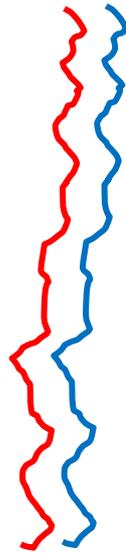
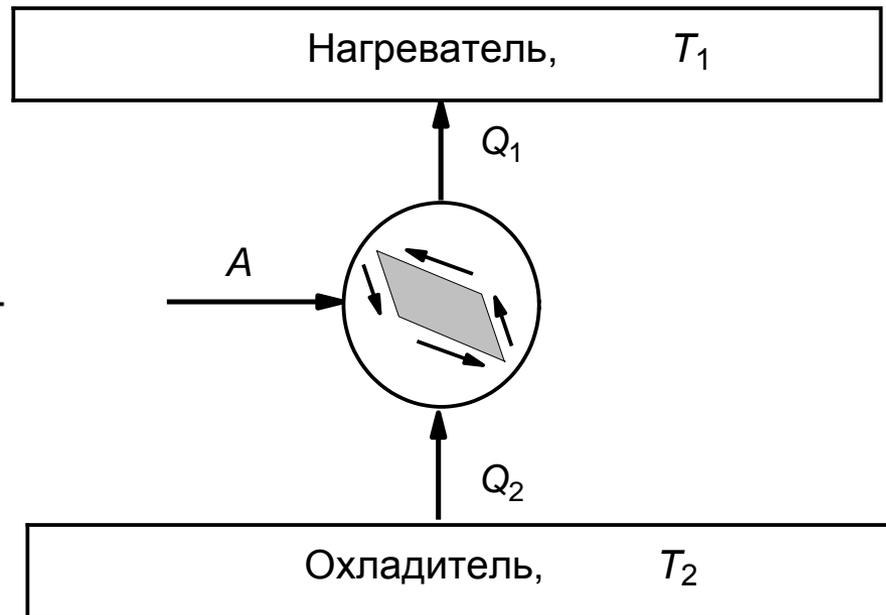
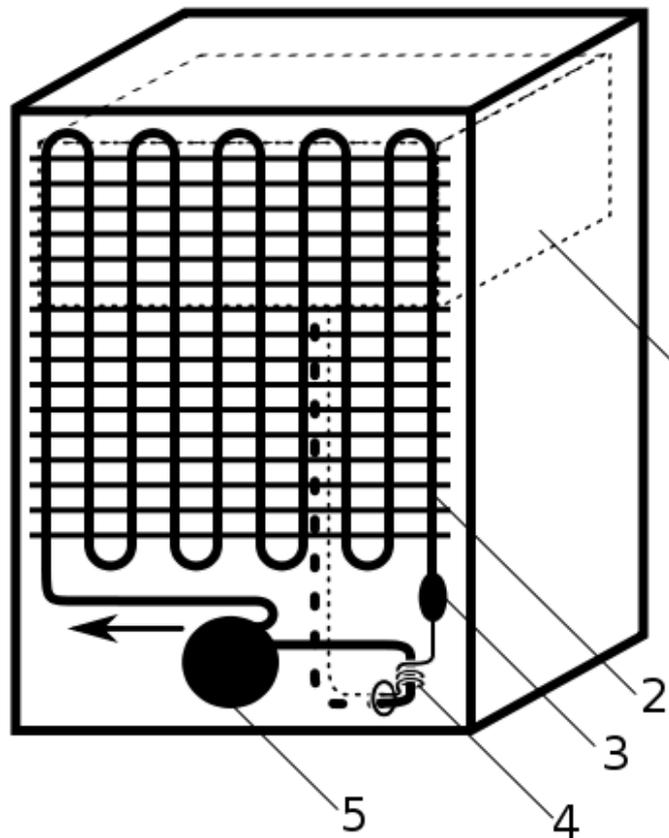


Тепловая машина



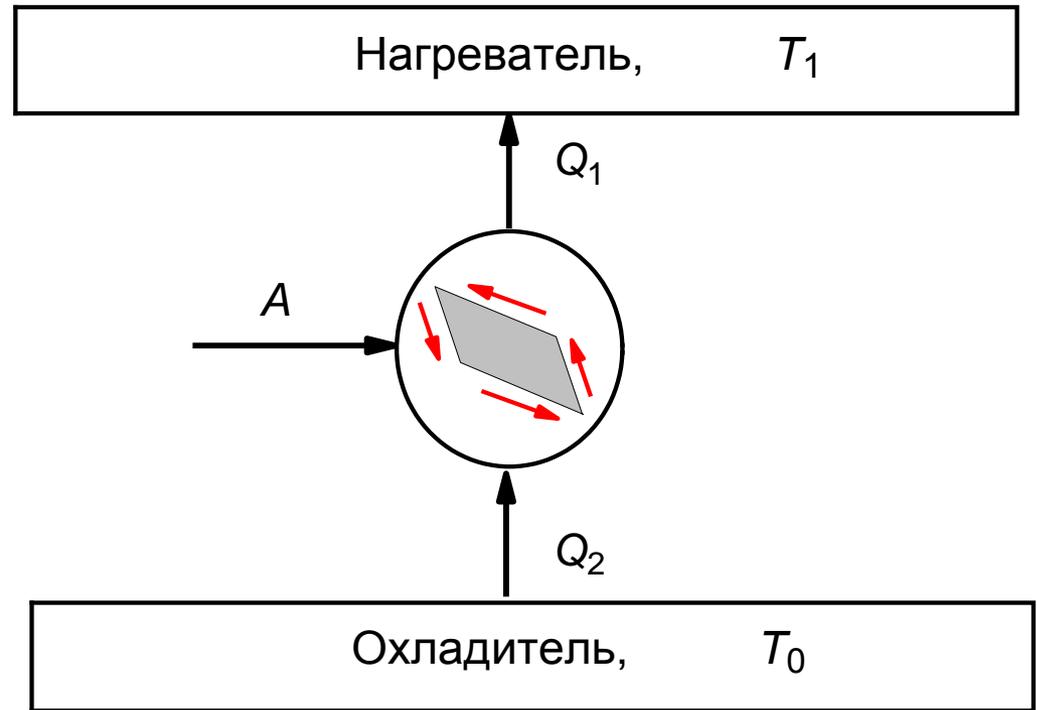
Холодильная машина





1. Испаритель (охладитель с температурой  $T_2$ )
2. Конденсатор (нагреватель с температурой  $T_1$ )
3. Фильтр-осушитель
4. Капилляр и теплообменник
5. Компрессор

Если цель — охлаждение (изъятие теплоты  $Q_2$ ), тогда это холодильная машина (холодильники, морозильные камеры, рефрижераторы).



