

Тема: « Тепловые двигатели и их КПД. Цикл Карно»

Тепловым двигателем называется устройство, способное превращать полученное количество теплоты в механическую работу. Механическая работа в тепловых двигателях производится в процессе расширения некоторого вещества, которое называется рабочим телом. В качестве рабочего тела обычно используются газообразные вещества (пары бензина, воздух, водяной пар). Рабочее тело получает (или отдает) тепловую энергию в процессе теплообмена с телами, имеющими большой запас внутренней энергии. Эти тела называются **тепловыми резервуарами**.

Как следует из первого закона термодинамики, полученное газом количество теплоты Q полностью превращается в работу A при изотермическом процессе, при котором внутренняя энергия остается неизменной ($\Delta U = 0$):

$$A = Q$$

Но такой однократный акт преобразования теплоты в работу не представляет интереса для техники. Реально существующие тепловые двигатели (паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и т. д.) работают циклически. Процесс теплопередачи и преобразования полученного количества теплоты в работу периодически повторяется. Для этого рабочее тело должно совершать круговой процесс или термодинамический цикл, при котором периодически восстанавливается исходное состояние. Круговые процессы изображаются на диаграмме (p, V) газообразного рабочего тела с помощью замкнутых кривых (рис.1). При расширении газ совершает положительную работу A_1 , равную площади под кривой abc , при сжатии газ совершает отрицательную работу A_2 , равную по модулю площади под кривой cda . Полная работа за цикл $A = A_1 + A_2$ на диаграмме (p, V) равна площади цикла. Работа A положительна, если цикл обходится по часовой стрелке, и A отрицательна, если цикл обходится в противоположном направлении.

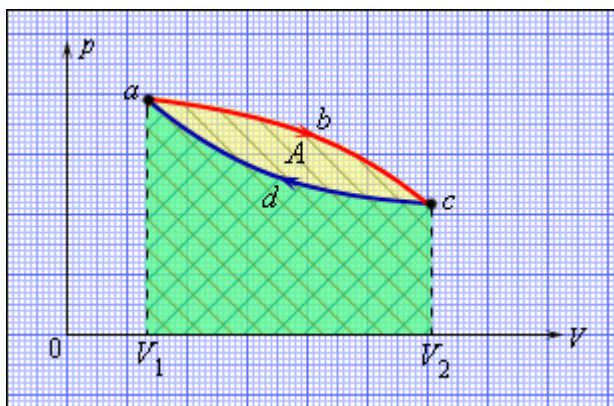


Рисунок 1.

Круговой процесс на диаграмме (p, V). abc – кривая расширения, cda – кривая сжатия. Работа A в круговом процессе равна площади фигуры $abcd$

Общее свойство всех круговых процессов состоит в том, что их невозможно провести, приводя рабочее тело в тепловой контакт только с одним тепловым резервуаром. Их нужно, по крайней мере, два. Тепловой резервуар с более высокой температурой

называют нагревателем, а с более низкой – холодильником. Совершая круговой процесс, рабочее тело получает от нагревателя некоторое количество теплоты $Q_1 > 0$ и отдает холодильнику количество теплоты $Q_2 < 0$. Полное количество теплоты Q , полученное рабочим телом за цикл, равно

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|.$$

При обходе цикла рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, следовательно, изменение его внутренней энергии равно нулю ($\Delta U = 0$). Согласно первому закону термодинамики,

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

Отсюда следует:

$$A = Q = Q_1 - |Q_2|.$$

Работа A , совершаемая рабочим телом за цикл, равна полученному за цикл количеству теплоты Q . Отношение работы A к количеству теплоты Q_1 , полученному рабочим телом за цикл от нагревателя, называется коэффициентом полезного действия η тепловой машины:

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

Коэффициент полезного действия указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от «горячего» теплового резервуара, превратилась в полезную работу. Остальная часть $(1 - \eta)$ была «бесполезно» передана холодильнику. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы ($\eta < 1$). Энергетическая схема тепловой машины изображена на рис. 2.

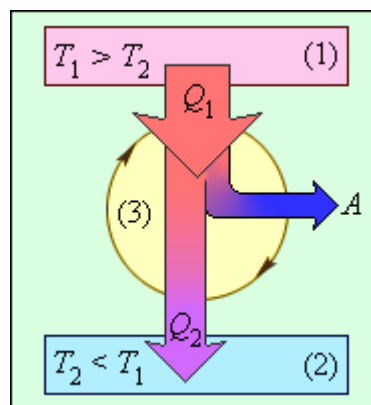


Рисунок 2.

