Цикл Карно. КПД цикла Карно (идеальной тепловой машины)

При изучении работы различных тепловых машин большую роль сыграл цикл, предложенный Карно и детально рассмотренный им в 1824 г. в связи с определением КПД тепловых машин. Циклом Карно называют обратимый круговой процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических равновесных процессов.

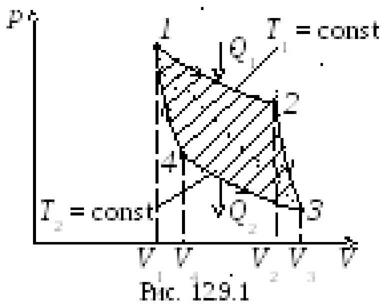

Рис. 12.9.1

На рис. 12.9.1 изображен прямой цикл Карно, состоящий из четырех последовательных процессов: *1−2* − изотермическое расширение при температуре T_1; *2−3* − адиабатическое расширение ($Q_{23} = 0$); *3−4* − изотермическое сжатие при температуре T_2; *4−1* − адиабатическое сжатие ($Q_{41} = 0$).

Рассчитаем работу A, совершаемую идеальным газом в прямом равновесном цикле Карно. При изотермическом расширении на участке *1−2* внутренняя энергия $U(T)$ = const, поэтому количество теплоты Q_1 полученное газом от нагревателя, равно работе расширения, совершаемой газом при переходе из состояния *1* в состояние *2*:

$$Q_1 = Q_{12} = A_{12} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

При адиабатическом расширении *2−3* теплообмен с окружающей средой отсутствует, и работа расширения A_{23} совершается за счет изменения внутренней энергии газа:

$$A_{23} = -\Delta U_{23}\ \nu = \Delta\, C_V^M\ (T_1 - T_2).$$

При изотермическом сжатии на участке *3−4* теплота, отданная газом холодильнику, отрицательна и равна

$$Q_2 = Q_{34} = A_{34} = \nu R T_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

При адиабатическом сжатии на участке *4−1* работа A_{41} равна

$$A_{41} = -\Delta U_{41}\ \nu = \Delta\, C_V^M\ (T_2 - T_1 \nu) = -\Delta\, C_V^M\ (T_1 - T_2) = -A_{23}\,.$$

Суммарная работа равна

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$$

Термический КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{T_1 \ln(V_2/V_1) - T_2 \ln(V_3/V_4)}{T_1 \ln(V_2/V_1)} \qquad (12.9.6)$$

Применим уравнение адиабаты $TV^{\gamma-1}$ = const на участках *2−3* и *4−1* цикла Карно

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

и

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

Разделим одно выражение на второе и получим

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \qquad (12.9.8)$$

С учетом соотношения (12.9.8) выражение (12.9.6) для КПД цикла можно упростить:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (12.9.9)$$

Таким образом, для цикла Карно КПД определяется только температурами нагревателя и холодильника.

Сравнение КПД различных обратимых и необратимых циклов с КПД обратимого цикла Карно (идеальной тепловой машины) позволило сделать следующий вывод: *КПД любого реального обратимого или необратимого* *прямого кругового процесса* (*тепловой машины*) *не может превышать КПД идеальной тепловой машины с теми же температурами* T_1 *нагревателя и* T_2 *холодильника*.

Принимая во внимание формулы, можно записать:

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Более общий анализ показывает, что формула (12.9.9) справедлива, если цикл Карно совершает любое рабочее тело, а не только идеальный газ. В этом случае формула (12.9.9) выражает *теорему Карно*: КПД цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и от технических способов осуществления цикла. Единственные параметры, определяющие КПД этого цикла, − это температуры нагревателя и холодильника. Другая формулировка *теоремы Карно:* коэффициент полезного действия всех обратимых машин, работающих в идентичных условиях (т. е. при одной и той же температуре нагревателя и холодильника), одинаков и определяется только температурами нагревателя и холодильника.

Обратный цикл Карно служит основой работы идеальной холодильной установки. Для холодильного коэффициента k выполняется выражение

$$k = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Из этого выражения видно, что чем меньше разность между температурами окружающей среды T_1 и холодильной камеры T_2, тем больше холодильный коэффициент k и тем эффективнее работа холодильной установки. Заметим также, что $k = T_2/(T_1 - T_2)$ может быть больше единицы и это не противоречит тому, что КПД теплового двигателя всегда меньше 1.