

Вопрос 12

Необратимость процессов в природе. Тепловые машины, принцип их действия. Цикл Карно. КПД тепловой машины. КПД идеальной машины. Второе начало термодинамики.

Необратимость процессов в природе

Согласно первому закону термодинамики энергия ($Q = \Delta U + A$) не может быть создана или уничтожена, она может только передаваться от одной системы к другой. Но этот закон не устанавливает направления происходящих процессов.

Необратимые процесс — процесс, который может протекать только в одном направлении. То есть обратный процесс не может *самопроизвольно* протекать (без внешнего воздействия). Например, передача теплоты от горячего тела к холодному происходит, а самопроизвольное нагревание горячего тела и охлаждение холодного не происходит; падение стекла и разбиение — тоже необратимый процесс.

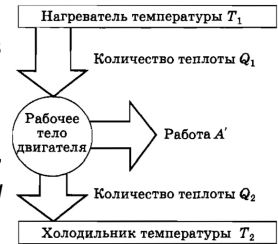
Обратимый процесс — процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое, который можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний. Например, механическое движение без трения, изотермические сжатие\расширение.

Тепловые машины

Тепловой двигатель — устройство, в котором происходит преобразование внутренней энергии в механическую.

Принцип действия тепловой машины

Тепловой двигатель состоит из *нагревателя* (устройство, передающее теплоту рабочему телу, т. е. газу), *рабочего тела* (газ, расширение которого влечет совершение работы) и *холодильника* (тело, поглощающее неиспользованную рабочим телом теплоту, обычно — внешняя среда, атмосфера). Температура холодильника должна быть меньше температуры рабочего тела, так как иначе он не будет поглощать теплоту.



Первые действующие паровые машины были созданы И. И. Ползуновым (1763) и Д. Уаттом (1764). В конструкции этих машин присутствовали основные части тепловых машин: нагреватель, где освобождалась энергия топлива; водяной пар как рабочее тело; поршень с цилиндром, преобразующий внутреннюю энергию пара в механическую; холодильник для снижения температуры и давления пара. Недостатком первых паровых машин был низкий КПД (не более 9%).

Двигатели	
Поршневой внутреннего сгорания	<div><p>Главная особенность: место сжигания топлива и нагревания рабочего тела перенесено внутрь цилиндра. Оптимальное топливо: газообразное или жидкое.</p><p>Первый такой двигатель был создан Э. Ленуаром в 1860 году.</p><p>В 1862 году Б. Роша предложил использовать четырехтактный цикл: всасывание, сжатие, горение и расширение, выхлоп.</p><p>В 1878 году Н. Отто построил первый четырехтактный двигатель, КПД которого достигал 22%.</p><p>График работы двигателя внутреннего сгорания будет состоять из процессов расширения (AB) и сжатия (CD) до изначального объема.</p></div> <div></div>
Карбюраторный	<div><p>В карбюраторном двигателе для более полного сгорания топливо смешивают с воздухом в карбюраторах перед впуском в цилиндр. Таким образом, рабочим телом является воздух, а не пары бензина. Топливо используется для нагревания воздуха. Оптимальное топливо: бензин, керосин.</p><p>Всасывание горючей смеси (т.е. движение поршня от верхнего до нижнего положения) проходит при <i>постоянном давлении</i>.</p><p>При обратном ходе поршня происходит быстрое сжатие горючей смеси, за счет чего процесс близок к <i>адиабатному</i>.</p><p>В конце такта смесь воспламеняется электрической искрой, после этого пары бензина очень быстро сгорают, увеличивая температуру. Этот процесс происходит очень быстро, поэтому его можно считать практически <i>изохорным</i>.</p><p>Далее под действием высокого давления поршень совершает рабочий ход до нижнего положения. Этот процесс можно считать почти <i>адиабатным</i>.</p><p>В конце такта открывается клапан, воздух выходит в атмосферу, то есть холодильнику отдается некоторое количество теплоты.</p><p>КПД современных карбюраторных двигателей 20-25%</p></div> <div></div>
<p>Для поршневых двигателей внутреннего сгорания существует важная характеристика — степень сжатия горючей смеси (определяет полноту сгорания топлива). $\epsilon = \frac{V_{нач.}}{V_{кон.}}$ Обычно степень сжатия равна 8-9, так как при увеличении горючая смесь будет самовоспламенятся до верхней точки, что понижает мощность и КПД, а также разрушает двигатель.</p>	

