

5 Лекция №5 "Циклические процессы"

Цикл Карно. Анализ работы двигателя внутреннего сгорания.

1. Факты — это отвердевшее мнение.
2. Под воздействием высоких температур и давления факты размягчаются.
3. Правда — эластична.

Законы физики Данлэпа

Первое начало термодинамики не указывает на возможное различие между двумя формами передачи энергии — теплотой и работой. Внутренняя энергия тела изменяется либо при передаче теплоты, либо путем совершения работы. Однако, между теплотой и работой наблюдается существенное различие: невозможно целиком превратить энергию, переданную системе в форме теплоты, в механическую работу без изменения состояния окружающей среды. Анализ процесса взаимного превращения теплоты и работы привел к выводам относительно направления тепловых процессов, которые легли в основу фундаментального принципа, именуемого *вторым началом термодинамики*.

Цель лекции — исследовать процесс производства механической работы из теплоты. Выяснить, то такое коэффициент полезного действия тепловой машины? Может ли он быть равен 100 %?

5.1 Цикл Карно

Для работы любой тепловой машины необходимы по крайней мере два тепловых резервуара с разными температурами. Получая теплоту от более горячего резервуара (нагревателя), рабочее тело (газ или какое-либо другое вещество в цилиндре) машины совершает полезную механическую работу, но при этом часть тепла возвращается более холодному резервуару (холодильнику).

Первым человеком, который успешно решил вопрос о максимальном количестве работы, которое можно получить, израсходовав 1 калорию теплоты, был офицер французской армии в отставке, который серьезно занимался изучением физики и техники, САДИ КАРНО (1796–1832).

Карно показал, что существенным свойством процесса, при помощи которого тепловая (паровая) машина производит работу, получая от нагревателя (топки) и возвращая его холодильнику, является его *циклический характер*. Карно ввел понятие циклического термодинамического процесса и провел его анализ.

Циклический процесс (цикл) — такое изменение параметров состояния термодинамической системы, в результате которого она возвращается в исходное состояние, т. е. к первоначальным значениям своих параметров.

Обратимый цикл — это циклический процесс, в котором отсутствуют механическое трение, противоположно направленные механические силы отличаются на бесконечно малую величину и все тепловые взаимодействия

происходят при бесконечно малой разности температур между системой и окружающей средой.

Цикл Карно представляет собой последовательность изотермического расширения, адиабатического расширения, изотермического сжатия и адиабатического сжатия. Пусть рабочее вещество — это идеальный газ с уравнением состояния $PV = RT$. Рассмотрим цикл Карно в свете первого начала термодинамики, см. Рис. 5. Цикл состоит из следующей последовательности

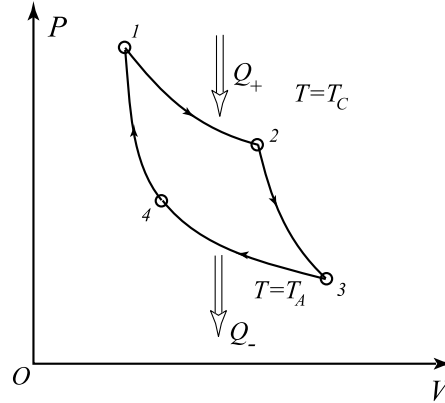


Рис. 5: Цикл Карно на диаграмме VP -диаграмме.

процессов:

1. Изотермического расширения при высокой температуре T_C . В процессе расширения газ находится в контакте с нагревателем, который поддерживает его температуру постоянной и равной T_C . Рабочее вещество поглощает теплоту Q_+ .
2. Адиабатического расширения, при котором температура понижается от T_C до T_A . Газ не испытывает теплового взаимодействия с окружающей средой.
3. Изотермического сжатия при низкой температуре T_A . В процесс сжатия газ находится в тепловом контакте с холодильником, который поддерживает его температуру постоянной и равной T_A . В результате теплообмена газ отдает теплоту Q_- .
4. Адиабатического сжатия, при котором температура газа повышается от T_A до T_C . Теплообмена не происходит.

