < 0$ ).

$$A = \oint pdV.$$

Если за цикл совершается положительная работа, то он называется прямым.

Прямой цикл используется в *тепловых двигателях* — периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет полученной извне теплоты.

Обратный цикл используется в *холодильных машинах* — периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю.

Поэтому первое начало термодинамики для кругового процесса:

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

В результате кругового процесса система может теплоту как получать, так и отдавать

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

$Q_1$  — количество теплоты, полученное системой,  
 $Q_2$  — количество теплоты, отданное системой.

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса:

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

## 8.9. Энтропия и ее статистическое толкование

Приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в *любом обратимом круговом процессе*, равно нулю:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

$\frac{\delta Q}{T}$  — полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только состоянием системы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние.

*Функция состояния*, дифференциалом которой является  $\delta Q/T$ , называется *энтропией*.

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

**Для обратимых процессов изменение энтропии:**

$$\Delta S = 0.$$

**Для необратимых процессов изменение энтропии:**

$$\Delta S > 0.$$

**Для системы, которая обменивается теплотой с внешней средой, энтропия может быть:**

$$\Delta S \geq 0$$

**- неравенство Клаузиуса.**

**Энтропия замкнутой системы может либо возрасть, либо оставаться постоянной.**

Если система совершает равновесный переход из состояния **1** в состояние **2**, то изменение ее энтропии:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \delta A}{T},$$

Изменение энтропии в процессах идеального газа:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \frac{m}{M} C_V \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{m}{M} R \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}.$$

или 
$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \frac{m}{M} \left( C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

Замечания:

1. Изменение энтропии  $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$  идеального газа при переходе его из состояния **1** в состояние **2** *не зависит от вида процесса перехода 1  $\rightarrow$  2.*
2. *Адиабатический обратимый процесс протекает при постоянной энтропии. Поэтому его часто называют изоэнтропийным процессом.*



**Следствия для приращения энтропии:**

**Изменение энтропии при изотермическом процессе:**

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

**Изменение энтропии при изохорном процессе:**

$$\Delta S = \frac{m}{M} C_v \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Связь энтропии с термодинамической вероятностью.

**Термодинамическая вероятность состояния системы** — это число микросостояний, определяющих данное макросостояние.

*Энтропия системы и термодинамическая вероятность* связаны между собой следующим выражением:

$$S = k \ln W$$

- формула Больцмана,  
 $k$  — постоянная Больцмана.

Энтропия определяется логарифмом числа микросостояний, с помощью которых может быть реализовано данное макросостояние.

Энтропия – *мера вероятности* состояния термодинамической системы.

## **Другое определение энтропии.**

**Статистическое толкование энтропии на основе формулы Больцмана:**

***«энтропия является мерой неупорядоченности системы (мерой хаоса)».***

**Замечания:**

- 1. Энтропия и термодинамическая вероятность состояний замкнутой системы могут либо возрастать (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянными (в случае обратимых процессов).**
- 2. Все процессы в реальной замкнутой системе ведут к увеличению ее энтропии — принцип возрастания энтропии.**

## 8.10. Второе начало термодинамики

**«В замкнутой системе при необратимых процессах энтропия системы возрастает».**

**Второе начало термодинамики определяет направление протекания термодинамических процессов.**

**Возрастание энтропии означает переход системы из менее вероятных в более вероятные состояния.**

**Еще две формулировки второго начала термодинамики:**

**1) по Кельвину:**

**невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу,**

**2) по Клаузиусу:**

**невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.**

**В середине XIX в. возникла проблема так называемой тепловой смерти Вселенной.**

**Рассматривая Вселенную как замкнутую систему и применяя к ней второе начало термодинамики, Клаузиус свел его содержание к утверждению, что энтропия Вселенной должна достигнуть своего максимума.**