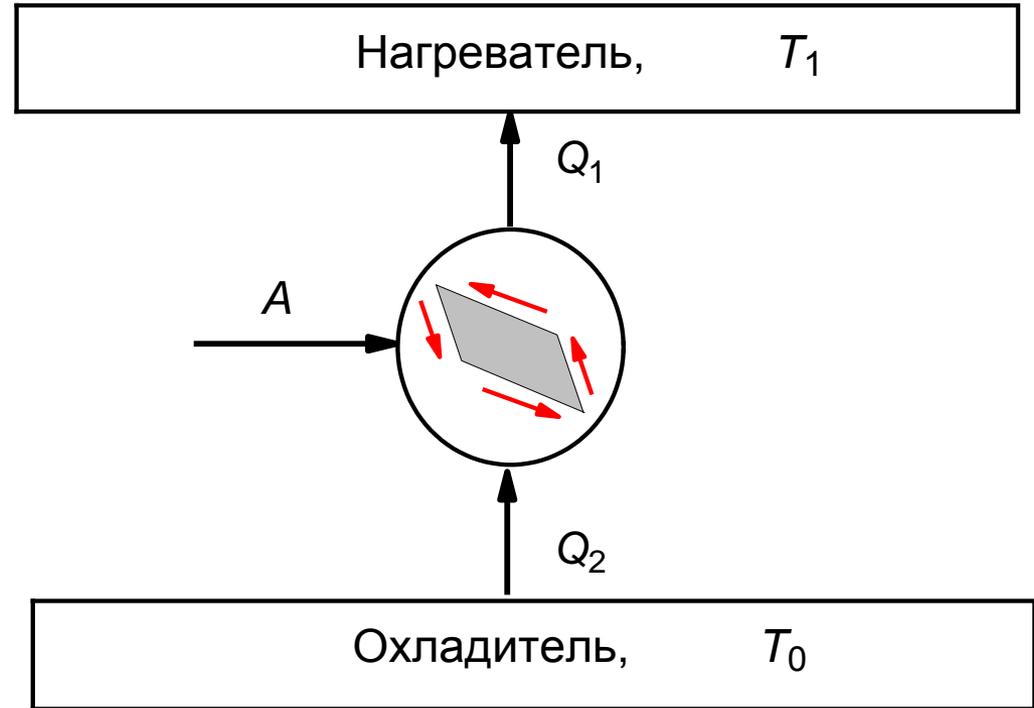
Если цель нагревание (получение теплоты  $Q_1$ ), тогда это тепловой насос.

Может быть и смешанный тип, когда целью является как охлаждение, так и нагревание, — таковыми являются кондиционеры воздуха с функцией его нагрева.



Холодильная машина:

Холодильный коэффициент  $K_{хол} = Q_2/(-A)$ .

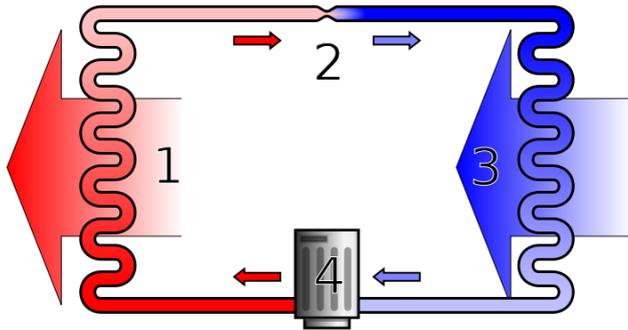


$$A = Q_2 + Q_1 \qquad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$K_{хол} = \frac{Q_2}{(-A)} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = -\frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} + 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$0 \leq K_{хол} < \infty$$

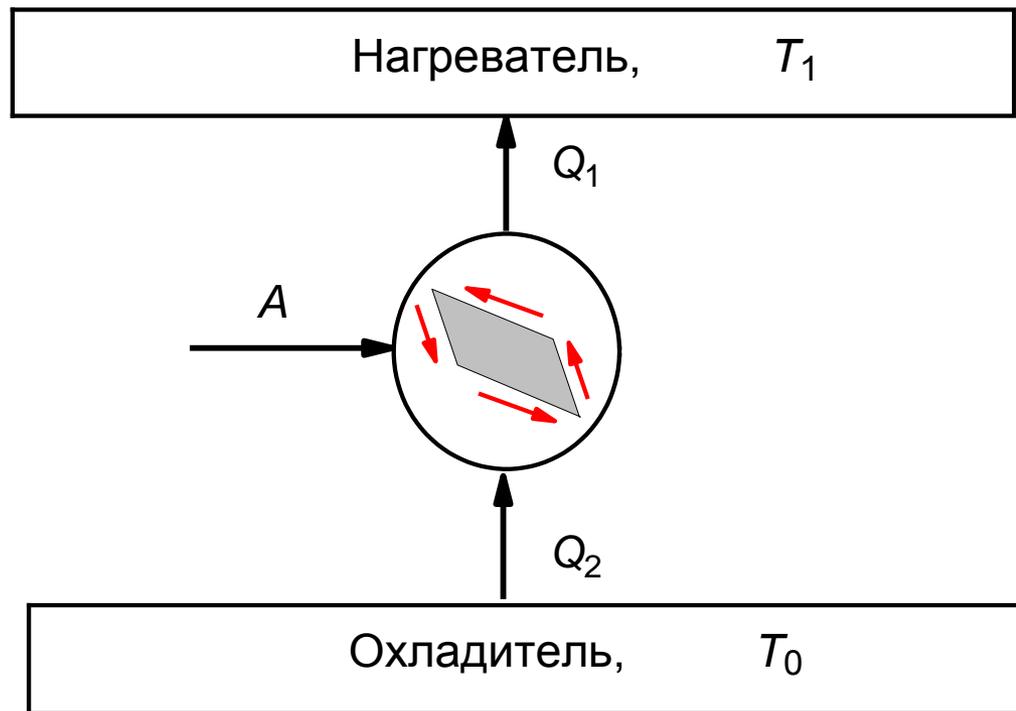
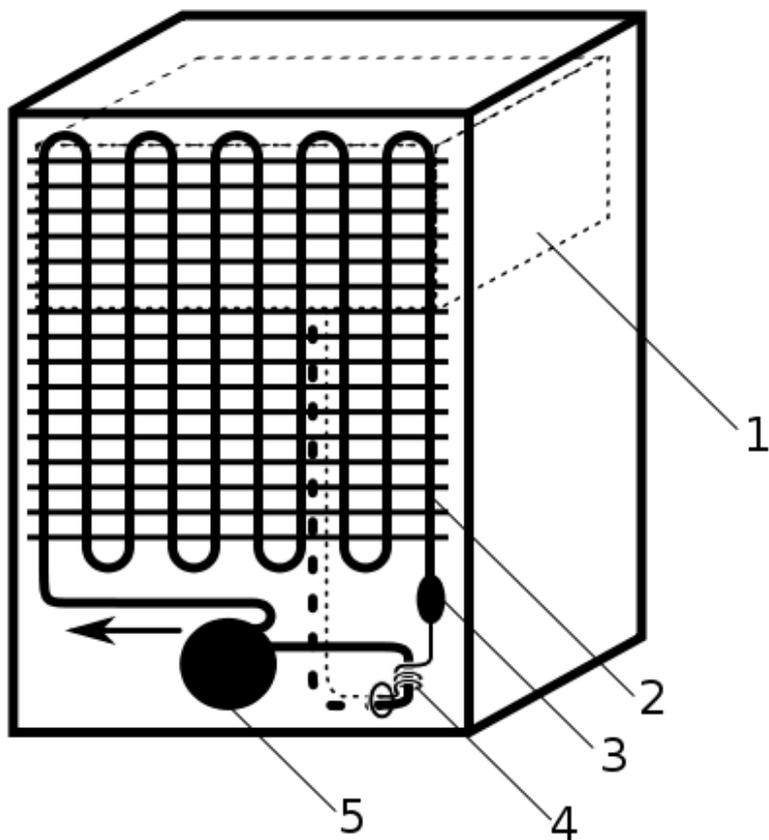
# Тепловой насос – обогрев помещения за счет охлаждения окружающего пространства



