

## Тема 8 Второе начало термодинамики

1. Тепловые машины . Цикл Карно.
2. Теоремы Карно. К.п.д. цикла Карно.
3. Различные формулировки второго начала термодинамики.
4. Неосуществимость вечных двигателей.

### 1. Тепловые машины . 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 (рисунок 8.1).

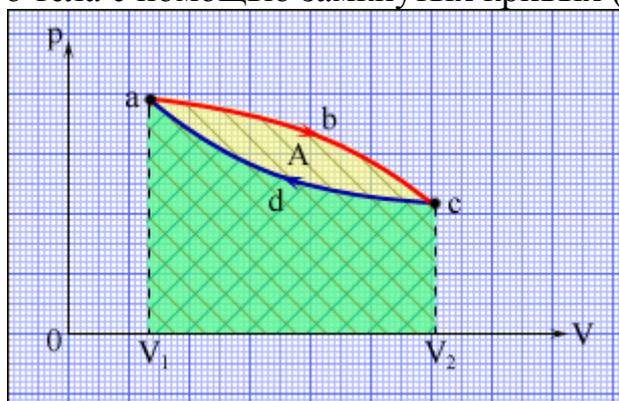


Рисунок 8.1 - Круговой процесс на диаграмме ( $p, V$ ).

abc – кривая расширения, cda – кривая сжатия.

Работа  $A$  в круговом процессе равна площади фигуры abcd

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.

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  $\eta$  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. 8.2

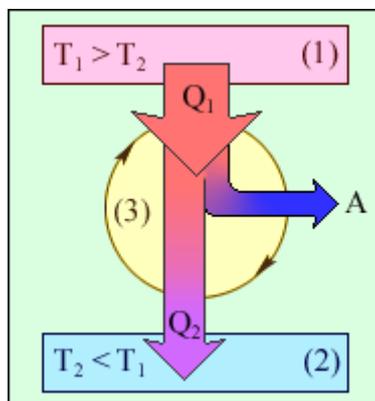


Рисунок 8.2 - Энергетическая схема тепловой машины.

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

В применяемых в технике двигателях используются различные круговые процессы. На рисунке 8.3 изображены циклы, используемые в бензиновом карбюраторном двигателе и в дизельном двигателе. 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 %.

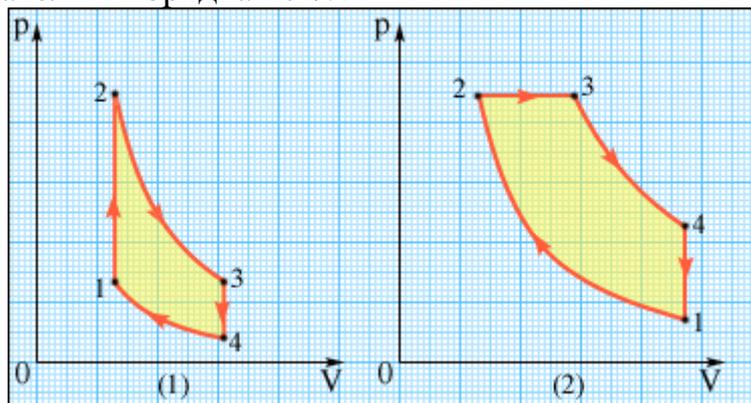


Рисунок 8.3 - Циклы карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (1) и дизельного двигателя (2).

В 1824 году французский инженер С. Карно рассмотрел круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Этот круговой процесс сыграл важную роль в развитии учения о тепловых процессах. Он называется циклом Карно (рис. 8.4).

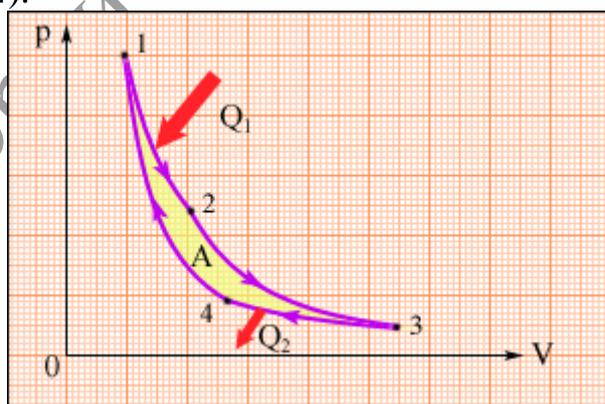


Рисунок 8.4 - Цикл Карно.

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.

Как следует из первого закона термодинамики, работа газа при адиабатическом расширении (или сжатии) равна убыли  $\Delta U$  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  $\eta$  цикла Карно есть

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

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 рисунке 8.5.

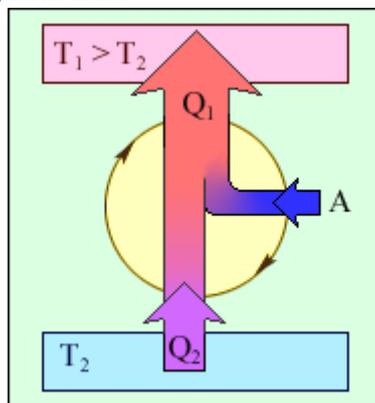


Рисунок 8.5 - Энергетическая схема холодильной машины.

$$Q_1 < 0, A < 0, Q_2 > 0, T_1 > T_2.$$

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  $\beta_x$  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  $\beta_T$  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,  $\beta_T$  всегда больше единицы. Для обращенного цикла Карно

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

## 2. Теоремы Карно. К.п.д. цикла Карно.

**1-я теорема Карно.** Коэффициент полезного действия тепловой машины Карно не зависит от рода рабочего тела и однозначно определяется температурами нагревателя и холодильника.

