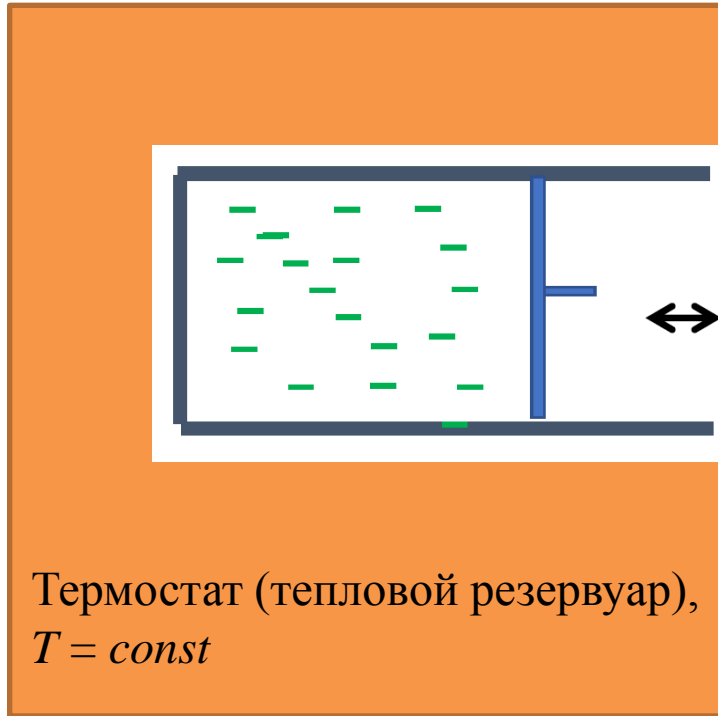


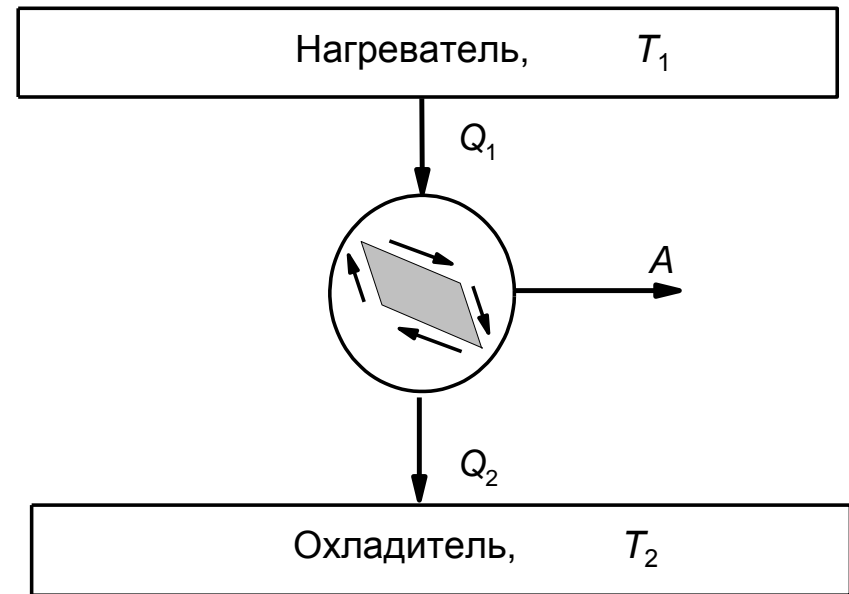
Циклы, преобразование теплоты в работу

Тепловая машина, цикл Карно

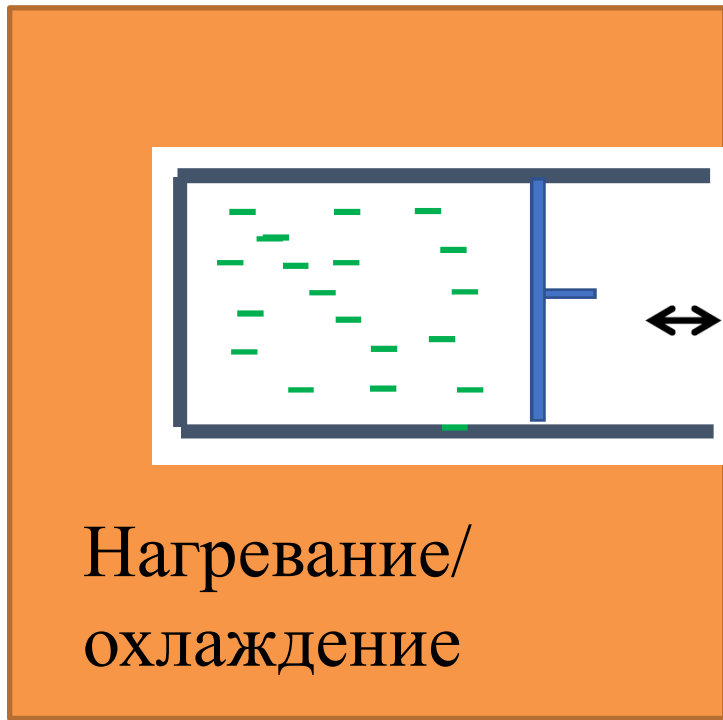
Тепловой машиной называется устройство, позволяющее производить работу за счет потребляемого тепла.