Кондиционер в режиме обогрева – воздушный тепловой насос



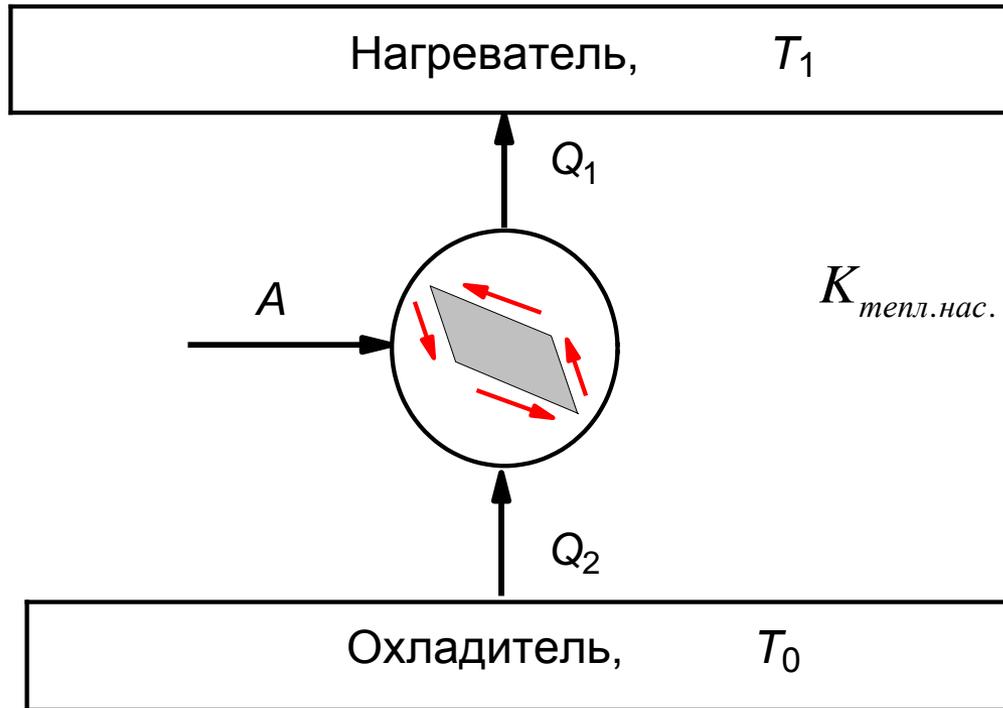
Охлаждается грунт вокруг дома, водоем и т.п.



1. Испаритель (охладитель с температурой  $T_2$ )
2. Конденсатор (нагреватель с температурой  $T_1$ )
3. Фильтр-осушитель
4. Капилляр и теплообменник
5. Компрессор

Тепловой насос:

Эффективность определяется коэффициентом



$$K_{\text{тепл.нас.}} = \frac{-Q_1}{-A} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{1 + \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

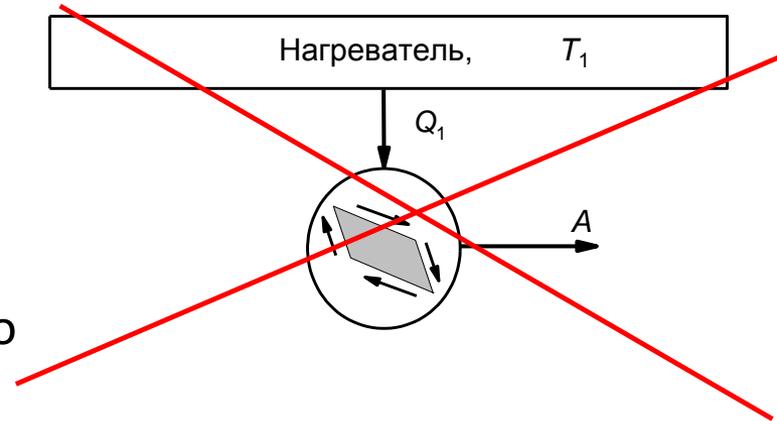
На практике  $K_{\text{тепл.нас.}}$  лежит в диапазоне от 2,5 до 5. Так, на 1 кВт затраченной электрической энергии тепловой насос производит до 5 кВт тепловой энергии.

# Второе начало термодинамики

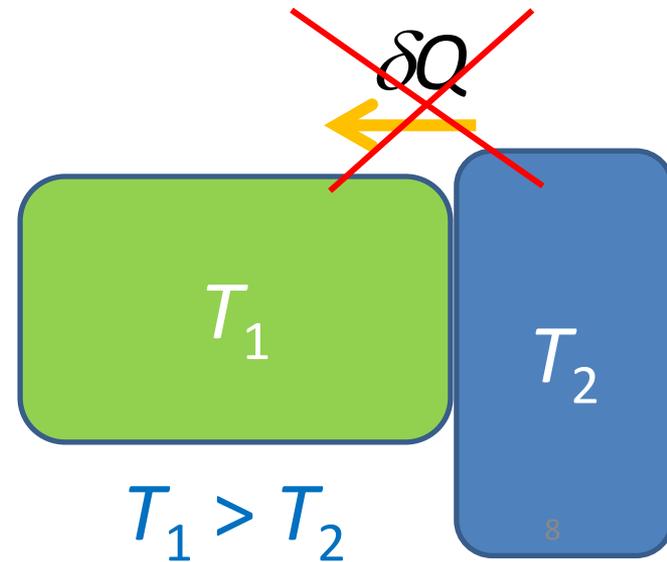
Так же как и первое, получено эмпирически. Существуют различные эквивалентные его формулировки.



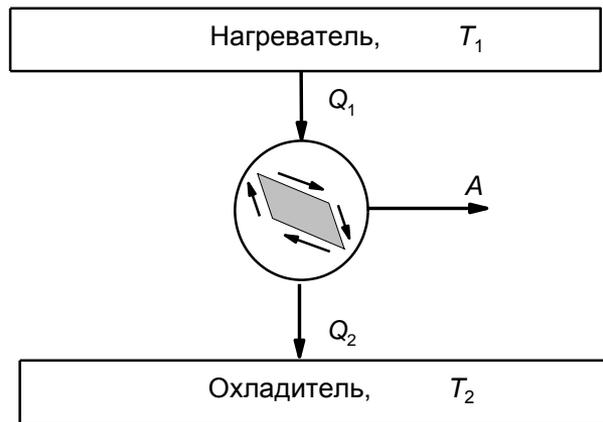
Формулировка Томсона (Кельвина): «невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара».



Формулировка Клаузиуса: «теплота не может самопроизвольно переходить от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому».



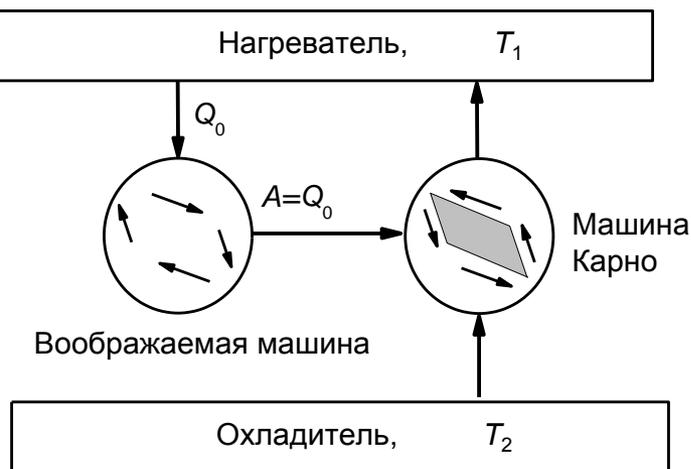
Докажем, что из первой формулировки следует вторая. Пусть невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара. И пусть при этом теплота может самопроизвольно переходить от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому (доказательство от противного).



