

§ 15. Тепловые двигатели. Принцип действия тепловых двигателей и их КПД. Экологические проблемы использования тепловых двигателей

Люди давно заметили, что при совершении механической работы внутренняя энергия тел может изменяться, и научились это использовать. Например, можно согреть руки, потерев ладони друг о друга, или добыть огонь трением одного куска дерева о другой. Гораздо больший промежуток времени понадобился человечеству, чтобы научиться использовать убыль внутренней энергии тел для совершения механической работы. Только во второй половине XVIII в., сравнительно недавно по историческим меркам, появились первые практически полезные универсальные устройства для осуществления этой цели — паровые машины. Изобретение паровой машины, а впоследствии и двигателя внутреннего сгорания имело исключительно важное значение. Сейчас трудно представить нашу жизнь без автомобилей, самолётов, кораблей и других устройств, в которых убыль внутренней энергии сжигаемого топлива и его окислителя частично преобразуется в механическую работу.

Необратимость процессов в природе. Первый закон термодинамики допускает самопроизвольный переход энергии как от более нагретого тела к менее нагретому, так и наоборот. Важно только то, чтобы уменьшение внутренней энергии одного тела было равно увеличению внутренней энергии другого тела. На самом же деле самопроизвольный переход энергии от менее нагретого к более нагретому телу в природе не происходит. Например, невозможно наблюдать, чтобы при опускании холодной ложки в горячий чай ложка охлаждалась ещё больше, передавая некоторое количество теплоты горячему чаю. Как вы не раз убеждались на практике, всегда некоторое количество теплоты самопроизвольно переходит от горячего чая к холодной ложке, пока в системе «чай—ложка» не установится тепловое равновесие с одинаковой температурой во всех частях системы.

Утверждение, высказанное Р. Клаузиусом в 1850 г., о том, что невозможна самопроизвольная передача количества теплоты от менее нагретого тела к более нагретому, получило название *второго закона термодинамики*.

Второй закон термодинамики констатирует тот факт, что *количество теплоты самопроизвольно может переходить только от более нагретых тел к менее нагретым*.

Этот научный факт и определяет единственно возможное направление самопроизвольного протекания тепловых процессов — они идут в направлении к состоянию теплового равновесия.

Тепловые двигатели.

Тепловые двигатели — двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива в механическую работу.

В качестве упрощённой модели теплового двигателя рассмотрим цилиндр, в котором находится газ (воздух) под поршнем. Поместим на поршень тело массой m и будем нагревать газ в цилиндре (рис. 84, а). Давление газа увеличивается, поршень приходит в движение и поднимает тело на некоторую высоту Δh (рис. 84, б). При этом объём газа увеличивается, т. е. сила давления газа совершает работу ($A > 0$). Однако в данном случае устройству свойственно одноразовое выполнение работы, поэтому такие устройства малоприменимы.

Рабочее тело — тело, совершающее работу после получения количества теплоты Q_1 от *нагревателя*, находящегося при температуре T_1 , должно в конечном счёте вернуться в исходное состояние, чтобы снова начать такой же процесс. Таким образом, **первый принцип действия тепловых двигателей** — цикличность (непрерывность) их работы.

Для возвращения поршня в исходное положение газ необходимо сжать до первоначального объёма. При этом внешняя сила совершает работу сжатия. Но если сжатие будет происходить при такой же температуре, что и расширение газа, то работа внешних сил будет равна работе силы давления газа при его расширении. В результате полная работа газа за один цикл (расширение—сжатие) окажется равной нулю. Поэтому **второй принцип действия тепловых двигателей** — сжатие газа должно происходить при более низкой температуре T_2 , чем его расширение (рис. 85). В этом случае полная работа газа за цикл положительная ($A > 0$) и численно равна площади фигуры $S_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}$.

