

Лекция №6.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Первое начало термодинамики утверждает, что сумма всех энергий, участвующих в процессе изменения состояния системы, остается постоянной. Так, механическая энергия может быть полностью преобразована в тепловую. Обратный путь – превращение теплоты в механическую работу – ограничивает второе начало термодинамики.

Приведем несколько формулировок второго начала термодинамики, являющиеся эквивалентными друг другу:

1. Вечный двигатель второго рода неосуществим.
2. Если два тела с разными температурами привести в тепловой контакт, то тепло будет переходить от более горячего тела к более холодному.
3. Никакая тепловая машина периодического действия не может иметь КПД, превышающий $(T_1 - T_2) / T_1$, где T_1 – верхняя, T_2 – нижняя температура цикла.

Обратимые, необратимые и круговые процессы

Термодинамическая система находится в состоянии термодинамического равновесия, если температура и давление имеют постоянные значения в любом месте занятого ею объема. При неизменных внешних условиях значения всех ее термодинамических параметров остаются неизменными сколь угодно долго. Такое состояние называется *равновесным*.

Процесс называется обратимым, если он может протекать в обратном направлении, причем так, что система проходит те же промежуточные состояния, что и при прямом процессе, но в обратной последовательности.

Примерами обратимых процессов в идеальном газе служат изотермический и адиабатный процессы.

Чаще всего, однако, мы имеем дело с процессами необратимыми, которые сами по себе протекают только в одном направлении. Если, например, привести в соприкосновение два тела с разными температурами, то более нагретое тело будет отдавать тепло менее нагретому телу до тех пор, пока их температуры не сравняются. Обратный процесс – переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому – никогда не происходит.

Необратимым является процесс расширения газа в пустоту. Если в сосуде (рис. 2), левая часть которого заполнена газом, а правая – пустая, убрать перегородку, то газ займет весь объем сосуда, и давление всюду станет одинаковым. Процесс выравнивания концентраций, диффузия, трение, пластическая деформация, передача тепла через излучение – примеры необратимых процессов.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

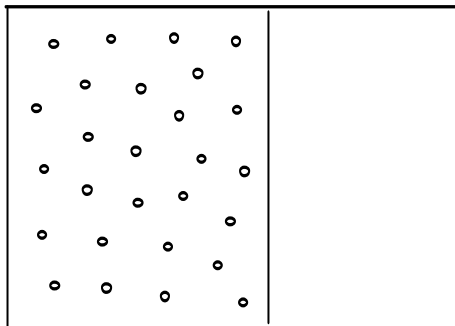


Рис. 2

Рассмотрим еще один вид тепловых процессов, имеющих важное значение для обсуждаемого здесь вопроса о преобразовании тепловой энергии в механическую работу. Это *циклические процессы*, или *циклы*.

Циклическим называется процесс, при котором термодинамическая система проходит ряд различных промежуточных состояний и возвращается к своему начальному состоянию.

На p - V -диаграмме циклический процесс изображается замкнутой кривой (рис. 3). Работу, совершаемую системой за один цикл, геометрически можно представить площадью, охватываемой этой кривой. Работа, совершаемая при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 по “верхнему” пути, положительна и численно равна площади фигуры $1a2V_2V_11$. Работа, совершаемая при обратном переходе из состояния 2 в состояние 1 по “нижнему” пути, отрицательна. Численно она равна площади фигуры $2V_2V_11b2$. Совершенная за цикл работа равна разности площадей этих фигур, т.е. площади, ограниченной кривой, изображающей цикл. Эта работа положительна, если цикл протекает по направлению хода часовой стрелки, и отрицательна, если он совершается в обратном направлении.