Пусть совершается обратимый круговой процесс состоящий из двух изотерм и двух адиабат (цикл Карно, см. рисунок 8.4). Тогда теплота получаемая в изотермическом процессе 1-2 равна:

$$Q_H = A_1 = R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

В адиабатическом процессе 2-3 работа совершается за счёт убыли внутренней энергии:

$$A_2 = C_v(T_1 - T_2)$$

Контакт с холодильником связан с совершением отрицательной работы:

$$Q_X = A_3 = -R \cdot T_X \cdot \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$$

Работа изотермического сжатия 3-4 определяется из соотношения:

$$A_4 = -C_v(T_1 - T_2)$$

Цикл закончен. Определим работу, как алгебраическую сумму работ на каждом этапе цикла.

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

$$A = R \cdot \left( T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - T_X \cdot \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \right)$$

Для адиабатных процессов 2-3 и 4-1 справедливо соотношение:

$$T_H \cdot V_2^{\gamma-1} = T_X \cdot V_3^{\gamma-1} \quad T_X \cdot V_4^{\gamma-1} = T_H \cdot V_1^{\gamma-1}$$

Составим пропорцию:

$$\frac{T_X}{T_H} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{\gamma-1}$$

Из пропорции следует:

$$\left(\frac{V_2}{V_3}\right) = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)$$

Тогда соотношение, определяющее работу за цикл можно переписать в виде:

$$A = R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) (T_H - T_X)$$

По определению, коэффициент полезного действия равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_H}$$

Подставив выражение для работы и теплоты, полученной от нагревателя, получим:

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{R \cdot \left( T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - T_X \cdot \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \right)}{R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_H - T_X}{T_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

**2-я теорема Карно.** Коэффициент полезного действия любого необратимого цикла, действующего между теми же тепловыми резервуарами не может превышать коэффициент цикла Карно.

Для доказательства этой теоремы нам понадобится *второе начало термодинамики*.

### 3. Различные формулировки второго начала термодинамики.

Второй закон термодинамики (как и первый) является эмпирическим, поэтому его можно сформулировать различными способами, которые, разумеется, эквивалентны.

**Принцип Клаузиуса.** Процесс, при котором не происходит никаких изменений кроме передачи тепла от более горячего тела к более холодному является необратимым. Иначе говоря, теплота не может спонтанно (сама собой) перейти от более холодного тела к более горячему без каких либо изменений в системе.

**Принцип Томпсона (Кельвина).** Процесс, при котором работа переходит в тепло без каких-либо изменений состояния системы является необратимым; иначе говоря, невозможно преобразовать в работу всё количество теплоты, взятое от тела с одной температурой, не производя никаких других изменений состояния системы.

**Принцип несуществования вечных двигателей второго рода.** Невозможно создать циклически работающую машину, которая бы производила работу за счёт поглощения тепла от одного резервуара, не совершая при этом других изменений состояния системы.

Изотермический процесс в идеальном газе на первый взгляд ставит под сомнению вторую и третью формулировки, однако надо понимать что каждый отдельный процесс не циклический, а цикличность основной принцип работы любой машины.

**Принцип Каратеодори.** Вблизи любого термически равновесного состояния термически однородной системы существует другое состояние, которое как угодно мало отличается от первого, но никогда не может быть достигнуто из него путём адиабатического перехода.

Во всех формулировка под термином «другие изменения» подразумеваются такие изменения, которые сохраняются после завершения процесса.

Докажем вторую теорему Карно. Представим, что между тепловыми резервуарами действуют две машины, одна из которых реализует обратный цикл Карно с к.п.д.  $\eta^*$ . Пусть машина I получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ , совершает работу  $A$  и передаёт холодильнику  $Q_2$ . Машина, работающая по обратному циклу II, получает от холодильника тоже самое количество теплоты  $Q_2^* = Q_2$  и посредством работы  $A^*$  передаёт нагревателю некоторое количество теплоты  $Q_1^*$ . Если бы вторая машина (машина Карно) работала бы в прямом направлении, то к.п.д. определялся бы соотношением:

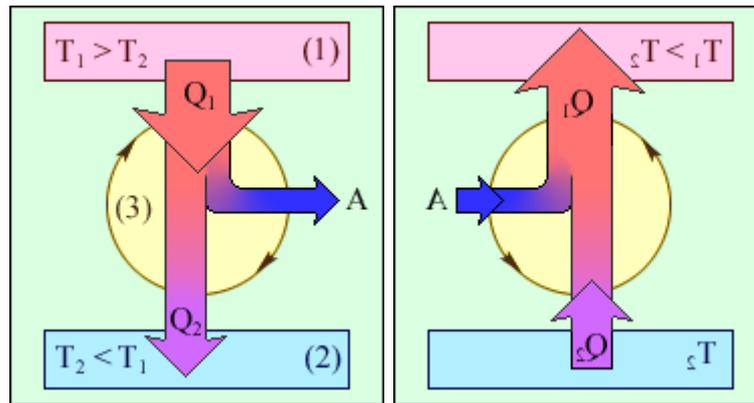


Рисунок 8.6 – Схема устройства, состоящего из тепловой и холодильной машины, работающих между одинаковыми тепловыми резервуарами.

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

Для машины I к.п.д. определяются соотношением:

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

При этом  $A^* \leq A$  согласно принципу Томпсона. Это значит, что  $Q_1^* \leq Q_1$  следовательно:

$$\eta^* = 1 - \frac{Q_2^*}{Q_1^*} \geq 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \eta$$

Репозитории ГГУ им. Ф. Скорины