Таким образом, перед сжатием рабочее тело необходимо охладить. Это осуществляется путём передачи количества теплоты Q_2 третьему телу — *холодильнику*. Из сказанного следует, что для работы циклического теплового двигателя кроме

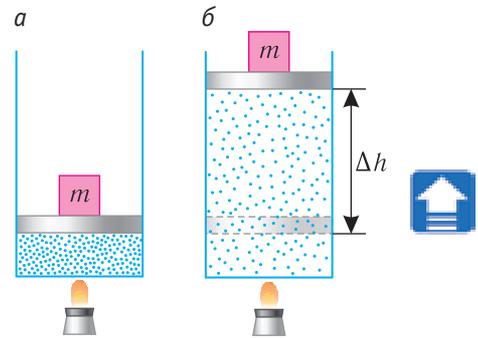


Рис. 84

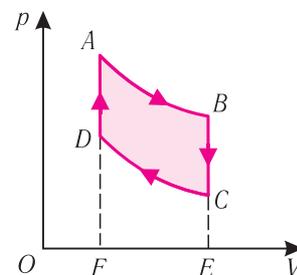


Рис. 85

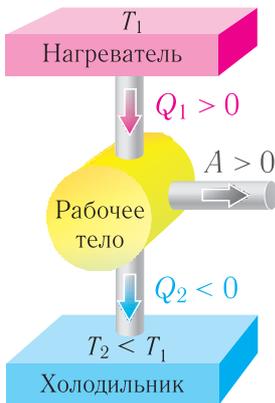


Рис. 86



нагревателя и рабочего тела необходимо наличие холодильника.

Схема теплового двигателя представлена на рисунке 86. Тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела (как правило, газ) и холодильника (атмосфера или вода при температуре окружающей среды около 300 К). Энергия, выделяемая при сгорании топлива в нагревателе, передаётся рабочему телу (газу) путём теплопередачи. При расширении газа часть его внутренней энергии идёт на совершение работы. Некоторое количество теплоты неизбежно передаётся холодильнику.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя — отношение полезно используемой энергии $E_{\text{полезн}}$ к общему количеству энергии E , получаемому системой:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{E_{\text{полезн}}}{E}.$$

Определяемый таким образом КПД тепловых двигателей называют *эффективным КПД*. При этом $E = Q_{\text{полн}}$, где $Q_{\text{полн}}$ — количество теплоты, выделяемое при полном сгорании топлива.

Степень совершенства преобразования определённой части внутренней энергии нагревателей в механическую работу, происходящего в цилиндрах теплового двигателя, характеризуют *термическим (термодинамическим) коэффициентом полезного действия*.

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение работы $A_{\text{ц}}$, совершаемой рабочим телом за цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученному им от нагревателя:

$$\eta_t = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}.$$

Если Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику ($Q_2 < 0$), то $A_{\text{ц}} = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$ и

$$\eta_t = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad (15.1)$$

Из формулы (15.1) следует, что термический КПД теплового двигателя зависит от процессов, в которых участвует рабочее тело, и всегда меньше единицы.

Реальные тепловые двигатели имеют следующие средние значения термического КПД: дизельный двигатель — 40 %; газотурбинные установки — 25–30 %; паровая турбина — 40 %.

В автомобильных двигателях внутреннего сгорания эффективный коэффициент полезного действия определяют по экспериментальной механической мощности P двигателя и сжигаемому за единицу времени количеству топлива. Так, если за промежуток времени Δt сожжено топливо массой m , имеющее удельную теплоту сгорания q , то

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P\Delta t}{qm}.$$

Значение тепловых двигателей и экологические проблемы их использования.

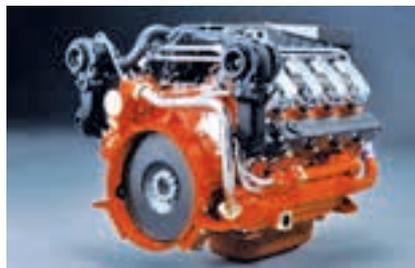
Наибольшее значение имеет использование тепловых двигателей в энергетике и на транспорте. Тепловые двигатели — паровые турбины (рис. 87) — устанавливают на тепловых и атомных электростанциях, где энергия пара превращается в механическую энергию роторов генераторов электрического тока. В первом случае пар высокой температуры получают за счёт сгорания топлива, а во втором — за счёт энергии, выделяющейся в ходе ядерных реакций.

