

## Лекция №4.

# 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.

### ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Рассмотрим вид тепловых процессов, имеющих важное значение при 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  $p$ -диаграмме циклический процесс изображается замкнутой кривой (рис. 1). 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.

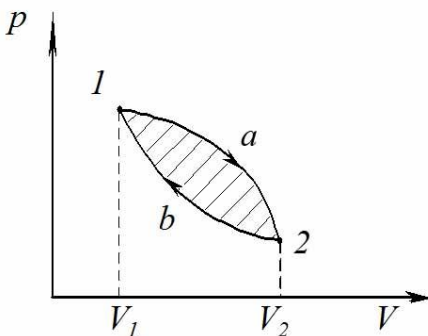


Рис. 1

### Цикл Карно

Всякая тепловая машина должна иметь три составные части (рис. 2):

- 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.

КПД тепловой машины будет максимальным если использовать только обратимые процессы.

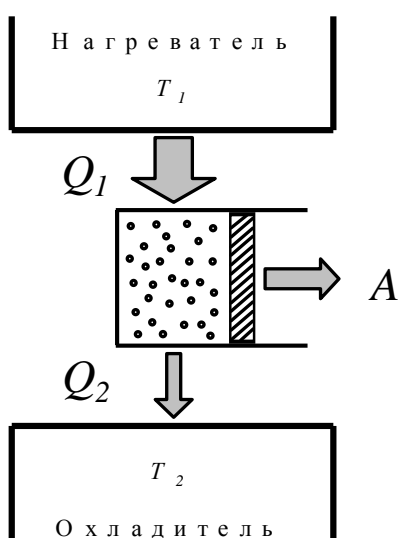


Рис. 2

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  $pV$ -диаграмме точкой  $a$  (рис. 3), 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:

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

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:

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

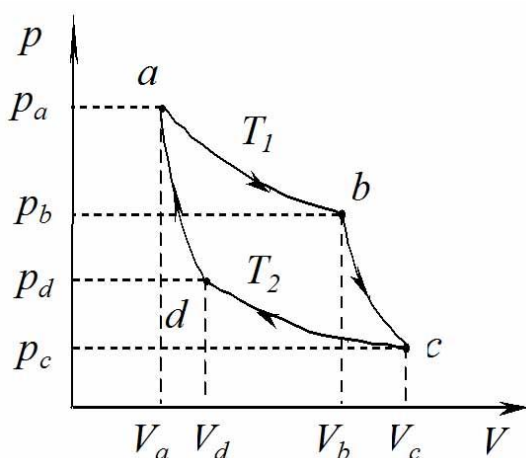


Рис. 3

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 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.

Цикл Карно может происходить и в обратном направлении (рис. 4). Ма-

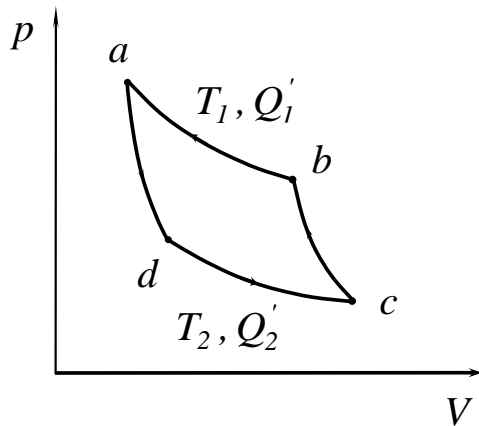


Рис. 4

шина в этом случае работает как тепловой насос, перекачивающий тепло от холодного тела к горячему. Рабочее тело (идеальный газ) переводится из точки *a* на *Vp*-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.