Тогда для тепловой машины проводится круговой процесс: отнимается от нагревателя некоторая теплота, передается охладителю другая теплота, за счет их разности совершается работа. Затем полученную охладителем теплоту возвращаем нагревателю – это возможно. Состояние холодильника, таким образом, не изменяется. Тогда производится работа  $A$  только за счет охлаждения нагревателя, что невозможно.

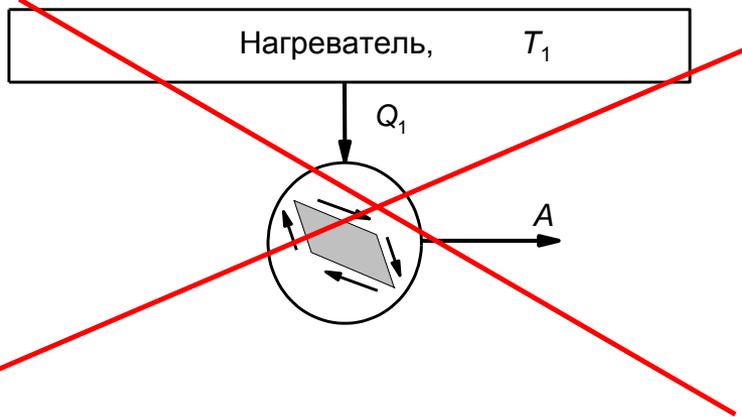
Из второй следует первая.

Пусть теперь теплота не может самопроизвольно переходить от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому. И пусть возможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара (доказательство от противного).



Пусть машина слева реализует этот «возможный» процесс – отнимает теплоту от нагревателя и совершает работу (без охладителя). За счет этой работы машина справа работает в обратном направлении – отнимает тепло от охладителя и передает его нагревателю. В результате тепло перейдет от менее нагретого тела к более нагретому, – что невозможно.

Первая формулировка (Томсона) звучит еще так:  
невозможен вечный двигатель второго рода.



## ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Первого рода

Будучи раз пущен  
в ход, совершал бы  
работу  
неограниченно  
долгое время, не  
заимствуя энергию  
извне

извне

Противоречит закону  
сохранения и  
превращения энергии

Второго рода

Целиком  
превращал бы в  
работу теплоту,  
извлекаемую из  
окружающих тел

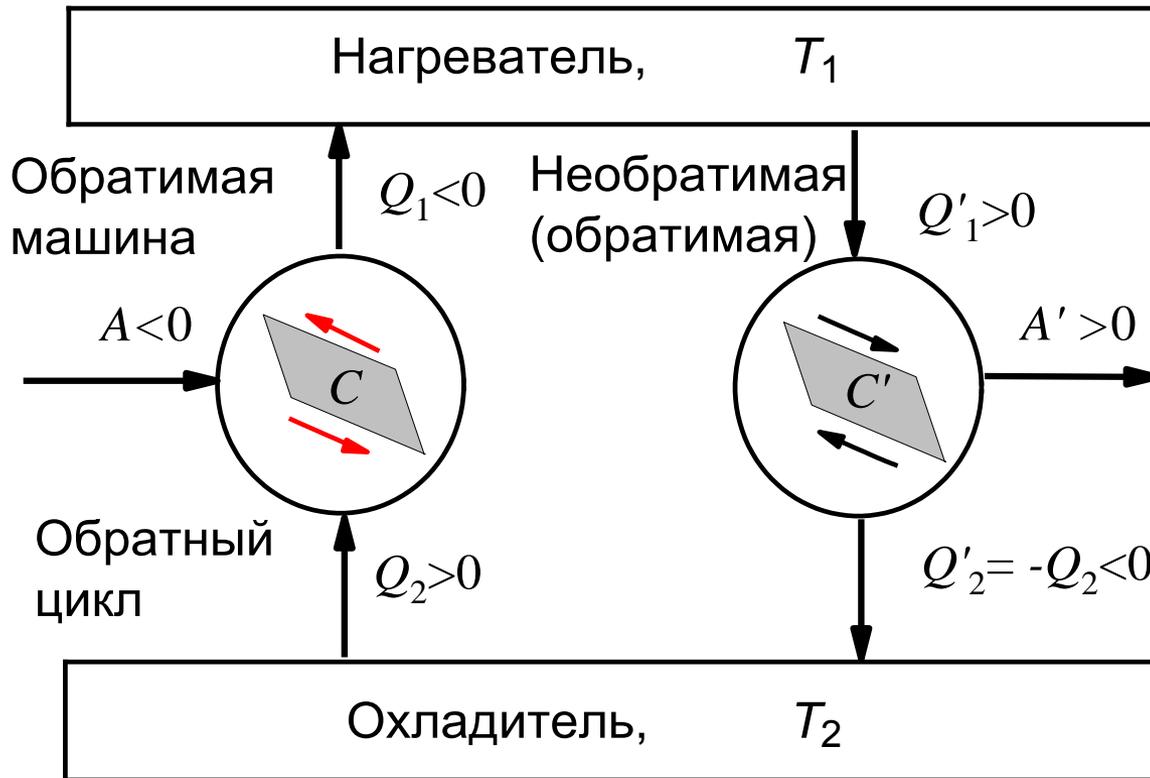
НЕВОЗМОЖНЫ

Противоречит  
второму началу  
термодинамики

## Теорема (принцип) Карно

- КПД тепловой машины, работающей по **обратимому** циклу Карно, не зависит от природы рабочего вещества и устройства машины, а определяется только температурами нагревателя и холодильника.
- КПД **необратимой** тепловой машины, имеющей те же самые тепловые резервуары, меньше КПД **обратимого** цикла Карно.

**Доказательство.** Рассмотрим две машины Карно: левая машина обратимая, правая может быть как обратимой, так и необратимой. Рабочее тело в них может быть произвольным.



$$A' = Q_1' + Q_2'$$

$$A = Q_1 + Q_2$$

Подбираем машины так, чтобы  $Q_2' = -Q_2$

Суммарная работа  
двух машин

$$A + A' = Q_1 + Q_1'$$

$$A' = Q_1' - Q_2.$$

Но получить работу только из тепла нагревателя нельзя. Тогда

$$A + A' = Q_1 + Q_1' \leq 0$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} \qquad \eta' = 1 + \frac{Q_2'}{Q_1'} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1'}$$

$$\eta' - \eta = -\frac{Q_2}{Q_1'} - \frac{Q_2}{Q_1} = -Q_2 \frac{Q_1' + Q_1}{Q_1 Q_1'} = \frac{Q_2}{(-Q_1) Q_1'} (Q_1' + Q_1)$$

так как  $Q_2 > 0$ ,  $Q_1' > 0$ ,  $-Q_1 > 0$ , то тогда  $\eta' - \eta \leq 0$

$$\eta' \leq \eta$$

КПД работающей по циклу Карно необратимой тепловой машины меньше КПД обратимой машины.

Знак равенства, когда цикл  $S'$  также обратимый: обращением цикла  $S'$  аналогично доказывается, что  $\eta' \geq \eta$ .

Пусть теперь рабочим телом обратимой машины  $C$  является идеальный газ. Тогда для необратимой машины  $C'$

$$\eta' = 1 + \frac{Q_2'}{Q_1'} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Для обратимого процесса равенство}$$

Таким образом, КПД работающей по циклу Карно обратимой машины не зависит от природы рабочего вещества и ее конкретного устройства, причем

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

То есть определяется только температурами нагревателя и охладителя.