Изобретение двигателя внутреннего сгорания сыграло огромную роль в автомобилестроении, в усовершенствовании сельскохозяйственной и строительной техники. Карбюраторные двигатели внутреннего сгорания устанавливают на автомобилях, мотоциклах, вертолётах и самолётах, дизельные (рис. 88, а) — на теплоходах, тепловозах, тракторах, тяжёлых автомобилях. Создание реактивного двигателя (рис. 88, б) позволило поднять самолёты на большую высоту, увеличить скорость и дальность их полётов.



Рис. 87

а



б



Рис. 88



Однако интенсивное использование тепловых двигателей в энергетике и на транспорте отрицательно влияет на окружающую среду.

В процессе работы тепловые двигатели выбрасывают в атмосферу огромное количество горячего пара или газа, что приводит к тепловому загрязнению атмосферы. Широкое использование различных видов топлива влечёт за собой увеличение в атмосфере углекислого газа (диоксид углерода CO_2). Соединяясь с водяными парами в атмосфере, углекислый газ образует угольную кислоту, которая даже при малых концентрациях, выпадая в виде кислотного дождя, за столетия разъедает кирпич, металл, мрамор.

Сжигание топлива на тепловых электростанциях ведёт к накоплению в атмосфере угарного газа (оксид углерода CO), являющегося ядом для живых организмов. Например, при сгорании 1 т бензина образуется 60 кг оксида углерода. При работе автотранспорта наряду с оксидом углерода в атмосферу попадают соединения свинца. При горении топливо использует кислород из атмосферы, что приводит к постепенному уменьшению его концентрации в воздухе и, кроме того, образованию оксидов азота (NO_x). Растворяясь в дождевой воде, они становятся азотной кислотой, а реагируя с содержащимися в воздухе разнообразными примесями, образуют токсичные соединения, которые выпадают на поверхность воды и суши с кислотными дождями. Это приводит к засолению почв, открытых и подземных водоёмов, гибели лесов, нарушению химического состава в экосистемах. Кроме того, в «кислой» воде лучше растворяются такие ядовитые вещества, как кадмий, ртуть, свинец, содержащиеся в почве и донных отложениях, что влияет на чистоту воды, потребляемой людьми и животными.

При полётах самолётов и запусках ракет происходит разрушение озонового слоя атмосферы, который защищает всё живое на Земле от избыточности ультрафиолетового излучения Солнца.

Решение проблем, возникающих при сжигании топлива работающими тепловыми двигателями, учёные и конструкторы видят:

а) в экологизации технологических процессов (создании безотходных и малоотходных технологий, исключающих попадание в атмосферу вредных веществ); очистке газовых выбросов в атмосферу (улавливании и переработке углекислого газа, оксидов азота и других токсичных веществ);

б) увеличении коэффициента полезного действия тепловых двигателей, в частности, путём создания условий для наиболее полного сгорания топлива;

в) замене тепловых двигателей на более экологически чистые двигатели, например, электрические.

В дополнение к перечисленному во многих странах мира в законодательном порядке приняты предельно допустимые нормы содержания токсичных

компонентов в выхлопных газах. В Республике Беларусь правилами дорожного движения запрещена эксплуатация автомобилей, содержание оксида углерода в отработанных газах которых превышает 1,5 %. Для выявления таких транспортных средств введена система инструментального контроля при прохождении государственного технического осмотра.

Рациональная организация автомобильного движения в городах (строительство скоростных магистралей, дополнительных развязок и эстакад, способствующее уменьшению числа светофоров и «пробок») также позволит уменьшить вредные выбросы в атмосферу при эксплуатации транспортных средств.