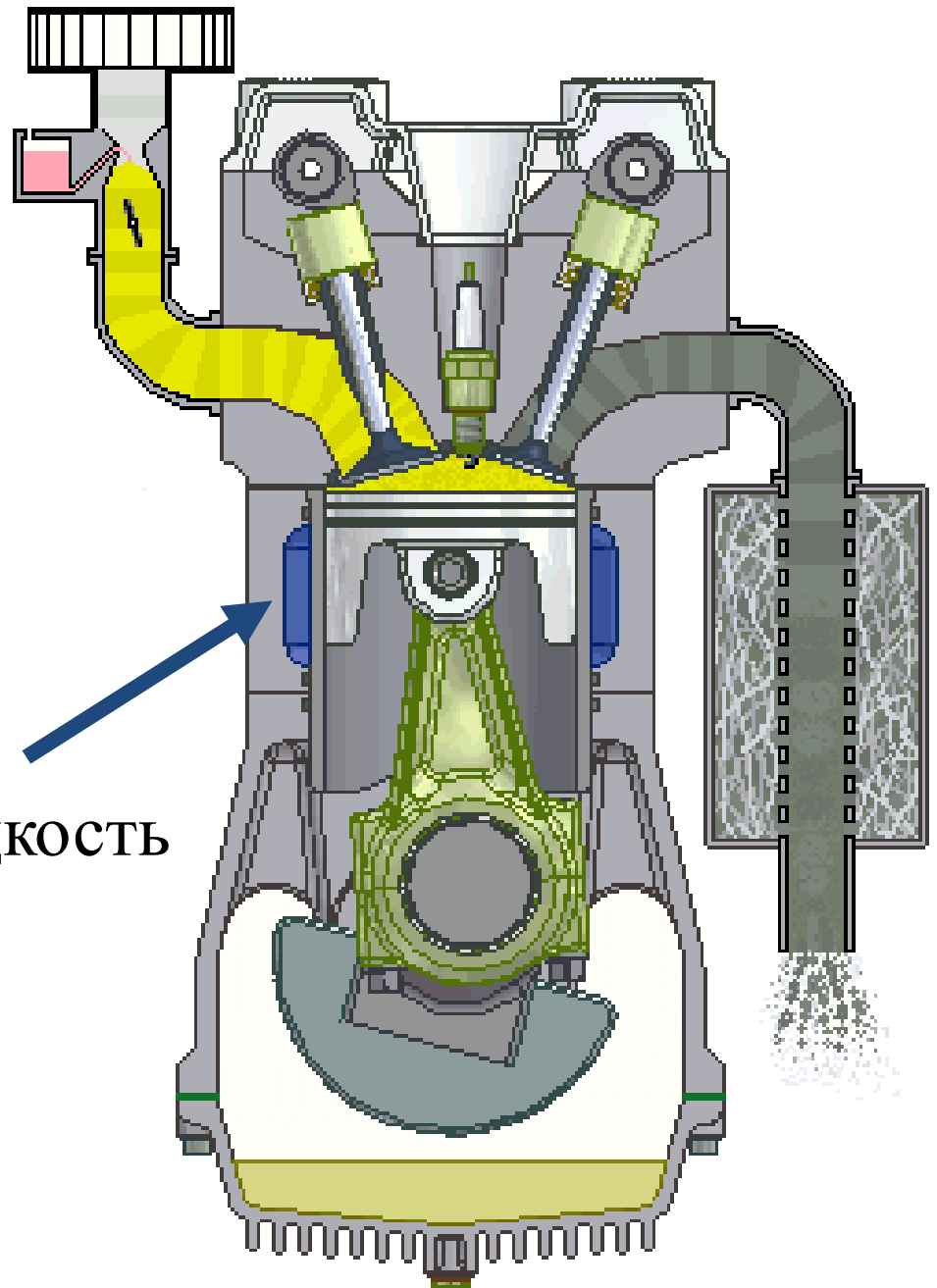
$$A = \nu RT \cdot \ln(V_{\text{конечн}} / V_{\text{начальн}}) > 0$$



Чтобы работу извлекать много раз, после расширения должно быть сжатие. На это надо затратить работу, $A < 0$. Чтобы суммарная работа была положительной, сжатие надо проводить при меньшей температуре. $T_1 > T_2$.



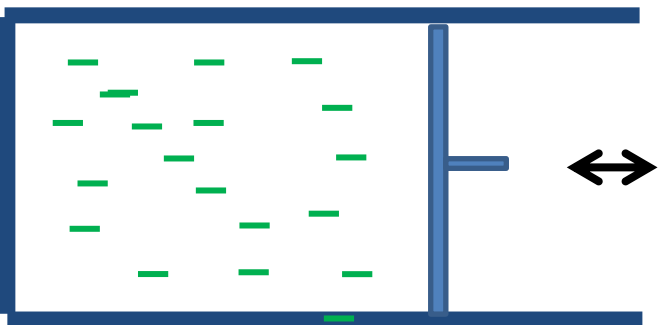
Охлаждающая жидкость



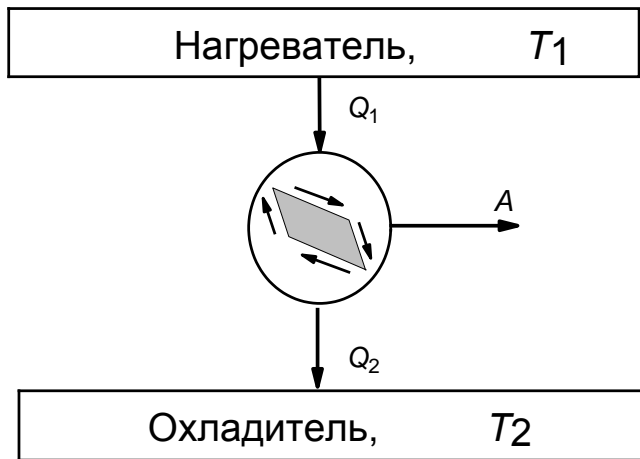
Тепловые машины



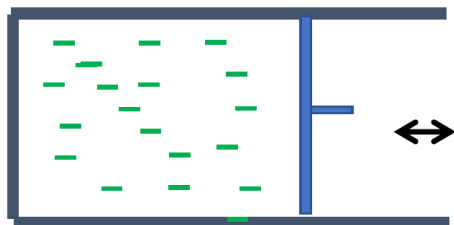
Современная теплоэлектростанция



Дизель-генератор



Цикл Карно



Садди Карно — французский физик и математик (1796-1832)