Анализ цикла Карно в свете первого начала термодинамики.

1. Изотермическое расширение при высокой температуре T_C . Уравнение процесса $P_1V_1 = P_2V_2 = RT_C = \text{const}$.

$$(62) \quad Q_+ = C_V(T_C - T_C) + RT_C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V},$$

$$A_{12} = RT_C \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

2. Адиабатическое расширение. Уравнение процесса $P_2V_2^\gamma = P_3V_3^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = C_P/C_V$.

$$(63) \quad \begin{aligned} 0 &= C_V(T_A - T_C) + A_{23}, \\ A_{23} &= C_V(T_C - T_A). \end{aligned}$$

3. Изотермического сжатия при низкой температуре T_A . Уравнение процесса $P_3V_3 = P_4V_4 = RT_A = \text{const}$.

$$(64) \quad \begin{aligned} Q_- &= C_V(T_A - T_A) + RT_A \int_{V_3}^{V_4} \frac{dV}{V}, \\ A_{34} &= RT_A \ln \frac{V_4}{V_3}. \end{aligned}$$

4. Адиабатического сжатия. Уравнение процесса $P_4V_4^\gamma = P_1V_1^\gamma = \text{const}$.

$$(65) \quad \begin{aligned} 0 &= C_V(T_C - T_A) + A_{41}, \\ A_{41} &= C_V(T_A - T_C). \end{aligned}$$

Работа, совершенная рабочим веществом (один моль идеальном газа) за цикл, равна

$$(66) \quad A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = RT_C \ln \frac{V_2}{V_1} + RT_A \ln \frac{V_4}{V_3} = Q_+ - Q_-.$$

Из этой формулы видно, что результирующая адиабатическая работа равна нулю.

Докажем, что для адиабатического процесса в идеальном газе отношение конечного и начального объемов целиком определяется отношением конечной и начальной температур и не зависит от давления. Используя уравнение Менделеева–Клапейрона, запишем уравнения адиабатического расширения и сжатия в виде

$$(67) \quad \begin{aligned} T_C V_2^{\gamma-1} &= T_A V_3^{\gamma-1}, \\ T_C V_1^{\gamma-1} &= T_A V_4^{\gamma-1}, \end{aligned}$$

где $\gamma - 1 = C_P/C_V - 1 = R/C_V$. Отсюда получаем, что

$$(68) \quad \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{R/C_V} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{R/C_V}.$$

Если обозначить отношение объемов как

$$(69) \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} = n,$$

то формула (66) преобразуется к виду

$$(70) \quad A = R(T_C - T_A) \ln n = Q_+ - Q_-.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) η тепловой машины равен отношению суммарной (полезной работе), совершенной машиной, к количеству теплоты Q_+ , полученной ей от нагревателя

$$(71) \quad \eta = \frac{A}{Q_+} = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+}.$$

Отсюда

$$(72) \quad \eta_K = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+} = \frac{T_C - T_A}{T_A} < 1.$$

Эта знаменитая формула утверждает, что отношение работы A , полученной от тепловой идеальной машины Карно, действующей между высокотемпературным и низкотемпературным тепловыми резервуарами, к количеству теплоты Q_+ , поглощенному от высокотемпературного резервуара, равно отношению разности температур резервуаров к температуре высокотемпературного резервуара.

5.2 Анализ работы двигателя внутреннего сгорания

Рассмотрим цикл работы четырехтактного идеализированного двигателя внутреннего сгорания, см. Рис. 6.