Количество теплоты самопроизвольно может переходить только от более нагретых тел к менее нагретым

Двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива в механическую работу, называют тепловыми двигателями

Первый принцип действия тепловых двигателей — цикличность (непрерывность) их работы

Второй принцип действия тепловых двигателей — сжатие газа должно происходить при более низкой температуре, чем его расширение

Тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение работы, совершаемой рабочим телом за цикл, к количеству теплоты, полученному им от нагревателя:

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$





1. Приведите примеры наиболее типичных необратимых процессов.
2. Что называют тепловым двигателем? Какие принципы положены в основу создания тепловых двигателей?
3. В чём состоит роль нагревателя, холодильника и рабочего тела теплового двигателя?
4. Может ли эффективный КПД теплового двигателя стать равным единице, если трение в частях двигателя свести к нулю?
5. Можно ли охладить воздух в комнате, если открыть дверцу работающего холодильника?



Примеры решения задач

Пример 1. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя $\eta_t = 20\%$. Определите работу, совершённую им за цикл, если количество теплоты, переданное холодильнику, $Q_2 = -1,2$ кДж.

Дано:
 $\eta_t = 20\%$
 $|Q_2| = 1,2$ кДж =
 $= 1,2 \cdot 10^3$ Дж

$A_{ц}$ — ?

Решение. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя. Следовательно,

$$Q_1 = \frac{|Q_2|}{1 - \eta_t}.$$

Таким образом, $A_{ц} = \eta_t Q_1 = \frac{\eta_t |Q_2|}{1 - \eta_t}$.

$$A_{ц} = \frac{0,20 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}}{0,80} = 0,30 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A_{ц} = 0,30$ кДж.

Пример 2. Каждый из четырёх двигателей реактивного самолёта на пути $s = 5,0 \cdot 10^3$ км развивает среднюю силу тяги $\langle F \rangle = 0,11$ МН. Определите объём керосина, израсходованного на этом пути, если эффективный коэффициент полезного действия двигателя $\eta_s = 24\%$. Плотность и удельная теплота сгорания керосина $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ соответственно.

<p>Дано:</p> $s = 5,0 \cdot 10^3 \text{ км} =$ $= 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}$ $\langle F \rangle = 0,11 \text{ МН} =$ $= 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н}$ $\eta_э = 24\%$ $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	<p>Решение. По определению, эффективный коэффициент полезного действия $\eta_э = \frac{A_{\text{полезн}}}{Q_{\text{полн}}}$, где $A_{\text{полезн}} = 4 \langle F \rangle s$ — полезная работа, совершённая всеми четырьмя двигателями самолёта; $Q_{\text{полн}} = q\rho V$ — количество теплоты, выделяемое при полном сгорании керосина на пути s.</p> <p>Тогда $\eta_э = \frac{4 \langle F \rangle s}{q\rho V}$, откуда $V = \frac{4 \langle F \rangle s}{\eta_э q\rho}$.</p> $V = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}}{0,24 \cdot 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3.$
$V = ?$	
<i>Ответ:</i> $V = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3$.	

Упражнение 11

1. За цикл рабочее тело теплового двигателя получает от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 800 \text{ Дж}$ и передаёт холодильнику количество теплоты $Q_2 = -600 \text{ Дж}$. Определите термический коэффициент полезного действия теплового двигателя.

2. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя $\eta_t = 20\%$. Определите количество теплоты, переданное рабочему телу от нагревателя, если за цикл рабочим телом совершена работа $A_{\text{ц}} = 300 \text{ Дж}$.

3. Мотоцикл в течение некоторого промежутка времени движется со скоростью, модуль которой $v = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. При этом расход бензина на пути $s = 100 \text{ км}$ составляет $V_0 = 4,0 \text{ л}$. Определите среднюю мощность двигателя мотоцикла, если эффективный коэффициент полезного действия двигателя $\eta_э = 25\%$. Плотность и удельная теплота сгорания бензина $\rho = 7,1 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ соответственно.

4. Для работы двигателя электрогенератора, эффективный коэффициент полезного действия которого $\eta_э = 20,0\%$, запасена цистерна дизельного топлива объёмом $V = 62,0 \text{ м}^3$. Определите, на сколько рабочих дней хватит запасённого топлива, если средняя мощность двигателя во время работы $\langle P \rangle = 150 \text{ кВт}$ и продолжительность рабочего дня двигателя $t = 7,00 \text{ ч}$. Плотность и удельная теплота сгорания дизельного топлива $\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 42,0 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ соответственно.