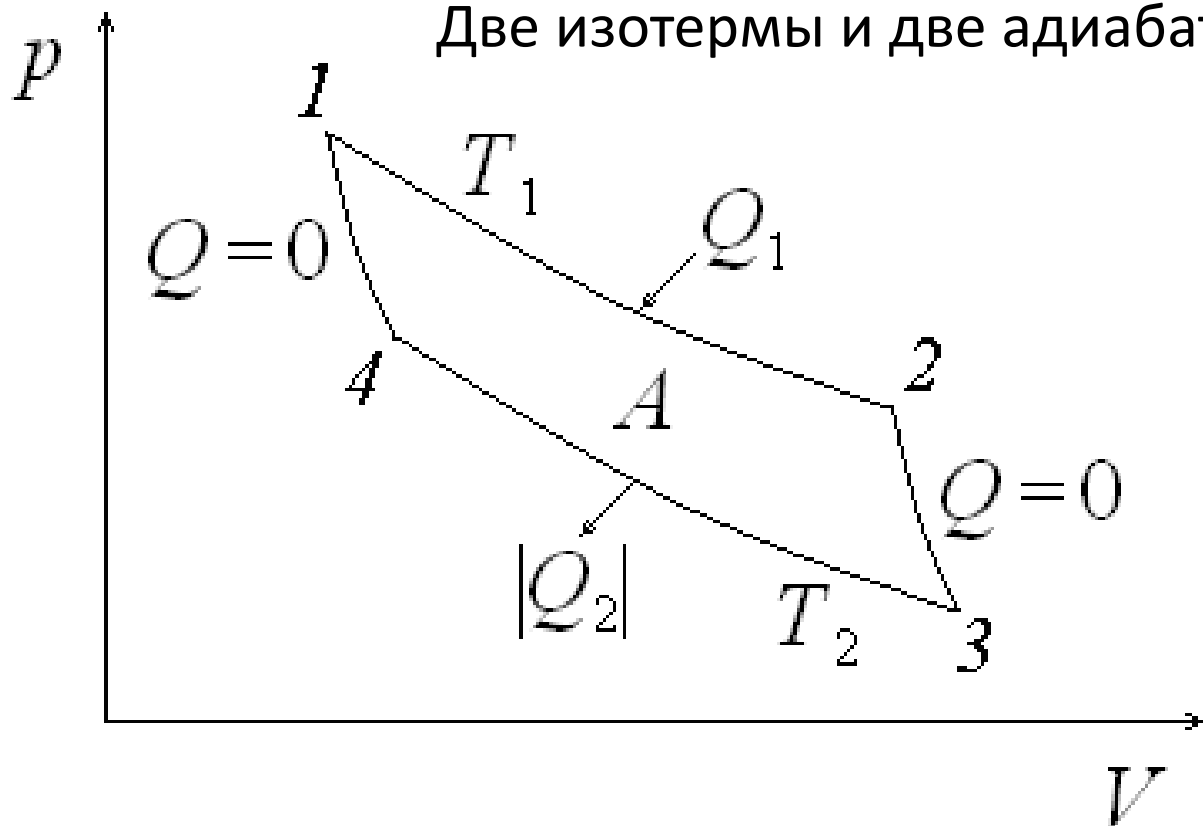
При полном прохождении цикла

$$\Delta U = Q - A = 0$$



$$Q_1 + Q_2 = A$$

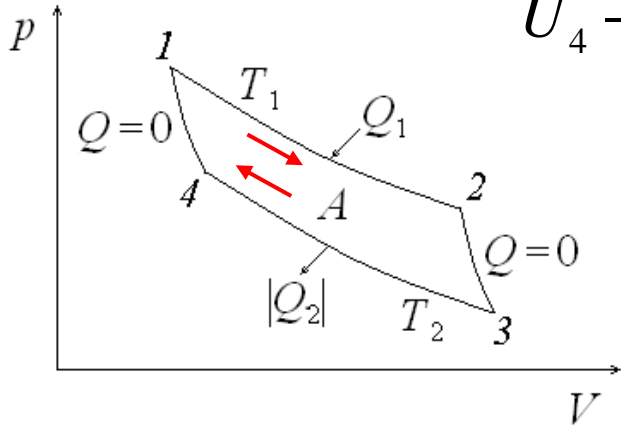
Две изотермы и две адиабаты



Идеальный газ

$$U_2 - U_1 = 0 \quad Q_1 = A_{12} = \nu RT_1 \cdot \ln(V_2/V_1) > 0.$$

$$U_4 - U_3 = 0 \quad Q_2 = A_{34} = \nu RT_2 \cdot \ln(V_4/V_3) < 0.$$



Адиабата

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

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

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

Делим равенства друг на друга, получаем, что $V_2/V_1 = V_3/V_4$

$$Q_2 = -\nu RT_2 \cdot \ln(V_2/V_1).$$

КПД есть отношение суммарной совершенной работы A к полученному от нагревателя количеству теплоты Q_1 :

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

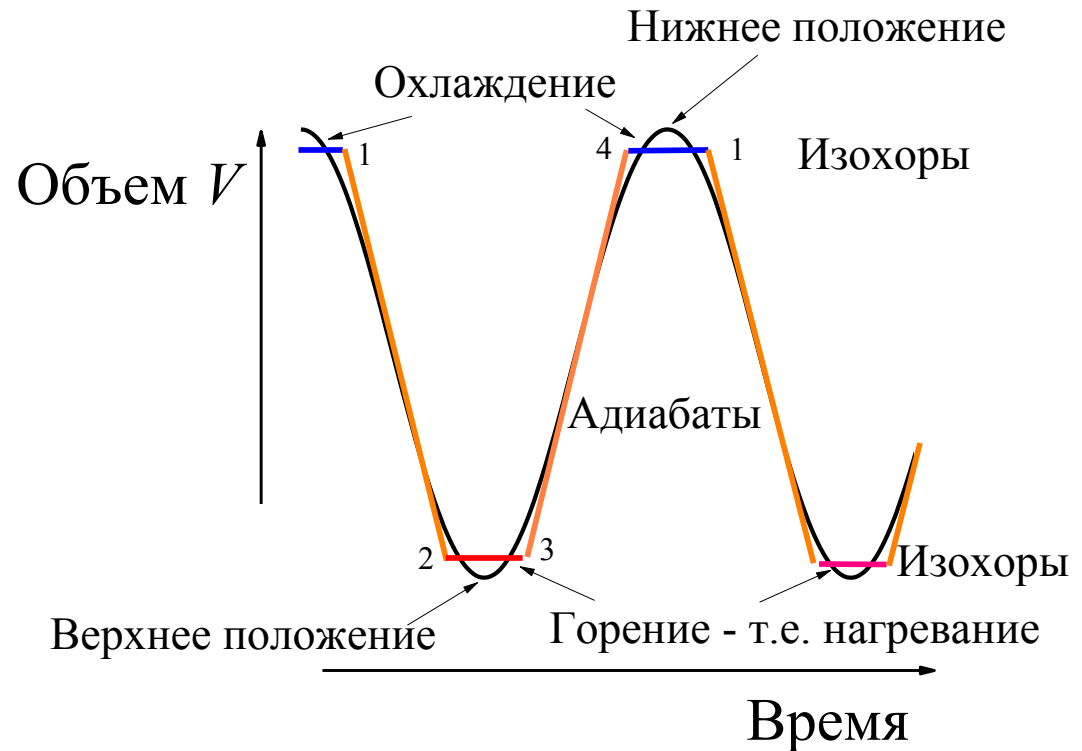
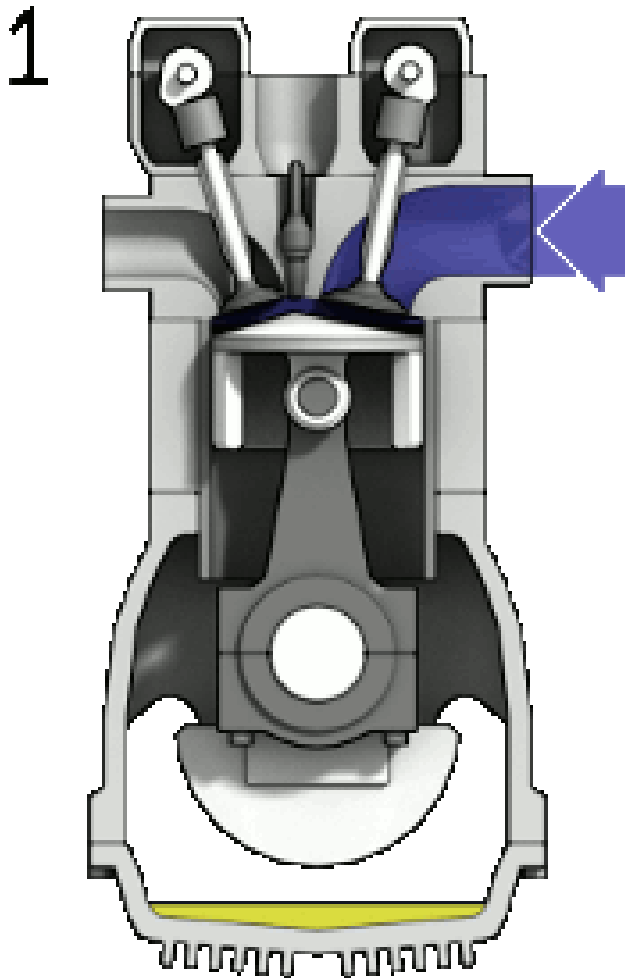
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Важное соотношение:

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

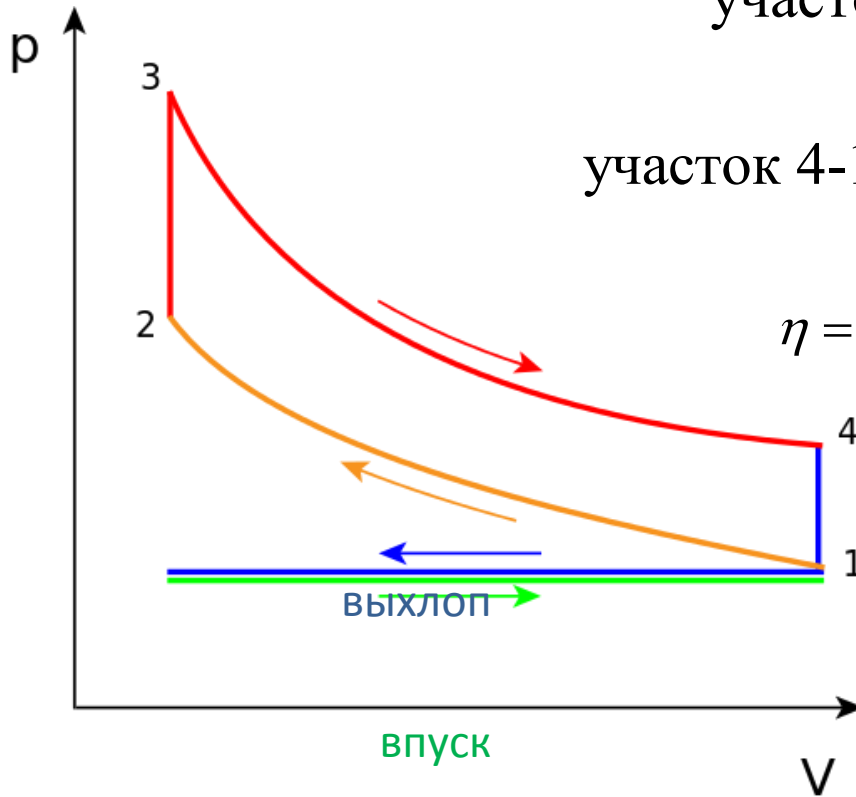
Двигатель внутреннего сгорания – цикл Отто

Тепло поступает от сгорания топливной смеси в рабочем цилиндре.



4 такта – впуска, сжатия, расширения и вывуска

P-V-диаграмма для цикла Отто



участок 2-3 (нагрев): $Q_1 = \nu C_V (T_3 - T_2)$

участок 4-1 (охлаждение): $|Q_2| = \nu C_V (T_4 - T_1)$

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

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



$$T_1 / T_2 = 1 / \varepsilon^{\gamma-1}$$

Степень сжатия $\varepsilon = V_1 / V_2$

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

$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_4, \\ V_2 &= V_3 \end{aligned}$$



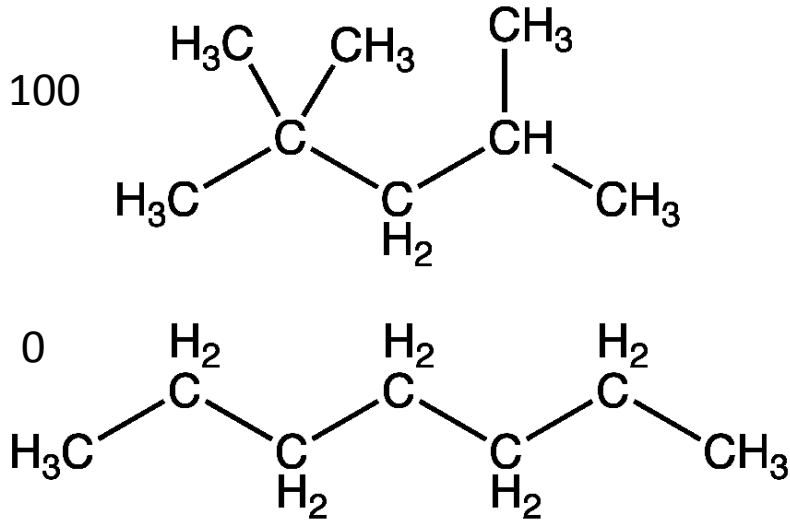
$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

КПД увеличивается при увеличении степени сжатия. Ее однако не удастся увеличить выше порядка 7 – 12 из-за эффекта детонации. Для топлива с высоким октановым числом детонация происходит при более высоких степенях сжатия.