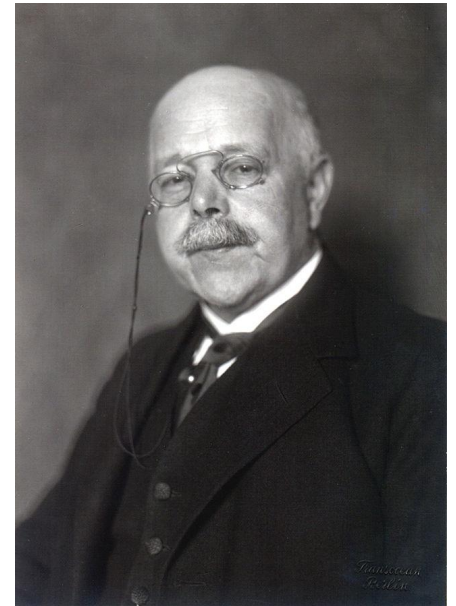
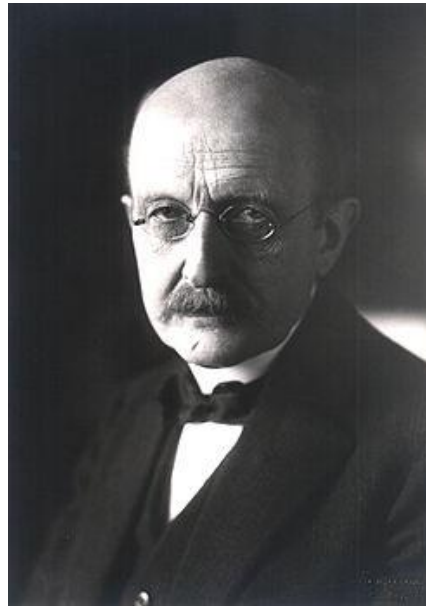
**Это означает, что со временем все формы движения должны перейти в тепловую. Переход же теплоты от горячих тел к холодным приведет к тому, что температура всех тел во Вселенной сравняется, т. е. наступит полное тепловое равновесие и все процессы во Вселенной прекратятся — наступит тепловая смерть Вселенной.**

## 8.11. Третье начало термодинамики

Теорема Нернста — Планка:

«энтропия всех тел в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к нулю Кельвина»:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$



Макс Планк (1858 - 1947) — немецкий физик.

Вальтер Нернст (1864 - 1941) — немецкий химик.

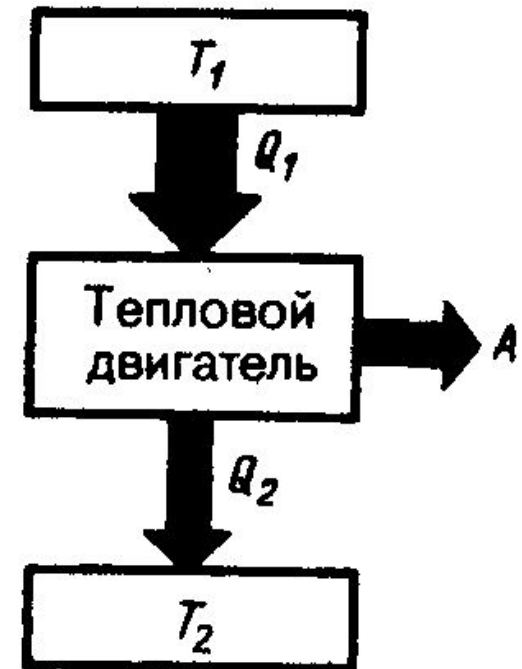
## Тепловые двигатели и холодильные машины

Принцип действия теплового двигателя.

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  $Q_2$ .

Совершаемая за цикл работа:

$$A = Q_1 - Q_2.$$



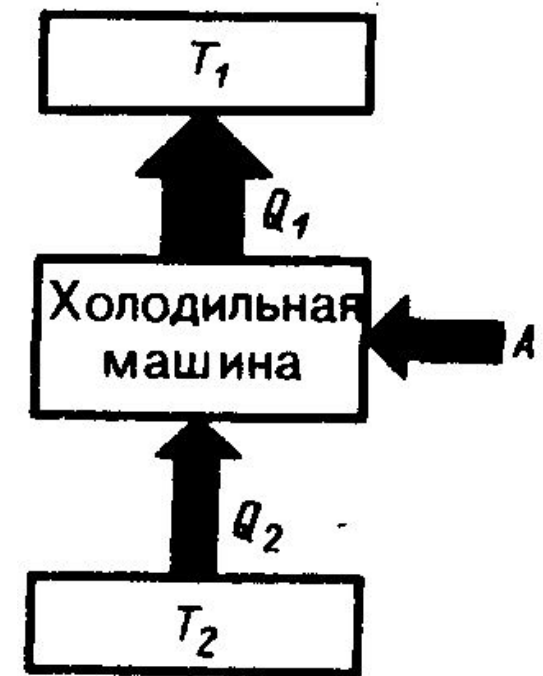
## Принцип действия холодильной машины.