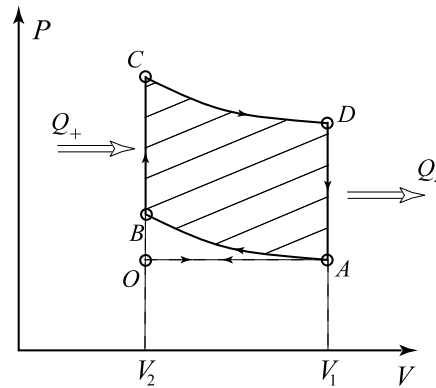


Рис. 6: Цикл Отто на диаграмме VP -диаграмме. Площадь, заключенная между кривыми, соответствует суммарной работе A , выполненной при обходе цикла по часовой стрелке.

1. Такт *впуска* горючей смеси через открытый впускной клапан, прямая OA , в цилиндр при атмосферном давлении. Поршень в цилиндре опускается, увеличивая объем цилиндра от V_2 до V_1 (прямой холостой ход).
2. Такт *сжатия*, кривая AB , горючей смеси в цилиндре от V_1 до V_2 . Так как сжатие очень быстрое, его можно считать адиабатическим. Температура горючей смеси увеличивается от значения T_A до T_B . Совершается отрицательная работа сжатия газа A_- .

3. В изохорном процессе BC происходит возгорание разогретой горючей смеси от искры свечи зажигания. В результате горения в цилиндр поступает теплота Q_+ .
4. *Рабочий такт*, кривая CD , во время которого горячий газ, возникший в результате горения. Объем цилиндра уменьшается от V_2 до V_1 . Поршень проворачивает коленчатый вал. Температура газа уменьшается от значения T_C до T_D . Совершается положительная работа A_+ .
5. *Такт выхлопа*, в ходе которого поршень выталкивает наружу продукты сгорания через открытый выпускной клапан. После этого вводится свежая порция смеси, так что цикл замыкается. Эта сложная последовательность процессов аппроксимируется изохорой DA , когда в окружающую среду передается теплота Q_- , и заменой отработанной горючей смеси, участок AO (обратный холостой ход).

Упрощенно цикл Отто выглядит следующим образом. Рабочее вещество получает от нагревателя теплоту Q_+ (на изохоре BC) и совершает положительную работу A_+ (на участке CD адиабатического расширения). Согласно первому началу

$$(73) \quad Q_+ = U_D - U_B + A_+.$$

Теперь надо вернуть поршень в исходное положение, т. е. сжать газ. Это делается так, что работа A_- (на участке AB адиабатического сжатия), затраченная на сжатие, меньше работы A_+ . С этой целью теплота Q_- отводится (передается холодильнику на изохоре DA). По первому началу

$$(74) \quad -Q_- = U_B - U_D - A_-.$$

Отсюда с учетом (73)

$$(75) \quad Q_+ - Q_- = A_+ - A_- = A.$$

КПД η тепловой машины равен отношению суммарной (полезной работе), совершенной машиной, к количеству теплоты Q_+ , полученной ей от нагревателя

$$(76) \quad \eta = \frac{A}{Q_+} = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+}.$$

Считая рабочее вещество идеальным газом, для цикла Отто получим, что

$$(77) \quad Q_+ = \nu_V(T_C - T_D), \quad Q_- = \nu_V(T_D - T_A),$$

где ν — количество газа, C_V — его молярная теплоемкость при постоянном объеме. Таким образом,

$$(78) \quad \eta_O = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}.$$

Это выражение можно упростить с учетом того, что процессы CD и AB адиабатические

$$(79) \quad \frac{T_A}{T_B} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_D}{T_C},$$

где $\gamma = C_P/C_V$ — показатель адиабаты (с учетом уравнения Р. Майера $\gamma - 1 = R/C_V$). Отсюда

$$(80) \quad \frac{T_B}{T_C} = \frac{T_A}{T_D}.$$

Вычтем единицу из обеих частей уравнения (80)

$$(81) \quad \frac{T_B}{T_C} - 1 = \frac{T_A}{T_D} - 1,$$

или

$$(82) \quad \frac{T_B - T_C}{T_C} = \frac{T_A - T_D}{T_D},$$

что дает

$$(83) \quad \frac{T_A - T_D}{T_B - T_C} = \frac{T_D}{T_C}.$$

Объединив этот результат с уравнением (78), получим

$$(84) \quad \eta_O = 1 - \frac{T_D}{T_C} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{R/C_V}.$$