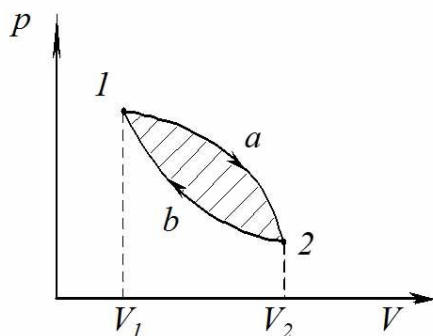


Рис. 3

На p - V -диаграмме циклический процесс изображается замкнутой кривой (рис. 3). Работу, совершаемую системой за один цикл, геометрически можно представить площадью, охватываемой этой кривой. Работа, совершаемая при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 по “верхнему” пути, положительна и численно равна площади фигуры $1a2V_2V_11$. Работа, совершаемая при обратном переходе из состояния 2 в состояние 1 по “нижнему” пути, отрицательна. Численно она равна площади фигуры $2V_2V_11b2$. Совершенная за цикл работа равна разности площадей этих фигур, т.е. площади, ограниченной кривой, изображающей цикл. Эта работа положительна, если цикл протекает по направлению хода часовой стрелки, и отрицательна, если он совершается в обратном направлении.

направлению хода часовой стрелки, и отрицательна, если он совершается в обратном направлении.

Принцип работы тепловой машины

Тепловой машиной называется устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую работу. Выясним условия, при которых возможно такое преобразование. В системе тел, находящихся в тепловом равновесии, без внешнего вмешательства никаких процессов происходить не может. Нельзя выполнить и работу, поскольку она связана с направленным движением макроскопических тел, а тепловое движение молекул хаотично и не имеет никакого преимущественного направления в пространстве. Для получения механической работы, очевидно, надо иметь два тела с различными температурами и

прибегнуть к помощи третьего тела, которое и будет эту работу совершать. Например, можно взять идеальный газ, заключенный в цилиндре с подвижным поршнем, стенки которого обладают хорошей теплопроводностью.

Пусть первоначально газ в цилиндре имеет температуру окружающего воздуха, а давление газа равно атмосферному. Если цилиндр привести в контакт с телом, нагретым до более высокой температуры, то газ внутри цилиндра расширится, поглотив у этого тела некоторое количество теплоты и совершив механическую работу. Чтобы вернуть поршень в исходное положение и подготовить систему к повторному выполнению работы, нужно охладить газ, приведя цилиндр в контакт с более холодным телом, например, с тем же окружающим воздухом. При обратном ходе поршня, сопровождающем охлаждение газа, совершается работа обратного знака. Поскольку работа расширения превосходит работу сжатия, т.к. температура нагретого тела выше температуры холодного, такое устройство способно преобразовывать теплоту в механическую работу.

Цикл Карно

Из сказанного в предыдущем параграфе следует, что всякая тепловая машина должна иметь три составные части (рис. 4):

- 1) нагреватель – “горячее” тело с температурой T_1 ;
- 2) рабочее тело, в качестве которого можно взять идеальный газ в цилиндре с поршнем;
- 3) охладитель – тело, имеющее температуру T_2 , более низкую, чем у нагревателя.

Это машина периодического действия. За один период (цикл) газ в цилиндре сначала расширится, совершив некоторую работу A и получив при этом от нагревателя количество теплоты Q_1 , затем вновь сожмется, отдав часть тепла Q_2 охладителю. Если обе величины Q_1 и Q_2 считать положительными, то, по закону сохранения энергии:

$$A = Q_1 - Q_2. \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины равен отношению работы A , совершаемой ею за один цикл, к количеству теплоты Q_1 , получаемой рабочим телом за один цикл от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (2)$$

При этом безразлично, какой процесс происходит с рабочим телом – обратимый или необратимый.