Для любой машины с любым рабочим телом:

$$1 + \frac{Q_2'}{Q_1'} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad \frac{Q_2'}{Q_1'} \leq -\frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_1'}{T_1} + \frac{Q_2'}{T_2} \leq 0$$

# Термодинамическая температура



Газовый термометр

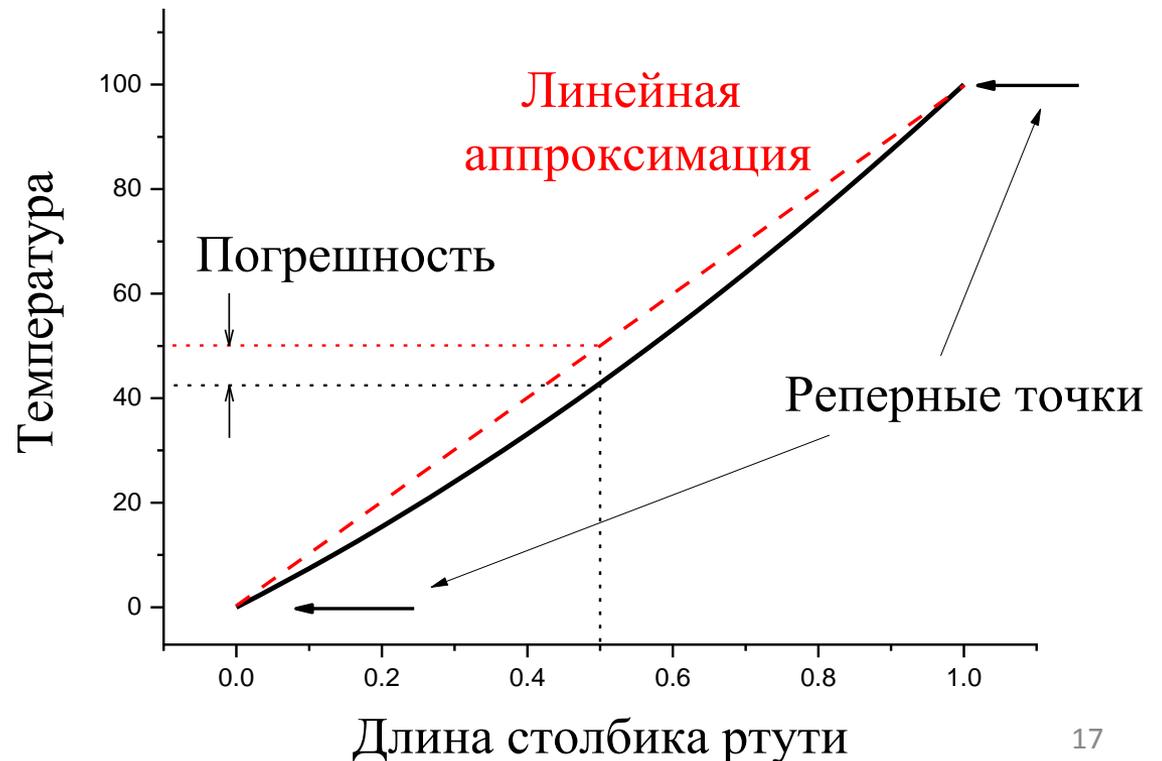
$$T = \frac{pV}{\nu R}$$

Проблема:  
идеального газа не  
существует

Термометр на тепловом  
расширении

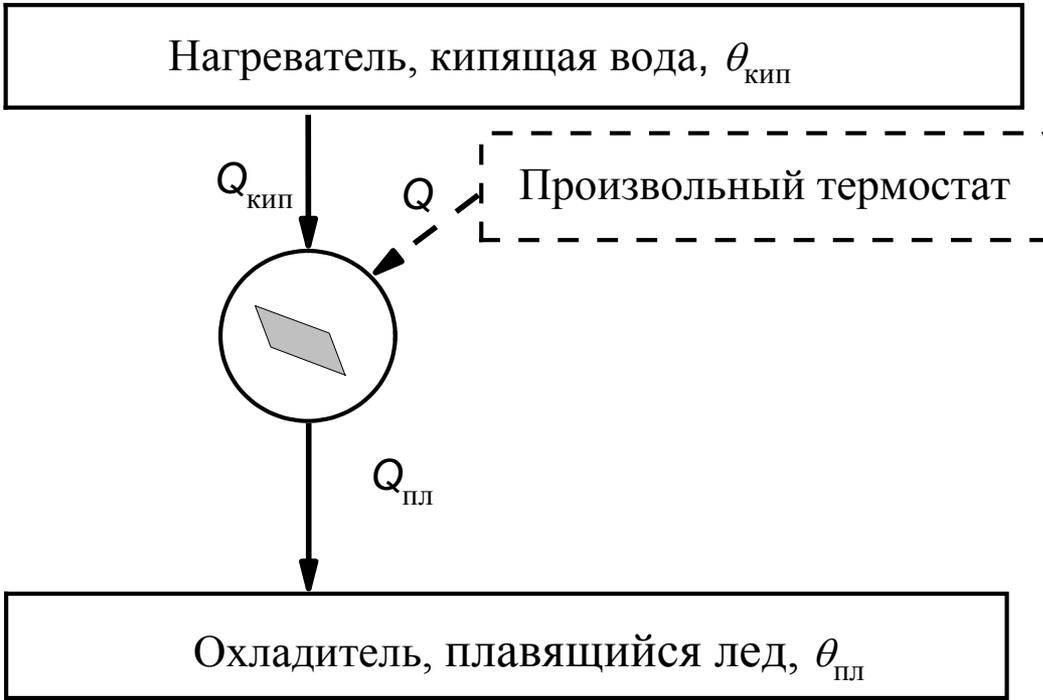


Проблема: нелинейность шкалы



# А возможно ли вообще корректное определение температуры и ее измерение?

Выручает принцип Карно.  
Возьмем обратимую машину.