Энергетическая схема тепловой машины: 1 – нагреватель; 2 – холодильник; 3 – рабочее тело, совершающее круговой процесс. $Q_1 > 0$, $A > 0$, $Q_2 < 0$; $T_1 > T_2$

В двигателях, применяемых в технике, используются различные круговые процессы. На рис.3 изображены циклы, используемые в бензиновом карбюраторном и в дизельном двигателях. В обоих случаях рабочим телом является смесь паров бензина или дизельного топлива с воздухом. Цикл карбюраторного двигателя внутреннего сгорания состоит из двух изохор (1–2, 3–4) и двух адиабат (2–3, 4–1). Дизельный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу, состоящему из двух адиабат (1–2, 3–4), одной изобары (2–3) и одной изохоры (4–1). Реальный коэффициент полезного действия у карбюраторного двигателя порядка 30 %, у дизельного двигателя – порядка 40 %.

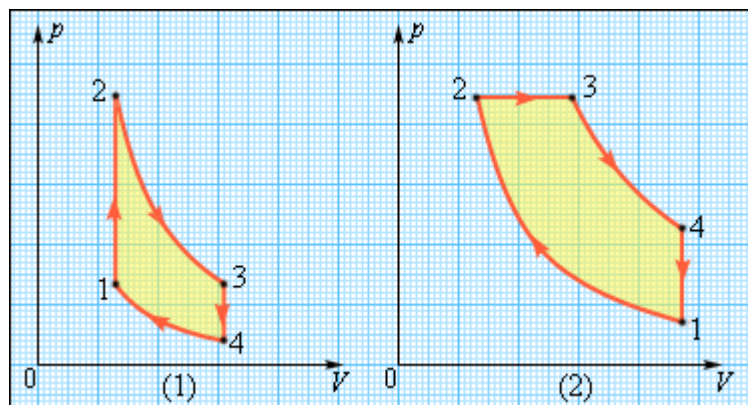


Рисунок 3.

Циклы карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (1) и дизельного двигателя (2)

В 1824 году французский инженер С. Карно рассмотрел круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, который сыграл важную роль в развитии учения о тепловых процессах. Он называется циклом Карно (рис. 4).

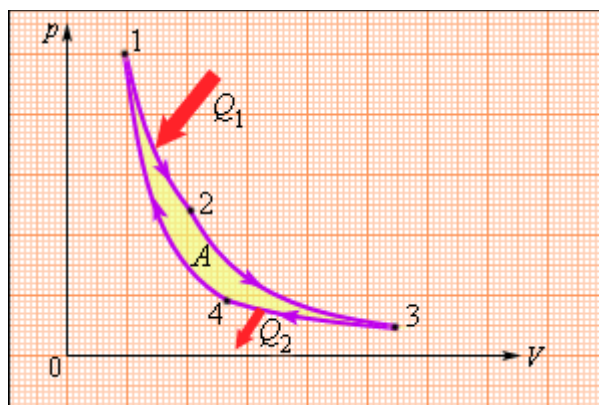


Рисунок 4.

Цикл Карно

Цикл Карно совершает газ, находящийся в цилиндре под поршнем. На изотермическом участке (1–2) газ приводится в тепловой контакт с горячим тепловым резервуаром (нагревателем), имеющим температуру T_1 . Газ изотермически расширяется, совершая работу A_{12} , при этом к газу подводится некоторое количество теплоты $Q_1 = A_{12}$. Далее на адиабатическом участке (2–3) газ помещается в адиабатическую оболочку и

продолжает расширяться в отсутствие теплообмена. На этом участке газ совершает работу $A_{23} > 0$. Температура газа при адиабатическом расширении падает до значения T_2 . На следующем изотермическом участке (3–4) газ приводится в тепловой контакт с холодным тепловым резервуаром (холодильником) при температуре $T_2 < T_1$. Происходит процесс изотермического сжатия. Газ совершает работу $A_{34} < 0$ и отдает тепло $Q_2 < 0$, равное произведенной работе A_{34} . Внутренняя энергия газа не изменяется. Наконец, на последнем участке адиабатического сжатия газ вновь помещается в адиабатическую оболочку. При сжатии температура газа повышается до значения T_1 , газ совершает работу $A_{41} < 0$. Полная работа A , совершаемая газом за цикл, равна сумме работ на отдельных участках:

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

На диаграмме (p , V) эта работа равна площади цикла.

Процессы на всех участках цикла Карно предполагаются квазистатическими. В частности, оба изотермических участка (1–2 и 3–4) проводятся при бесконечно малой разности температур между рабочим телом (газом) и тепловым резервуаром (нагревателем или холодильником).