Выясним, при каких условиях КПД тепловой машины будет максимальным. Машину, имеющую при данных внешних условиях наибольшее значение коэффициента полезного действия, называют идеальной. Анализ показывает, что для этого нужно:

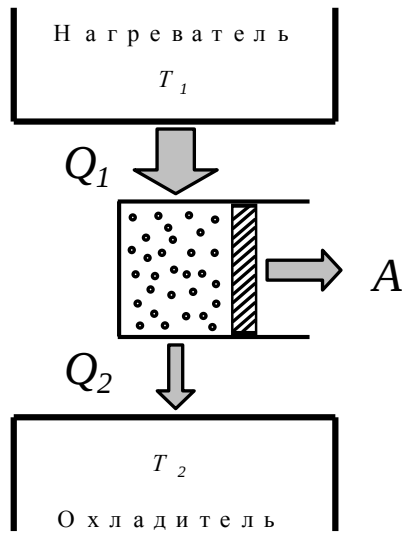


Рис. 4

1) избавиться от трения между цилиндром и поршнем;

2) устранить процессы непосредственной передачи тепла от нагревателя охладителю и при работе машины использовать только обратимые процессы.

Таковыми процессами являются изотермический и адиабатный. Цикл Карно – совершаемый рабочим телом (идеальным газом) круговой процесс, включающий в себя две изотермы и две адиабаты.

В качестве исходного возьмем состояние, обозначенное на Vp -диаграмме точкой a (рис. 5), когда рабочее тело находится под давлением p_a и занимает объем V_a , а его температура равна температуре нагревателя T_1 .

Не нарушая контакта рабочего тела с нагревателем, расширим его изотермически до объема V_b . Уравнение этого процесса:

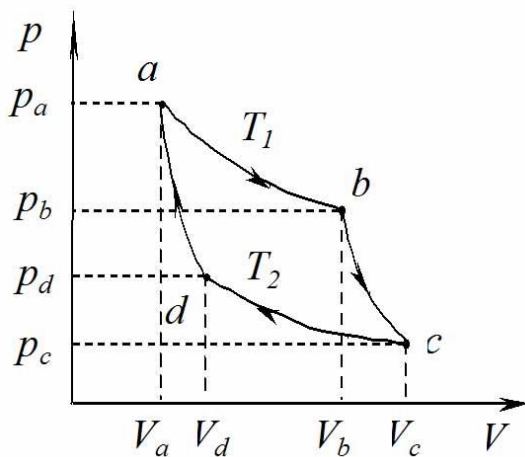


Рис. 5

$$p_a V_a = p_b V_b, \quad (3)$$

а количество теплоты, заимствованное рабочим телом у нагревателя определяется выражением:

$$Q_1 = A_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_b}{V_a}. \quad (4)$$

Теплоизолируем рабочее тело и расширим адиабатно так, чтобы его температура понизилась до температуры охладителя T_2 . Уравнение этого процесса:

$$p_b V_b^\gamma = p_c V_c^\gamma. \quad (5)$$

Приведем теперь рабочее тело в тепловой контакт с охладителем и сожмем изотермически до объема V_d , такого, чтобы точка d на Vp -диаграмме принадлежала адиабате, проходящей через точку a . Уравнение этого процесса

$$p_c V_c = p_d V_d . \quad (6)$$

Количество теплоты, отданное рабочим телом охладителю при изотермическом сжатии, отрицательно и по модулю составляет

$$Q_2 = |A_{cd}| = \nu RT_2 \ln \frac{V_c}{V_d} . \quad (7)$$

Возвратим теперь рабочее тело в исходное состояние (в точку a на Vp -диаграмме) путем адиабатного сжатия, описываемого уравнением

$$p_d V_d^\gamma = p_a V_a^\gamma . \quad (8)$$

Температура рабочего тела в этом процессе повысится до температуры нагревателя T_1 . За полный цикл оно совершает работу, равную разности полученной у нагревателя теплоты Q_1 и теплоты Q_2 , отданной охладителю: $A = Q_1 - Q_2$. КПД цикла найдем, подставив в формулу (2) выражения (1), (4) и (7):

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\ln (V_c / V_d)}{\ln (V_b / V_a)} . \quad (9)$$