Для произвольного термостата

Назовем термодинамическими температурами кипения воды и плавления льда величины

$$\theta_{кип} \text{ и } \theta_{пл}$$

полученные из системы двух уравнений

$$\frac{\theta_{кип}}{\theta_{пл}} = \frac{Q_{кип}}{|Q_{пл}|}$$

$$\theta_{кип} - \theta_{пл} = 100\text{К}$$

$$\theta = \frac{Q}{|Q_{пл}|} \theta_{пл}$$

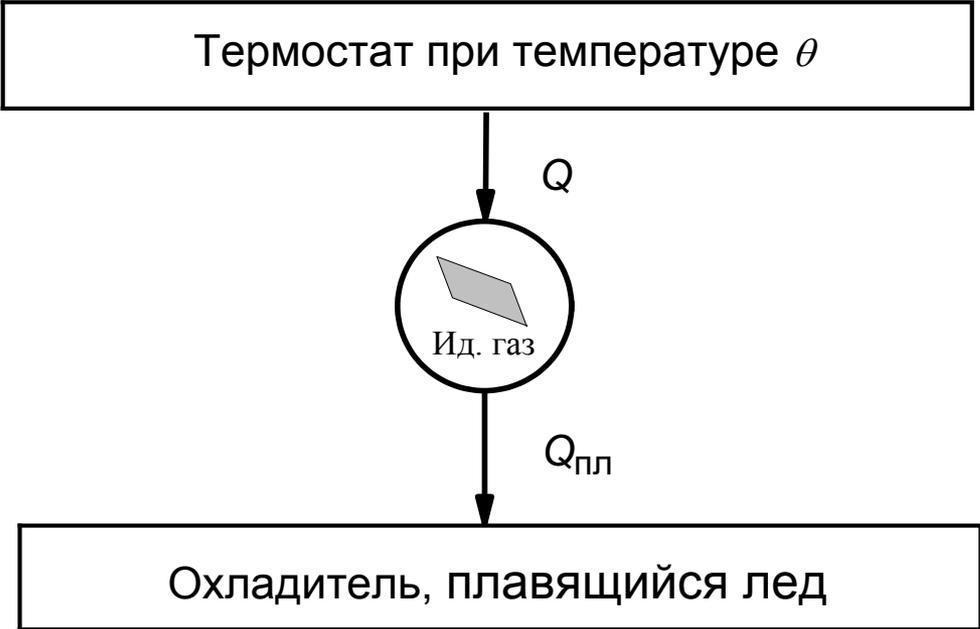
Согласно принципу Карно определение  $\theta$  не зависит от используемого рабочего тела.

Сравнение с введенной ранее температурой

$$\frac{3}{2}kT = \frac{m\overline{v^2}}{2},$$

причем  $T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}} = 100 \text{ К}$

Пусть машина Карно работает на ид. газе



Для цикла Карно с ид. газом:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad T = \frac{Q}{|Q_{\text{пл}}|} T_{\text{пл}}$$

Машина Карно с произвольным рабочим телом

$$\theta_{\text{КИП}} - \theta_{\text{ПЛ}} = 100 \text{ К}$$

$$\theta = \frac{Q}{|Q_{\text{ПЛ}}|} \theta_{\text{ПЛ}}$$

Машина Карно с рабочим телом в виде идеального газа

$$T_{\text{КИП}} - T_{\text{ПЛ}} = 100 \text{ К}$$

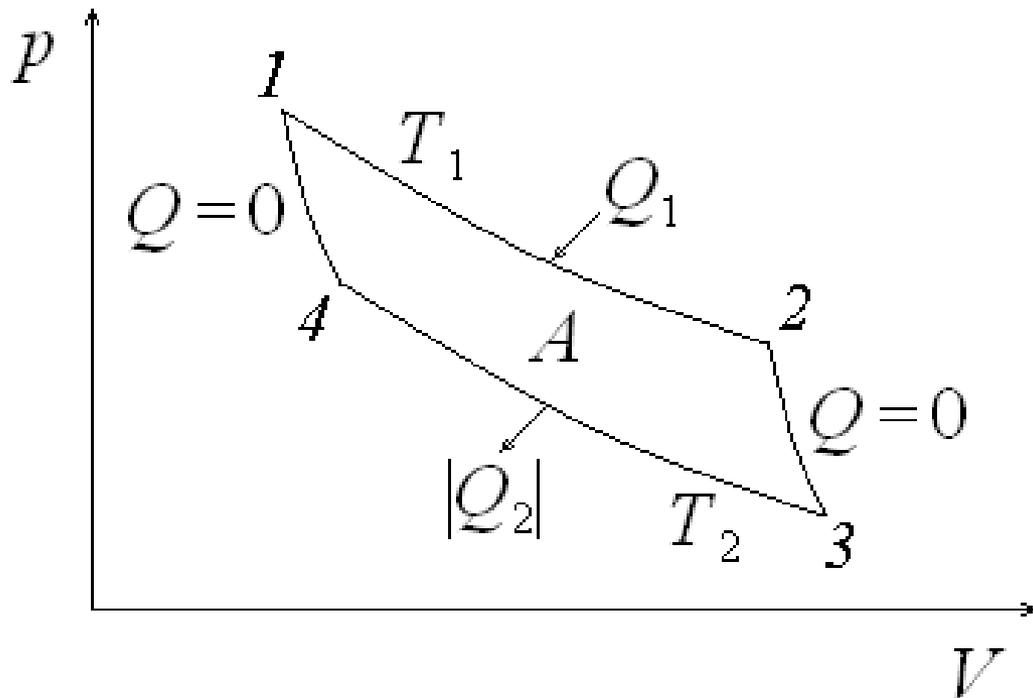
$$T = \frac{Q}{|Q_{\text{ПЛ}}|} T_{\text{ПЛ}}$$