Как следует из первого закона термодинамики, работа газа при адиабатическом расширении (или сжатии) равна убыли ΔU его внутренней энергии. Для 1 моля газа

$$A = -\Delta U = -C_V(T_2 - T_1),$$

где T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры газа.

Отсюда следует, что работы, совершенные газом на двух адиабатических участках цикла Карно, одинаковы по модулю и противоположны по знакам

$$A_{23} = -A_{41}.$$

По определению, коэффициент полезного действия η цикла Карно есть

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{A_{12} + A_{34}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

С. Карно выразил коэффициент полезного действия цикла через температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 :

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

Цикл Карно замечателен тем, что на всех его участках отсутствует соприкосновение тел с различными температурами. Любое состояние рабочего тела (газа) на цикле является квазиравновесным, т. е. бесконечно близким к состоянию теплового равновесия с окружающими телами (тепловыми резервуарами или термостатами). Цикл Карно

исключает теплообмен при конечной разности температур рабочего тела и окружающей среды (термостатов), когда тепло может передаваться без совершения работы. Поэтому цикл Карно – наиболее эффективный круговой процесс из всех возможных при заданных температурах нагревателя и холодильника:

$$\eta_{\text{Карно}} = \eta_{\text{max}}.$$

Любой участок цикла Карно и весь цикл в целом может быть пройден в обоих направлениях. Обход цикла по часовой стрелке соответствует тепловому двигателю, когда полученное рабочим телом тепло частично превращается в полезную работу. Обход против часовой стрелки соответствует холодильной машине, когда некоторое количество теплоты отбирается от холодного резервуара и передается горячему резервуару за счет совершения внешней работы. Поэтому идеальное устройство, работающее по циклу Карно, называют обратимой тепловой машиной.

В реальных холодильных машинах используются различные циклические процессы. Все холодильные циклы на диаграмме (p, V) обходятся против часовой стрелки. Энергетическая схема холодильной машины представлена на рис. 5.

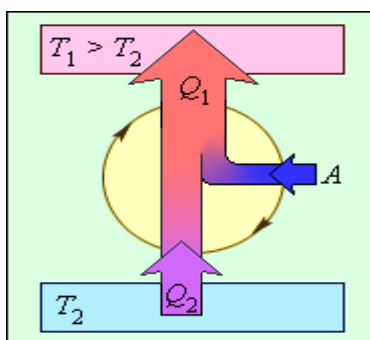


Рисунок 5.

Энергетическая схема холодильной машины. $Q_1 < 0$, $A < 0$, $Q_2 > 0$, $T_1 > T_2$

Устройство, работающее по холодильному циклу, может иметь двойное предназначение. Если полезным эффектом является отбор некоторого количества тепла $|Q_2|$ от охлаждаемых тел (например, от продуктов в камере холодильника), то такое устройство является обычным холодильником. Эффективность работы холодильника можно охарактеризовать отношением

$$\beta_x = \frac{|Q_2|}{|A|},$$

т. е. эффективность работы холодильника – это количество тепла, отбираемого от охлаждаемых тел на 1 джоуль затраченной работы. При таком определении β_x может быть и больше, и меньше единицы. Для обращенного цикла Карно

$$\beta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Если полезным эффектом является передача некоторого количества тепла $|Q_1|$ нагреваемым телам (например, воздуху в помещении), то такое устройство называется тепловым насосом. Эффективность β_T теплового насоса может быть определена как отношение

$$\beta_T = \frac{|Q_1|}{|A|},$$

т. е. количеством теплоты, передаваемым более теплым телам на 1 джоуль затраченной работы. Из первого закона термодинамики следует:

$$|Q_1| > |A|$$

следовательно, β_T всегда больше единицы. Для обращенного цикла Карно

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

Экологические проблемы использования тепловых машин. Мы живём в XXI веке, который невозможно представить без электростанций и автомобилей. Большая доля электростанций в мире – тепловые, то есть сжигающие топливо (уголь или газ). Автомобили, работающие на электричестве – редкость, все остальные сжигают топливо (бензин). При этом есть два губительных для окружающей среды обстоятельства.

Во-первых, выхлопные газы загрязняют атмосферу, делают её непригодной для нормальной жизнедеятельности человека. Во-вторых, выделяющееся тепло изменяет климат Земли и наносит непоправимый вред природе, животным и человеку. Поэтому задача человечества – переходить на более безопасные для окружающей среды двигатели.

Температура. Абсолютная шкала температур.

Молекулярно-кинетическая теория позволяет нам понять, что представляет собой физическая сущность такого сложного понятия, как температура. Когда соприкасаются два тела (или несколько тел), между ними происходит теплообмен. Если система тел изолирована (т.е. не взаимодействует с окружающими телами и внешней средой), теплообмен будет длиться до тех пор, пока температуры тел не выравняются и не установится тепловое равновесие.