Покажем, что отношение логарифмов равно единице. Для этого перемножим уравнения (3), (5), (6) и (8):

$$p_a p_b p_c p_d V_a V_b^\gamma V_c V_d^\gamma = p_b p_c p_d p_a V_b V_c^\gamma V_d V_a^\gamma ,$$

откуда следует, что

$$\left(\frac{V_b}{V_a} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_c}{V_d} \right)^{\gamma-1} .$$

Логарифмируя и сокращая $(\gamma - 1)$, получим

$$\ln \frac{V_b}{V_a} = \ln \frac{V_c}{V_d} .$$

Тогда выражение (9) принимает вид

$$\eta_{ид} = 1 - \frac{T_2}{T_1} . \quad (10)$$

Из этой формулы следует, что КПД идеальной тепловой машины меньше единицы, т.е. она не может полностью преобразовать тепловую энергию в механическую работу – часть тепла должна быть отдана охладителю. Теоретический коэффициент полезного действия тепловой машины, выражаемый формулой (10), не зависит от особенностей ее устройства, способа действия и природы газа, используемого в качестве рабочего тела. Существенно лишь исключение всех необратимых процессов, и тогда решающими являются температура нагревателя T_1 , при которой рабочее тело отбирает у него количество теплоты

Q_1 , и температура охладителя T_2 , при которой ему передается количество теплоты Q_2 .

Теоретический цикл, построенный Карно, показывает, что для увеличения КПД тепловой машины нужно понижать температуру охладителя и повышать температуру нагревателя. Поскольку охладителем в реальных условиях обычно является окружающий воздух, первый путь невозможен. Второй путь связан с трудностями создания материалов для изготовления деталей двигателей, способных работать при высоких температурах.

Кроме двигателей внутреннего сгорания, используемых на автотранспорте, тепловозах, дизельэлектрходах (кораблях), к тепловым относятся также турбореактивные двигатели самолетов и ракетные двигатели.

Цикл Карно может происходить и в обратном направлении (рис. 6). Ма-

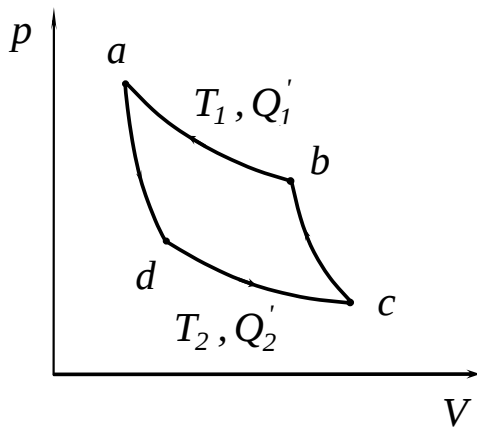


Рис. 6

шина в этом случае работает как тепловой насос, перекачивающий тепло от холодного тела к горячему. Рабочее тело (идеальный газ) переводится из точки a на p -диаграмме, изображенной на рис. 6, в точку d путем адиабатного расширения, затем расширяется изотермически, отбирая тепло у “холодного” тела, затем адиабатно сжимается, переходя в точку b , и, наконец, сжимается изотермически, отдавая тепло “горячему” телу. Так работают бытовые холодильники, кондиционеры и тепловые насосы.

Отношение количества теплоты Q_2' , отобранного у холодного тела, к выполненной при этом механической работе A называется коэффициентом преобразования холодильника:

$$\frac{Q_2'}{A} = \frac{Q_2'}{Q_1' - Q_2'} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} . \quad (11)$$

Это отношение обычно больше единицы. В домашнем холодильнике температура T_2 холодного резервуара (морозильной камеры) примерно составляет 250 К. Горячим резервуаром служит комнатный воздух, температура которого $T_1 \approx 300$ К. Формула (11) дает следующее значение коэффициента преобразования холодильника:

$$\frac{Q_2'}{A} = \frac{250}{300 - 250} = 5 .$$

На каждый джоуль электроэнергии, затраченной на работу компрессора, приходится 5 Дж тепла, отнятого у холодильной камеры.