Отношение объема V_2 цилиндра в тот момент, когда поршень находится в низшей мертвой точке, объему V_1 при верхнем положении поршня называется **степенью сжатия**, $\alpha = V_2/V_1$. Таким образом,

$$(85) \quad \eta_O = 1 - \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{R/C_V}.$$

Видно, что КПД двигателя, работающего на основе цикла Отто, с ростом степени сжатия увеличивается. В пределе, $\alpha \rightarrow \infty$, КПД двигателя мог бы достигнуть 100 %! Но этого невозможно, так как для этого был бы необходим цилиндр бесконечно большой длины.

В цикле Отто наименьшее значение температуры равно T_A , а максимальное — T_C . Теплота при этом поглощается в температурном интервале от T_B до T_C , а отдается от T_D до T_A . КПД двигателя можно увеличить, если бы поглощение тепла происходило бы полностью при наивысшей температуре, а отдача теплоты соответственно при минимальной температуре. Оказывается, что полученный таким образом циклический процесс имеет бы максимальный КПД из всех тепловых машин работающий с данными температурами тепловых резервуаров.

5.3 Вопросы для самостоятельной работы и задачи

1. Идеальный газ совершает цикл Карно, в котором изотермическое расширение происходит при 600 К, а изотермическое сжатие — при 300 К. При какой температуре должно происходить расширение, чтобы совершаемая за цикл работа удвоилась? Считайте, что изменения объема и температура сжатия (равная температуре холодильника) остаются прежними, а результирующая адиабатическая работа в обоих случаях равна нулю.

2. Холодильная машина работает по следующему принципу: за счет внешней механической работы тепло отнимается от более холодного теплового резервуара и передается более горячему резервуару. Полезный эффект холодильной машины определяется *холодильным коэффициентом*. Чему равен холодильный коэффициент машины, которая работает по обратимому циклу Карно? Может ли быть холодильный коэффициент больше 100 %? Если да, то не нарушается ли при этом закон сохранения энергии? Ответ поясните.
3. Сколько стоит приготовление 1 кг льда в домашнем холодильнике, если считать, что он работает по идеальному циклу? Для вывода численного ответа, самостоятельно оцените комнатную температуру, температуру фреона и стоимость 1 кВт·ч электроэнергии?
4. В двигателе, работающем по циклу Отто, степень сжатия равна 6, пробег автомобиля, в котором он установлен, равен 5,7 км на 1 л топлива при скорости 64 км/ч. Предположив, что отношение КПД цикла к величине пробега на единицу объема затраченного топлива постоянно, а эффективная величина C_V газа в двигателе равна $2R$, найдите пробег на 1 л топлива, если степень сжатия увеличится до 9.
5. Изобразите на диаграмме VP идеального двигателя, работающего циклу Дизеля. Последовательность термодинамических процессов цикл Дизеля следующая: адиабатическое сжатие AB , изобарическое расширение BC , адиабатическое расширение CD и изохорическое сжатие CA . Покажите, что при равных пиковых давлениях и одинаковой степени сжатия, КПД цикла Дизеля больше, чем цикл Отто.
6. Предположите, что 1 моль идеального газа проходит идеальный цикл Дизеля, в котором степень сжатия равна 16, а повышение температуры за время поступления теплоты при постоянном давлении равно 1500 К. Кроме того, предположите, что газ обладает теплоемкостью $C_V = 2R$, а начальные температура и давление равны соответственно 300 К и 1 атм. Нарисуйте цикл на диаграмме VP . Чему равна результирующая работа? Чему равен КПД?