Тепловым или термодинамическим равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры в системе сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что в системе не меняются объем и давление, не изменяются агрегатные состояния вещества, концентрации веществ. Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях. В системе тел, находящейся в состоянии

термодинамического равновесия, объемы и давления могут быть различными, а температуры обязательно одинаковы. Таким образом, температура характеризует состояние термодинамического равновесия изолированной системы тел.

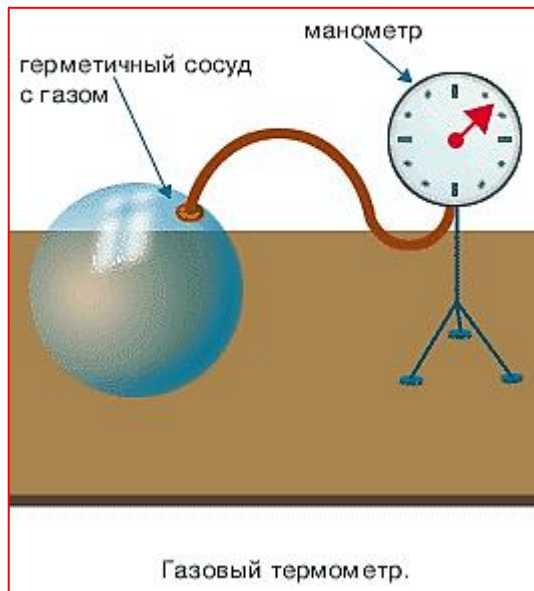
Для измерения температуры служат специальные приборы - **термометры**. Их действие основано на том факте, что при изменении температуры, изменяются и другие физические параметры тела, например, такие, как давление и объем.

В 1787 году Ж. Шарль из эксперимента установил прямую пропорциональную зависимость давления газа от температуры. Из опытов следовало, что при одинаковом нагревании давление любых газов изменяется одинаково. Использование этого экспериментального факта легло в основу создания газового термометра. Если использовать температурную шкалу Цельсия, то экспериментально установленный Шарлем закон имеет вид: $P = P_0(1 + \alpha t)$, где P_0 - давление газа при температуре 0°C , α - установленный из опытов температурный коэффициент давления газа. Можно преобразовать формулу, выражающую зависимость давления от температуры, используя абсолютную температурную шкалу (Т), предложенную Кельвином: $P = T \cdot \text{const.}$ ($T = t + 273 \text{ K}$). Измеряемая по шкале Цельсия температура может быть как положительной, так и отрицательной, в то время как абсолютная температура всегда неотрицательна. Наименьшая температура по абсолютной шкале - это **абсолютный нуль**. При такой температуре $P=0$, что согласно МКТ возможно, если средняя кинетическая энергия молекулы равна нулю.

Таким образом, при абсолютном нуле температуры прекращается тепловое движение частиц вещества. Ниже этой температуры быть уже не может. Эта температура приблизительно равна - 273°C . Единица абсолютной температуры называется **кельвином (K)**.

Опытным путем было установлено, что при постоянном объеме и температуре давление газа прямо пропорционально его концентрации. Объединяя экспериментально полученные зависимости давления от температуры и концентрации, получаем уравнение: $p = nkT$, где k - коэффициент пропорциональности - постоянная Больцмана. Постоянная Больцмана связывает температуру со средней кинетической энергией движения молекул в веществе. Это одна из наиболее важных постоянных в МКТ. Температура прямо пропорциональна средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Следовательно, температуру можно назвать мерой средней кинетической энергии частиц, характеризующей интенсивность теплового движения молекул. Этот вывод хорошо согласуется с экспериментальными данными, показывающими увеличение скорости частиц вещества с ростом температуры.

Рассуждения, которые мы проводили для выяснения физической сущности температуры, относятся к идеальному газу. Однако выводы, полученные нами, справедливы не только для идеального, но и для реальных газов. Справедливы они и для жидкостей и твердых тел. В любом состоянии температура вещества характеризует интенсивность теплового движения его частиц.



$$p = nkT$$

из экспериментов получено значение k :

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

k – постоянная Больцмана

Зависимость скорости движения молекул от температуры

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$p = nkT \quad p = \frac{2}{3} n \bar{E}_K$$

$$nkT = \frac{2}{3} n \bar{E}_K$$

$$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{2}{3} \cdot \bar{E}_K$$

Пример $T_1 = (373\text{K} - 273\text{K}) / 373\text{K} = 0,27 = 27\%$