Изо-октан

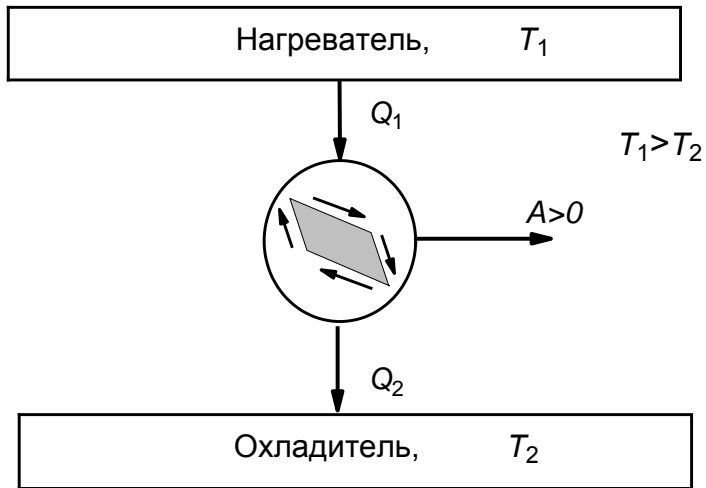


Н-гептан

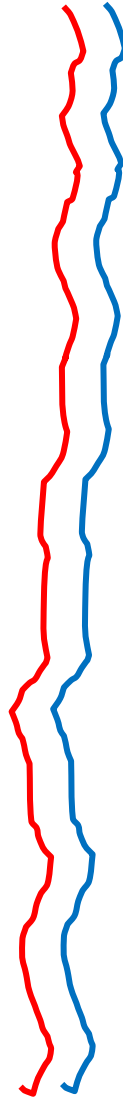
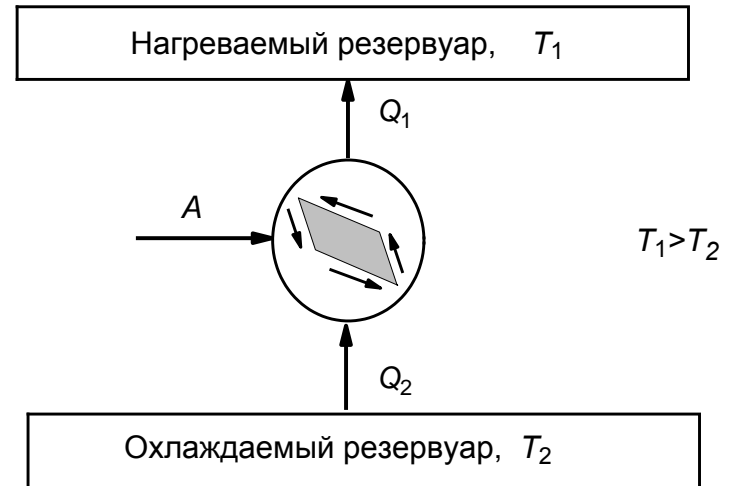


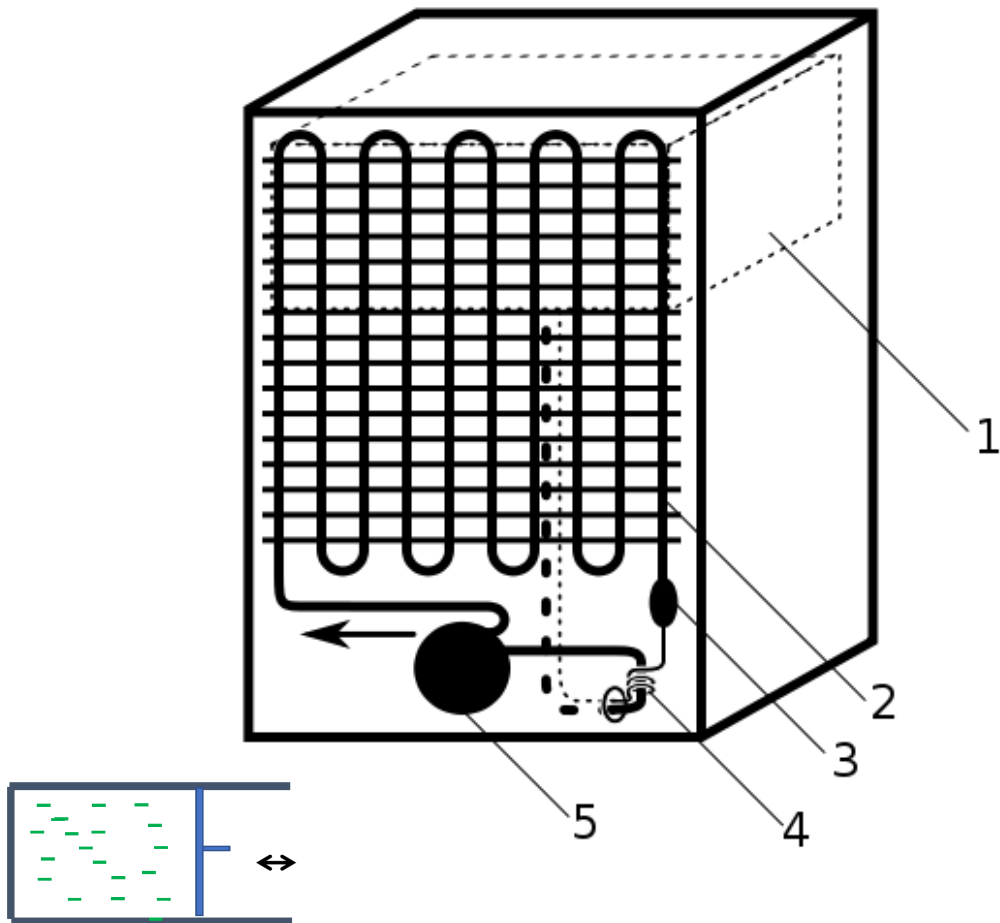
Обратный цикл: холодильная машина, тепловой насос

Тепловая машина



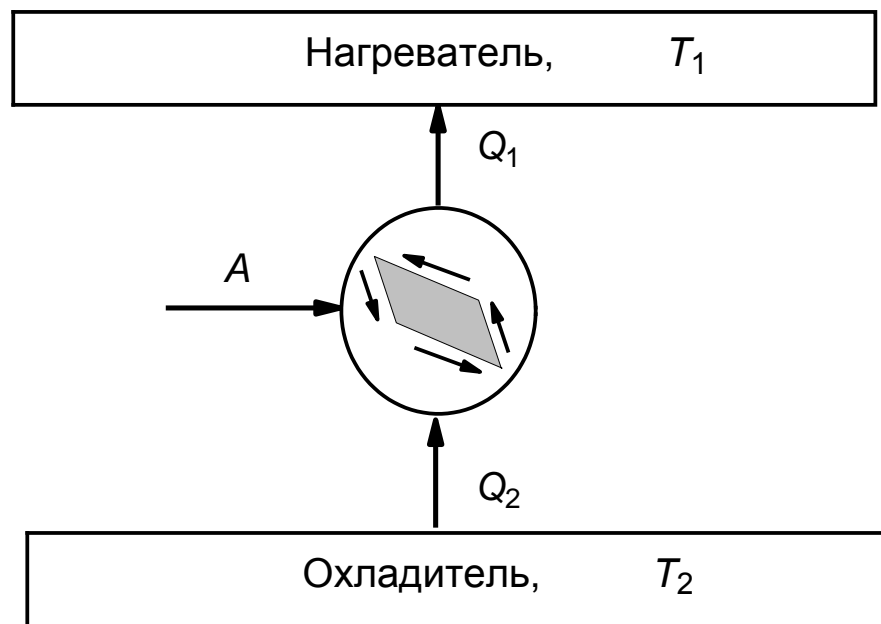
Холодильная машина, тепловой насос





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).