Отсюда  $T = \theta$

# Энтропия

## Теорема о приведенных теплотах. Неравенство Клаузиуса

Для обратимого цикла Карно

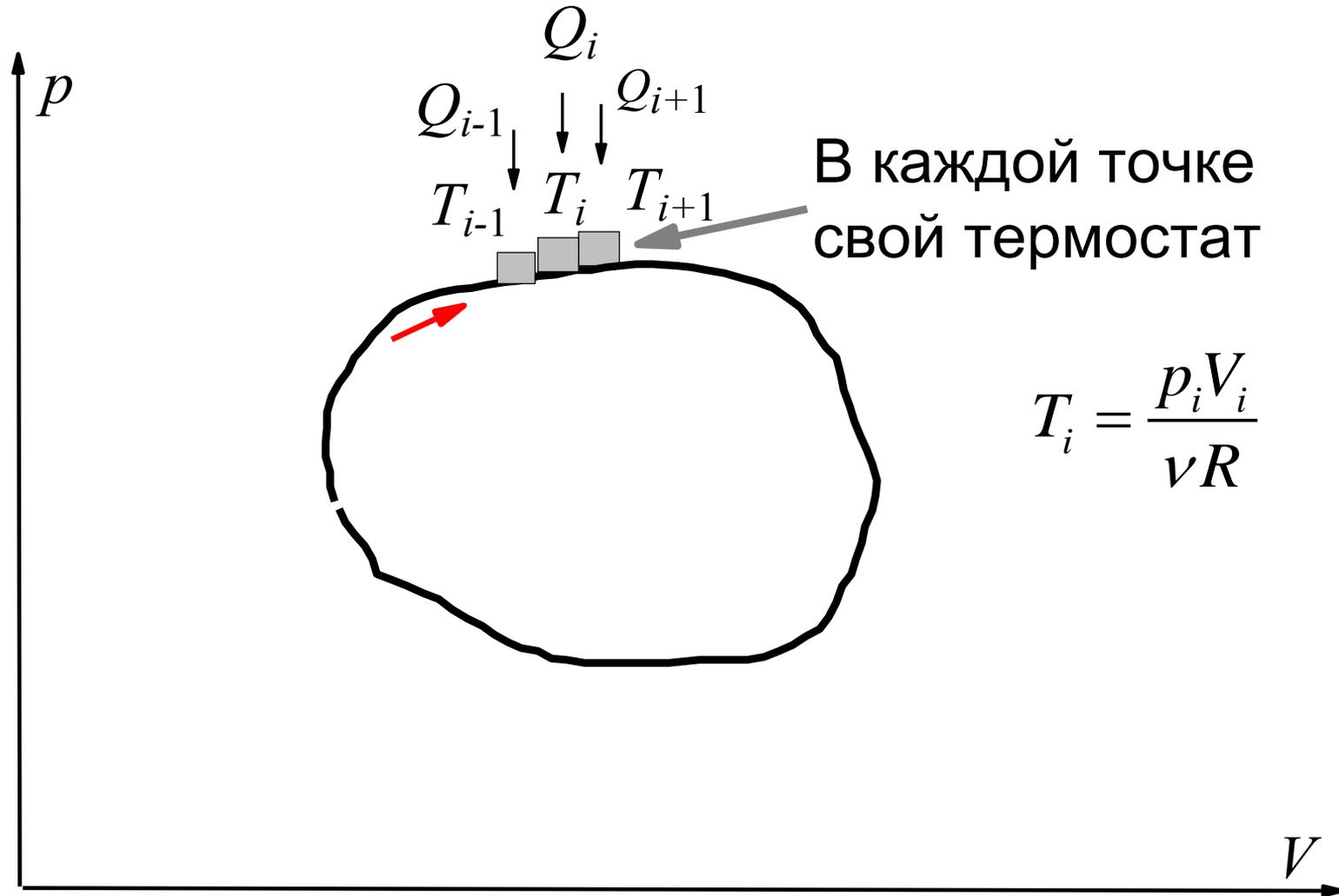


$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

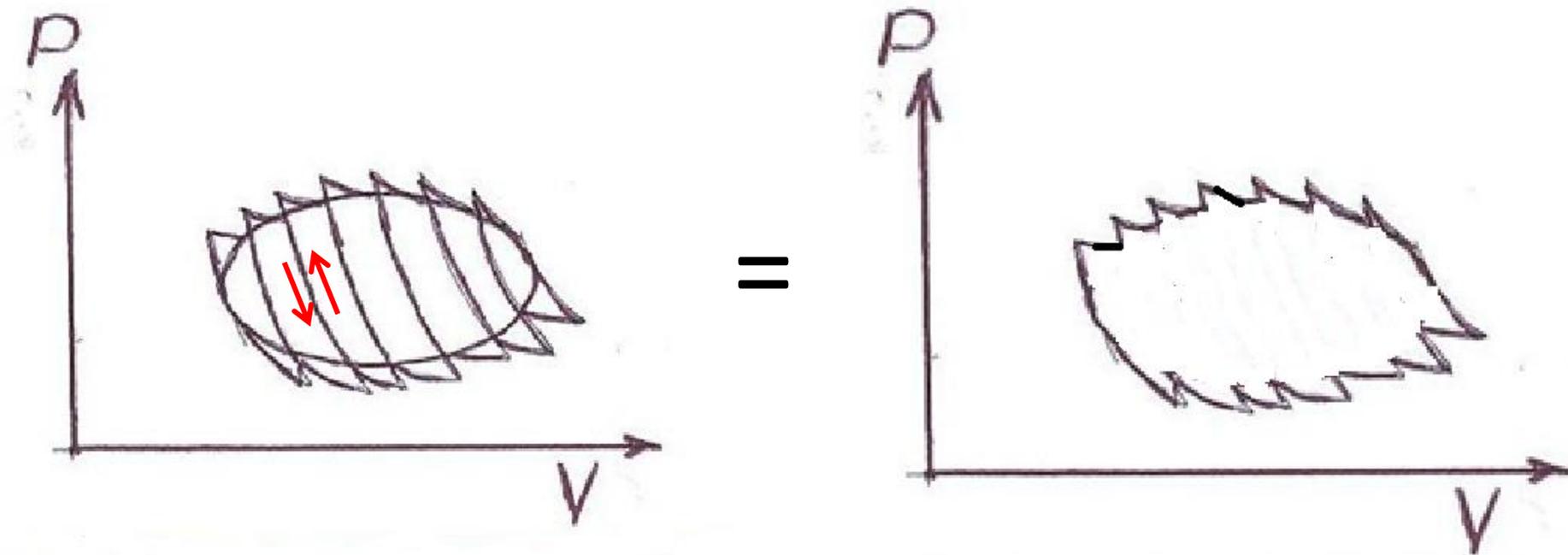


$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

# Произвольный круговой процесс



Устроим набор большого количества циклов Карно с малым шагом по объему



Для совмещенных циклов

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

или

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

Теорема о приведенных теплотах

Если циклический процесс не является обратимым, тогда для каждого из малых циклов вместо равенства необходимо писать неравенство. Для такого процесса тогда

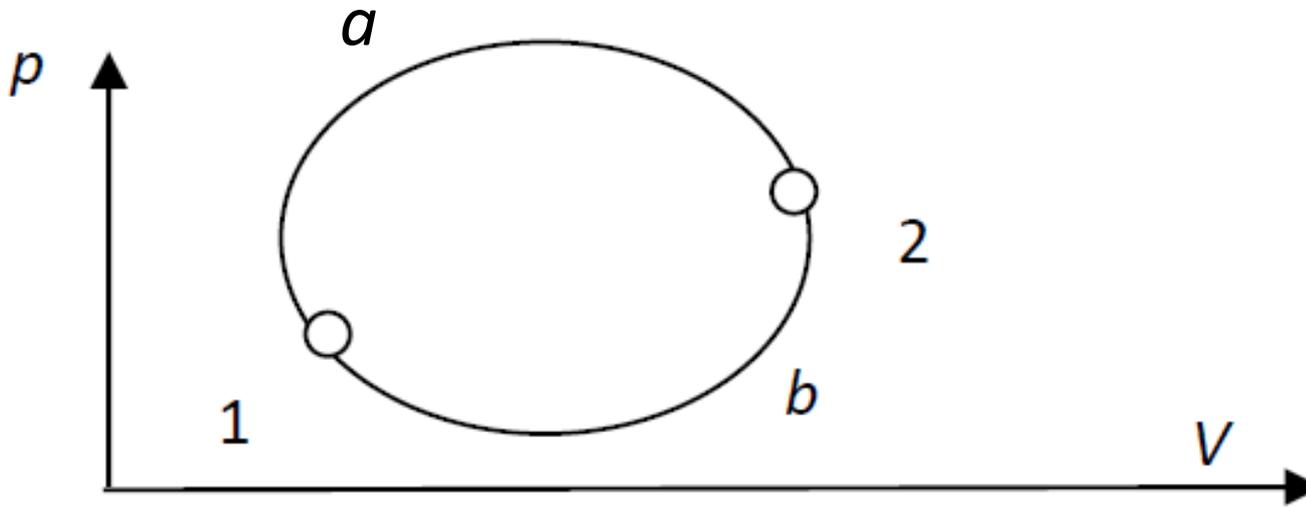
$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0.$$

Или, в интегральном виде,

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

Эти неравенства называют неравенствами Клаузиуса. Знак равенства появляется для полностью обратимых процессов.

## Энтропия



$$\int_{1a2} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2b1} \frac{\delta Q}{T} = 0 \qquad \int_{1a2} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1b2} \frac{\delta Q}{T}$$

Существование однозначной функции состояния  $S$ , изменение которой при переходе между двумя состояниями 1 и 2 определяется выражением

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

Эту новую функцию состояния  $S$  называют энтропией, она определена с точностью до произвольной постоянной.