В холодильной машине происходит процесс, обратный происходящему в тепловом двигателе.

От термостата с более низкой температурой  $T_2$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_2$  и отдается термостату с более высокой температурой  $T_1$  количество теплоты  $Q_1$ .

$$Q_1 = Q_2 + A.$$

Количество теплоты  $Q_1$ , отданное системой источнику теплоты при более высокой температуре  $T_1$  больше количества теплоты  $Q_2$ , полученного от источника теплоты при более низкой температуре  $T_2$ , на величину работы, совершенной над системой.





## Цикл Карно для идеального газа

### ***Теорема Карно:***

«из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей ( $T_1$ ) и холодильников ( $T_2$ ), наибольшим к. п. д. обладают обратимые машины».

Карно теоретически проанализировал обратимый наиболее экономичный цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Его называют циклом Карно.

Садии Карно (1796 - 1832 ) — французский физик и математик.

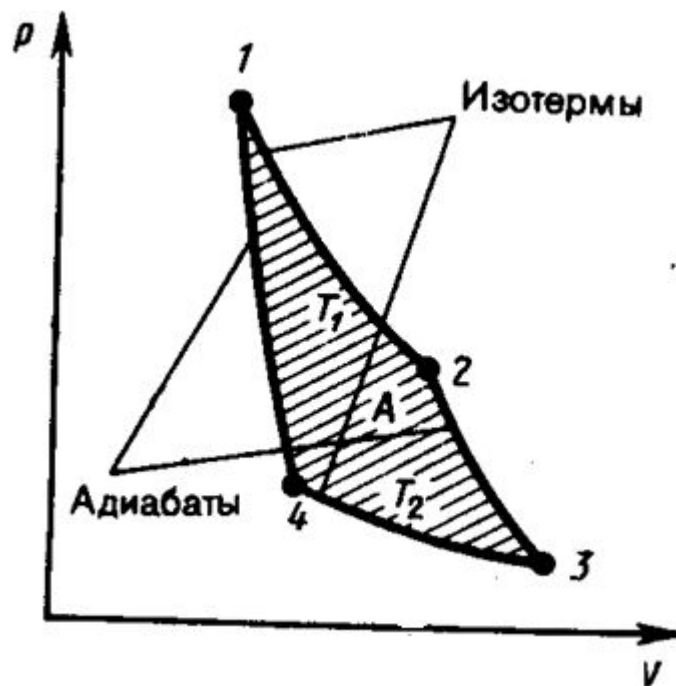


Прямой цикл Карно, в котором в качестве рабочего тела используется идеальный газ, заключенный в сосуд с подвижным поршнем.

Цикл Карно:  
изотермические расширение и сжатие заданы кривыми 1—2 и 3—4, адиабатические расширение и сжатие — кривыми 2—3 и 4—1.

При изотермическом процессе  $U = \text{const}$ , поэтому количество теплоты  $Q_1$ , полученное газом от нагревателя, равно работе расширения  $A_{12}$ , совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1.$$



При адиабатическом расширении 2—3 теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения  $A_{23}$  совершается за счет изменения внутренней энергии

$$A_{23} = -\frac{m}{M} C_V (T_2 - T_1).$$

Количество теплоты  $Q_2$ , отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии, равно работе сжатия  $A_{34}$ :

$$A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2.$$

Работа адиабатического сжатия:

$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = -A_{23}.$$

**Работа, совершаемая в результате кругового процесса:**

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 - Q_2.$$

**Термический к. п. д. цикла Карно:**

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

**т. е. для цикла Карно к. п. д. определяется только температурами нагревателя и холодильника.**

**Для его повышения необходимо увеличивать разность температур нагревателя и холодильника.**