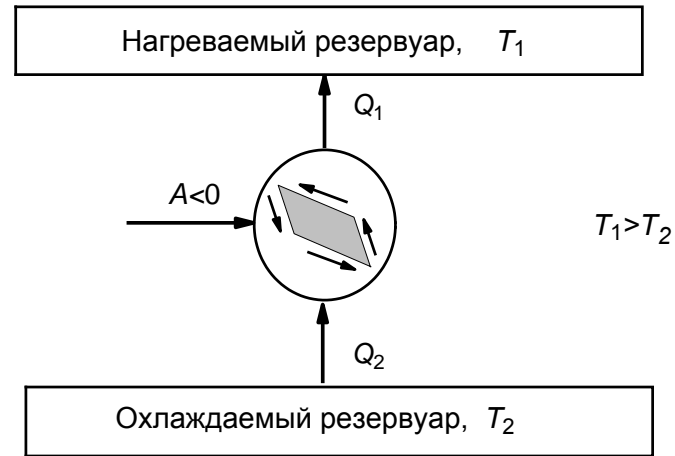


Если цель нагревание (получение теплоты Q_1), тогда это тепловой насос.

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 $K_{хол} = Q_2/(-A)$.



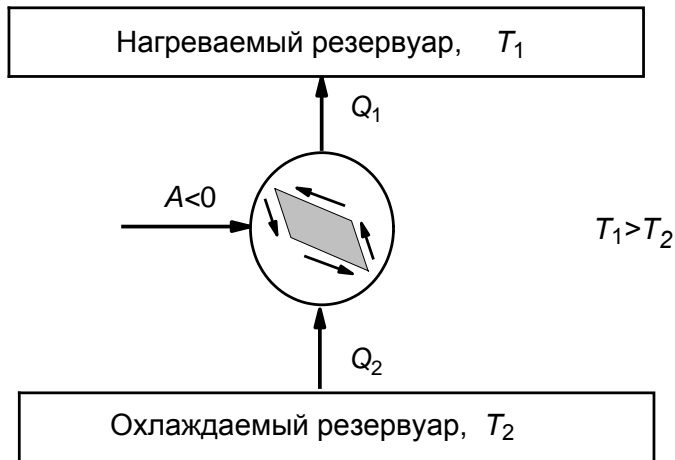
$$A = Q_2 + Q_1 \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

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

$$0 \leq K_{хол} < \infty$$

Тепловой насос:

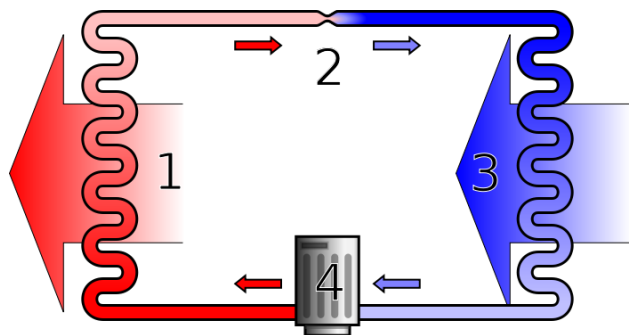
Эффективность определяется коэффициентом



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

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.

Тепловой насос – обогрев помещения за счет охлаждения окружающего пространства



Кондиционер в режиме обогрева – воздушный тепловой насос



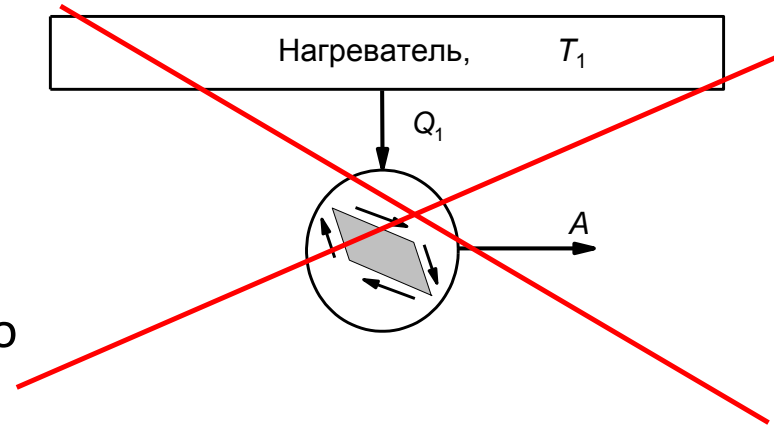
Охлаждается грунт вокруг дома, водоем и т.п.

Второе начало термодинамики

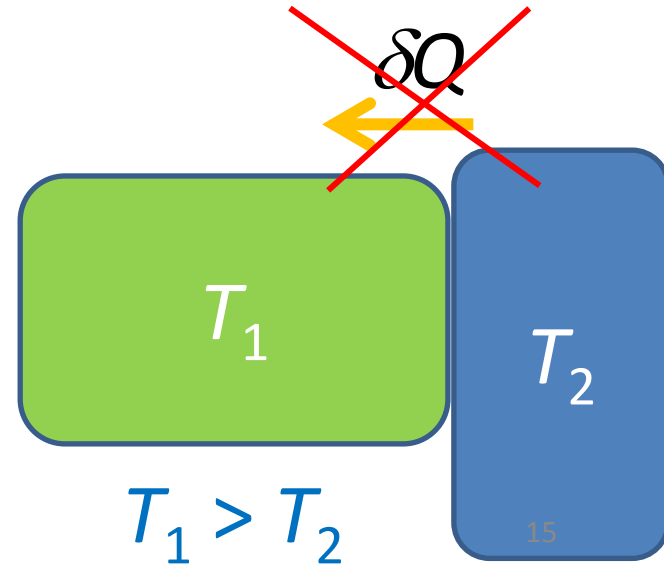
Так же как и первое, получено эмпирически. Существуют различные эквивалентные его формулировки.



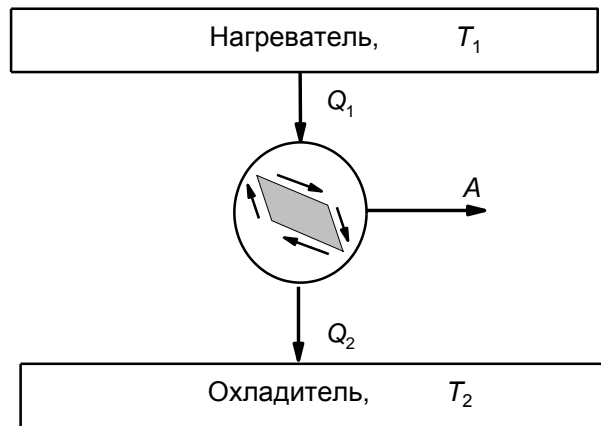
Формулировка Томсона (Кельвина): «невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара».