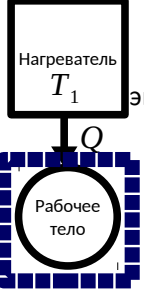
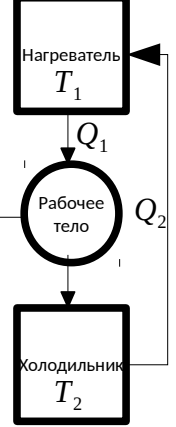
Дизельный	<p>В 1892 году Р. Дизель предложил использовать большие степени сжатия и расширение при постоянном давлении. В дизельных двигателях сначала сжимается воздух, а по окончании этого процесса впрыскивается горючее. Горючее воспламеняется само из-за высокой температуры (600-700°C) воздуха, а тогда не требуется никакое специальное устройство.</p> <p>КПД современных дизельных двигателей 40-45%, степень сжатия 16-21.</p>
Паровая турбина	<p>В 1889 году Г. Лаваль применил первую паровую турбину. Ее мощность была 4 кВт, частота вращения ротора 500 оборотов в секунду. Чтобы полнее использовать кинетическую энергию струи пара, турбины делают многоступенчатыми, т. е. Насаживают на один вал роторы с возрастающим радиусом.</p> <p>КПД современных паровых двигателей 40%.</p>
Газовая турбина	<p>Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора (1), камер сгорания (2), газовой турбины (3), выпускного сопла (4). Во время работы ротор компрессора засасывает воздух и повышает давление в 5-7 раз. Сжатие происходит практически адиабатно, поэтому температура повышается до 200°C.</p> <p>Далее сжатый воздух поступает в камеру сгорания, к нему впрыскивается топливо (керосин, мазут). Воздух в время горения нагревается до 1500-2200°C. Нагревание происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и увеличивает скорость движения.</p> <p>Воздух и продукты горения передают свою кинетическую энергию лопаткам ротора турбины. Часть используется на вращение компрессора, а остальная часть может быть использована в качестве совершения работы.</p> <p>КПД современных газовых турбин 40%</p> 
Турбореактивный	<p>Реактивная сила тяги, возникающая при выбрасывании воздуха и продуктов горения, может быть использована для движения самолета или другого вида транспорта.</p> <p>Основное отличие от турбовинтового — газовая турбина используется дополнительно только для компрессора.</p> <p>КПД современных турбореактивных двигателей 55-65%</p>
Реактивный двигатель	<p>При сжигании топлива (часто химического) в камере сгорания образуются продукты горения в газообразном состоянии, а выходя через сопло струи газа приводят к возникновению реактивной силы.</p> <p>В 1903 году К. Э. Циолковский предложил конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем.</p> <p>Первая жидкостная ракета в СССР была создана в 1933 году по проекту М. К. Тихонравова, работавшая на жидком кислороде и бензине.</p> <p>КПД современных реактивных двигателей 75%</p>

Тепловые машины	
Прямого цикла	Обратного цикла
Действующие с совершением работы	Действующие в обратном направлении, то есть потребляющие

Коэффициент полезного действия (КПД, η) — скалярная физическая величина, численно равная отношению работы, совершенной рабочим телом, к количеству теплоты полученному от нагревателя. КПД часто выражается в процентах.

$$\eta = \frac{A_{\text{газа}}}{Q_{\text{нагр}}} = \frac{Q_{\text{нагр}} - |Q_{\text{хол}}|}{Q_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{хол}}|}{Q_{\text{нагр}}}$$

Второй закон (второе начало) термодинамики

	Р. Клаузиус	У. Кельвин
Формулировка	Невозможно такое устройство, единственным конечным результатом которого была бы передача тепла от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой. $T_1 > T_2$	Невозможно такое устройство, работающее циклами, единственным результатом которого было бы полное превращение энергии от источника в механическую работу.
Равносильность	 <p>Пусть утверждение Клаузиуса верно, а утверждение Кельвина — нет. Поместим рабочее тело в адиабатическую рубашку, чтобы энергия от нагревателя шла лишь на совершение работы и не отдавалась холодильнику. Тогда температура внутри рубашки увеличивается, и, когда она станет больше T_1, более холодное тело будет нагревать более горячее.</p>	 <p>Пусть утверждение Клаузиуса неверно, а утверждение Кельвина — верно. Рассмотрим устройство, передающее теплоту от холодильника к нагревателю, рабочее тело получает теплоту от нагревателя и совершает работу, неиспользованная теплота идет в холодильник. Работает циклами. $A = Q_1 - Q_2$ — единственный результат, противоречащий утверждению Кельвина.</p>

Цикл Карно

Рассмотрим цикл из обратимых процессов: двух изотерм и двух адиабат. (12, 34 — изотермы, 23, 41 — адиабаты)

Для изотерм первый закон термодинамики

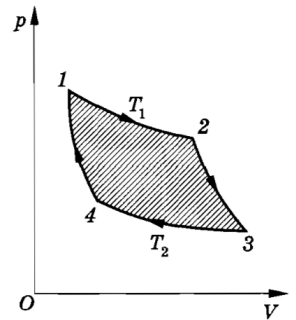
$$Q_{12} = A_{12} + \Delta U = A_{12} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \eta = 1 - \frac{|Q_{34}|}{Q_{12}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\ln \frac{V_4}{V_3}}{\ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\ln \frac{V_3}{V_4}}{\ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$Q_{34} = A_{34} + \Delta U = A_{34} = \nu R T_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

Для адиабат уравнение Пуассона

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \Rightarrow \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{V_3}{V_4}$$

Подставляем в формулу КПД: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}}$



Теорема Карно — любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2 не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной машины.

Доказательство:

Пусть $\eta' > \eta$ — КПД другой тепловой машины. Рассмотрим устройство, в котором работают эта машина и машина Карно (по обратному циклу в качестве холодильной машины) с общим нагревателем и холодильником.

Тепловая машина совершает работу $A' = \eta' Q_1'$. $A' = Q_1' - |Q_2'| = \eta' Q_1'$

$$Q_1' - \eta' Q_1' = |Q_2'| \Rightarrow Q_1' (1 - \eta') = |Q_2'| \Rightarrow \eta' Q_1' = \frac{|Q_2'|}{1 - \eta'}. \text{ Тогда } A = \frac{\eta}{1 - \eta'} |Q_2'|$$

Пусть холодильная машина забирает $Q_2 = |Q_2'|$. Тогда над ней совершается работа $A = \frac{\eta}{1 - \eta'} |Q_2'|$.

Так как $\eta' > \eta$, $A' > A$. То есть при действии такого циклического устройства остается избыточная работа, что противоречит второму закону ТД.