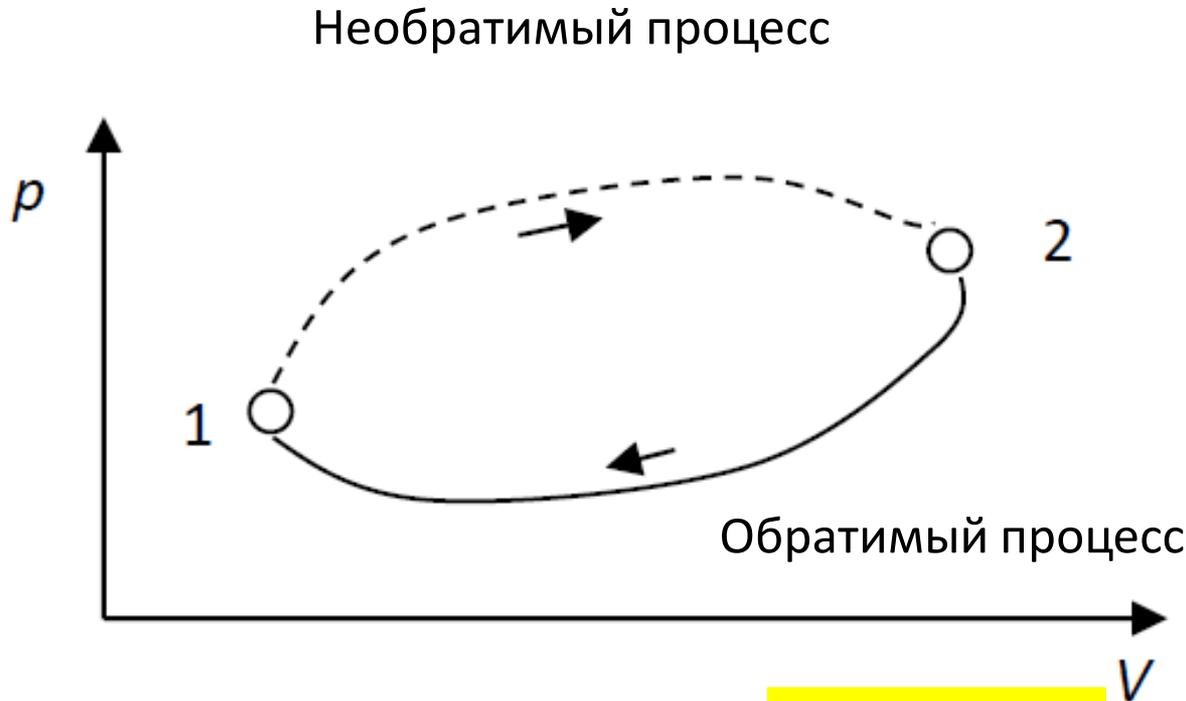
$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \oint dS = 0$$

Первый и второй законы термодинамики теперь записываются вместе

$$TdS = dU + pdV$$

Энтропия – экстенсивная величина, так как количество теплоты  $\delta Q$ , поглощаемое системой, распределяется по всему ее объему. Энтропия системы равна сумме энтропий подсистем.

# Закон возрастания энтропии



$$\int_{1 \rightarrow 2} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2 \rightarrow 1} \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\int_{2 \rightarrow 1} \frac{\delta Q}{T} = S_1 - S_2$$

$$S_2 - S_1 \geq \int_{1 \rightarrow 2} \delta Q / T$$

Если  $\delta Q = 0$ , то тогда

$$S_2 \geq S_1$$

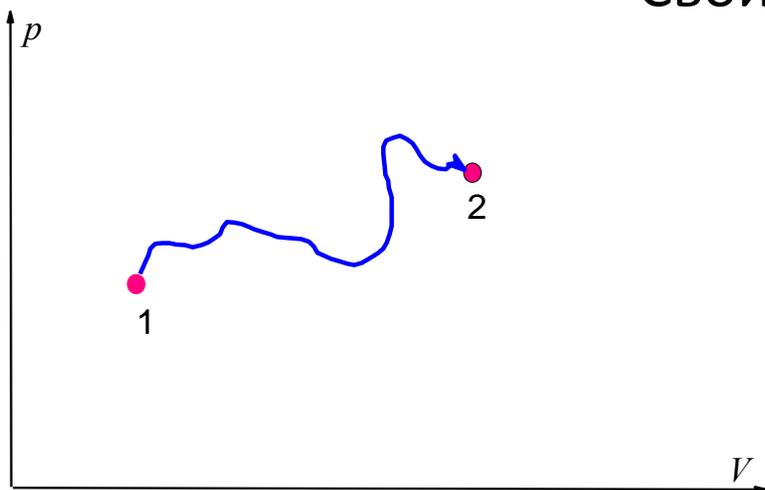
В замкнутой системе энтропия возрастает

# Объединение первого и второго законов термодинамики

Вместо  $\delta Q = dU + pdV$

Теперь  $TdS \geq dU + pdV$

## Свойства энтропии

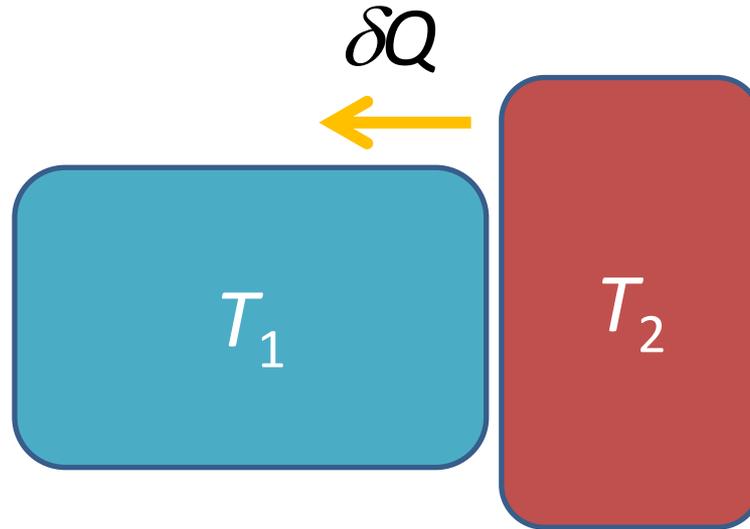


$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

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

- Функция состояния, ее изменение не зависит от пути из точки 1 в точку 2.
- Величина экстенсивная
- Величина аддитивная, энтропия системы равна сумме энтропий ее подсистем
- В изолированной системе энтропия может только увеличиваться

## Энтропия и передача тепла



$$dS = \frac{\delta Q}{T_1} - \frac{\delta Q}{T_2} > 0$$

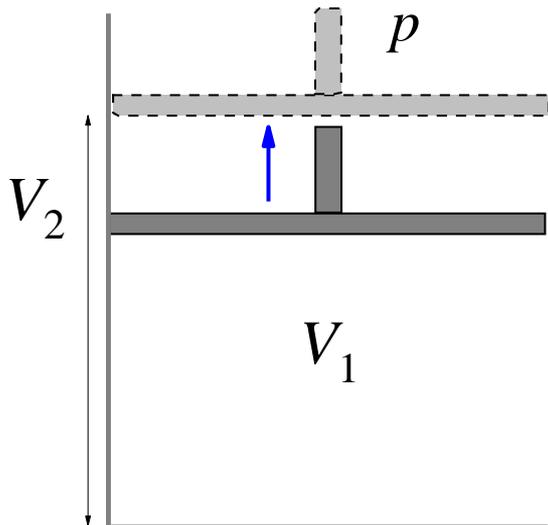
$$dQ > 0 \quad \longrightarrow \quad T_2 > T_1$$

Тепло переходит от горячего тела к холодному. Закон возрастания энтропии эквивалентен второму началу термодинамики

# Энтропия идеального газа

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{dU + pdV}{T} = \frac{\nu c_V dT + pdV}{T}$$

$$p = \nu RT / V$$



Изменение в изотермическом процессе

$T$

$$S_2 - S_1 = \int_{V_1}^{V_2} pdV / T = \nu R \cdot \ln (V_2 / V_1)$$

$$= Nk \cdot \ln (V_2 / V_1) \quad (T = \text{const})$$