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



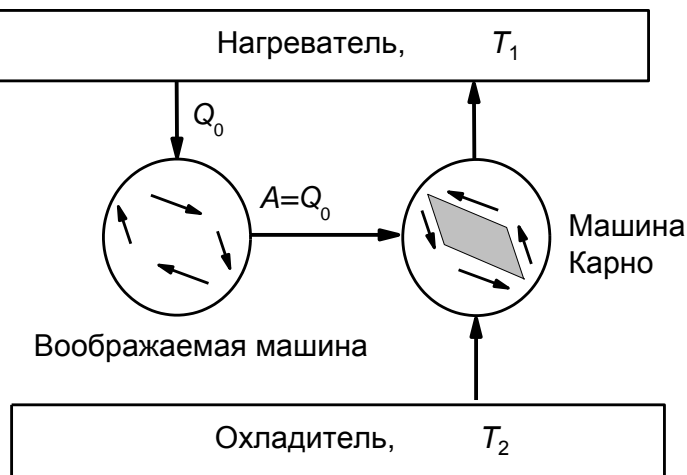
Докажем, что из первой формулировки следует вторая. Пусть невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара. И пусть при этом теплота может самопроизвольно переходить от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому (доказательство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

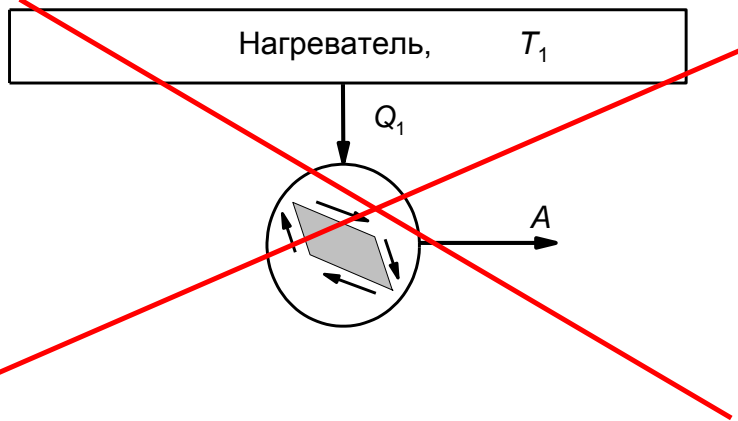
Из второй следует первая.

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

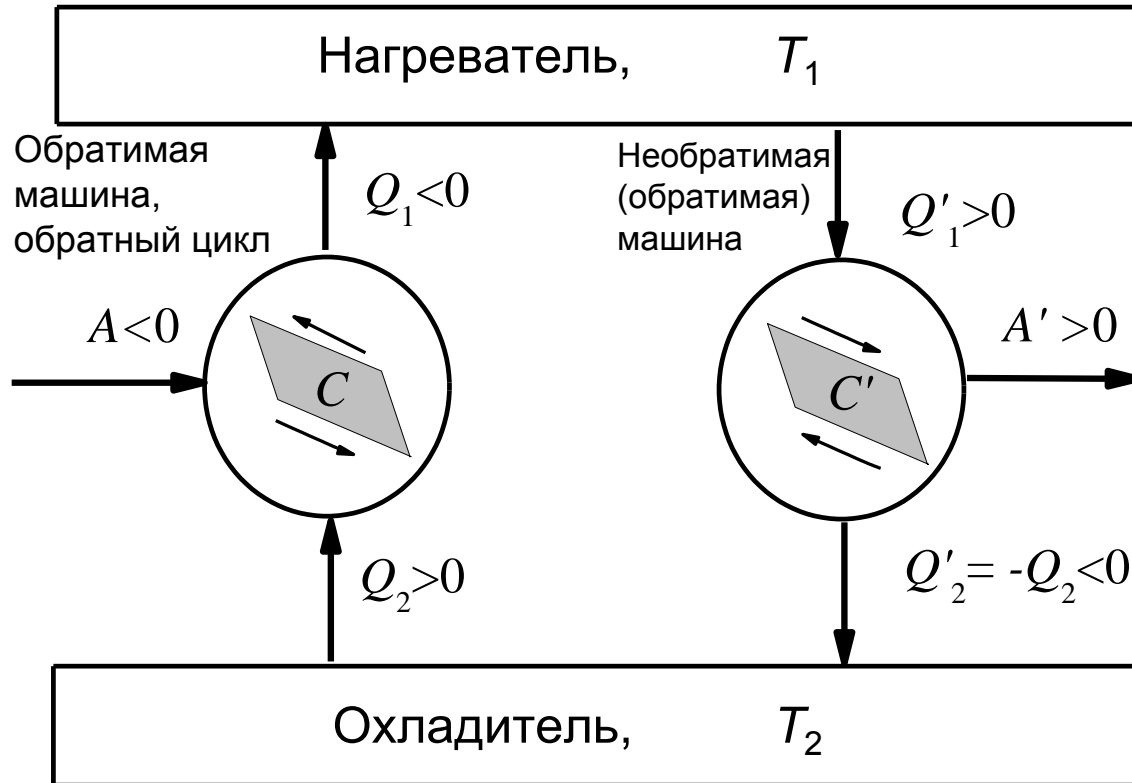
НЕВОЗМОЖНЫ

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.



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

$$A = Q_1 + Q_2$$

Масштабируем машины, чтобы $Q_2' = -Q_2$

Полная работа

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

$$A' = Q_1' - Q_2$$

Но получить работу только из тепла нагревателя нельзя. Тогда

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

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

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

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

$$\eta' \leq \eta$$

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

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

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

Таким образом, во-первых, 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 КПД обратимой машины определяется только температурами нагревателя и охладителя.

Во-вторых, КПД работающей по циклу Карно необратимой тепловой машины меньше КПД обратимой машины.

Для любой машины с любым рабочим телом:

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

Термодинамическая температура



Газовый термометр

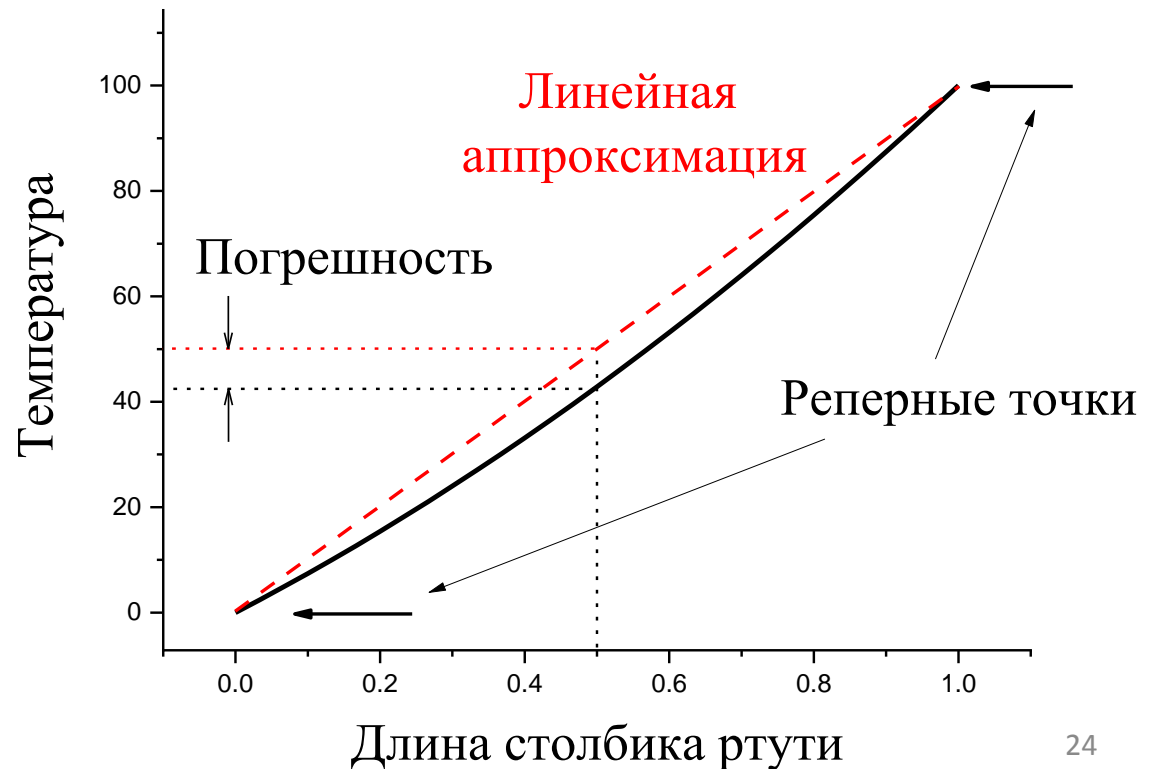
$$T = \frac{pV}{\nu R}$$

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.

Назовем термодинамическими температурами кипения воды и плавления льда величины

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

полученные из системы двух уравнений

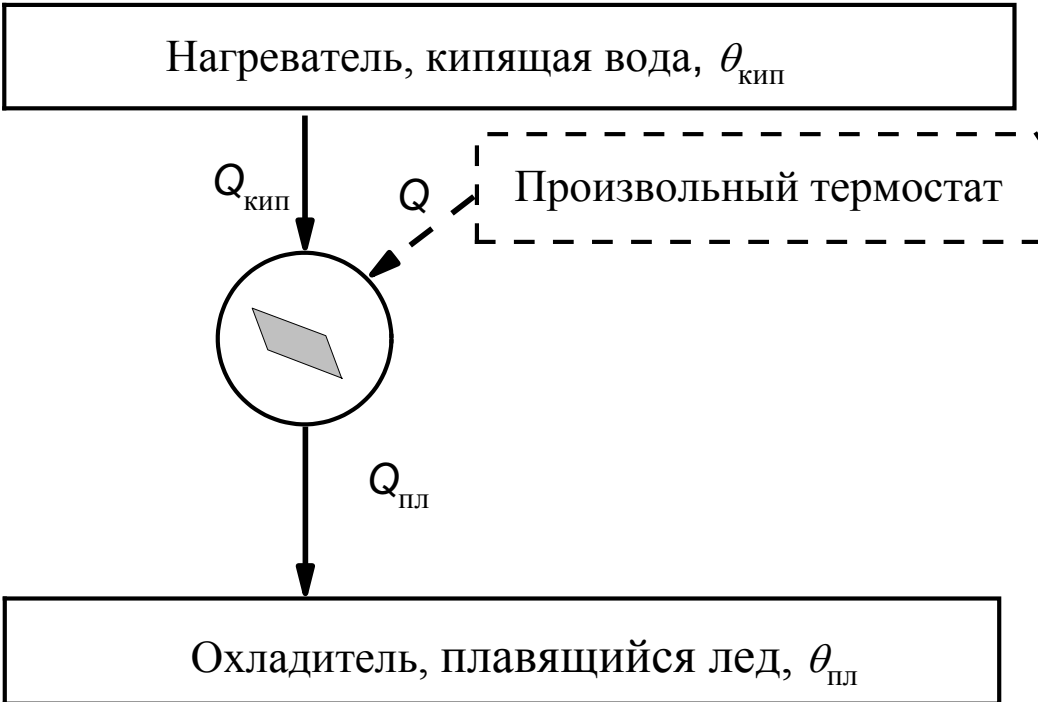
$$\frac{\theta_{\text{кип}}}{\theta_{\text{пл}}} = \frac{Q_{\text{кип}}}{|Q_{\text{пл}}|}$$

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

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

Для произвольного термостата

Согласно принципу Карно определение θ не зависит от используемого рабочего тела.

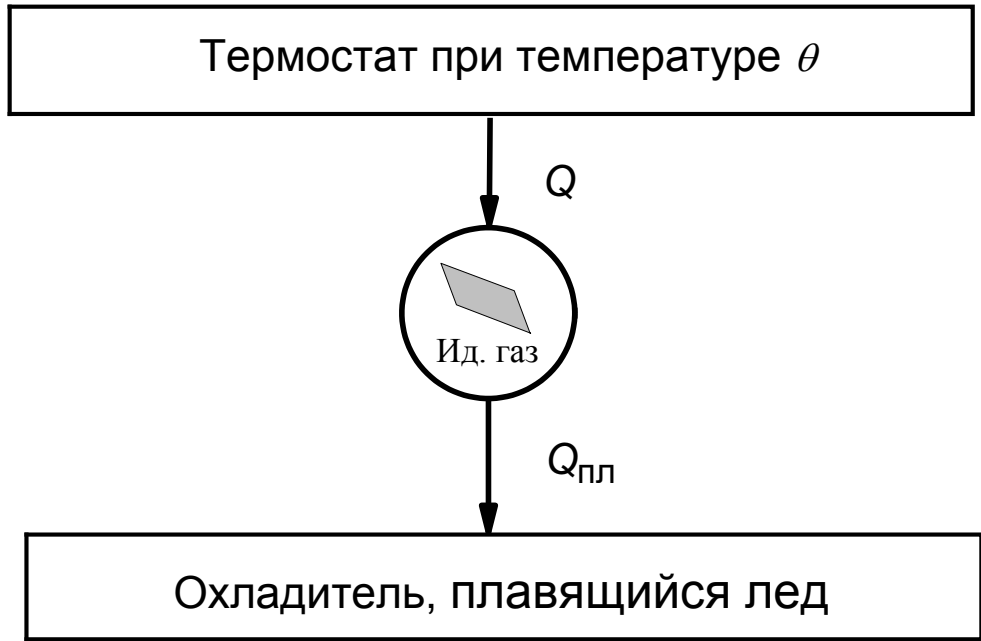


Сравнение с введенной ранее температурой

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

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 $T = \theta$