

**ГЛАВА 3. Второе и третье начала термодинамики**

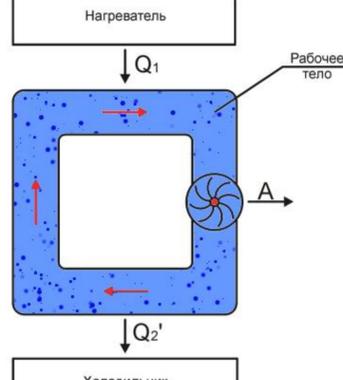
**3.1. Тепловые машины**

Создание и развитие термодинамики было вызвано, прежде всего, необходимостью описания работы и расчета *тепловых машин*. Первыми тепловыми машинами были паровые двигатели, замкнутый термодинамический цикл которых впервые был описан в 1690 году *Дени Папином* (1647-1712). Первые *тепловые двигатели* предназначались для подъема воды из шахт и были изобретены английскими инженерами в 1698 году *Томасом Севери* (1650 - 1715) и в 1712 году *Томасом Ньюкоменом* (1663 - 1715). Если в насосе Севери использовался пар в качестве тела, непосредственно толкающего воду, то машина Ньюкомена была первой поршневой паровой машиной. Отметим, что идея использования поршня принадлежит Папиному.

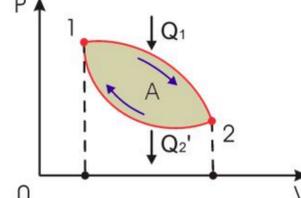
Широкое применение паровых машин в промышленности началось после изобретения в 1774 году *Джеймсом Уаттом* (1736 - 1819) паровой машины, в которой работа совершалась без использования атмосферного давления, что значительно сократило расход топлива. Уатт дополнил свои машины важнейшими механическими изобретениями, такими как преобразователь поступательного движения во вращательное, центробежный регулятор, маховое колесо и т.д. В 1784 году Уатт запатентовал универсальную паровую машину двойного действия, в которой пар совершал работу по обе стороны поршня.

Сейчас разработано большое количество разнообразных тепловых машин, в которых реализованы различные термодинамические циклы. Тепловыми машинами являются двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, различные тепловые турбины и т.д.

Тепловые машины или тепловые двигатели предназначены для получения полезной работы за счет теплоты, выделяемой вследствие химических реакций (сгорание топлива), ядерных превращений или по другим причинам (например, вследствие нагрева солнечными лучами). На рис. 3.1 приведена условная схема тепловой машины, а рис. 3.2 иллюстрирует ее термодинамический цикл. Для функционирования тепловой машины обязательно необходимы следующие составляющие: *нагреватель, холодильник и рабочее тело*. При этом, если необходимость в наличии нагревателя и рабочего тела обычно не вызывает сомнений, то холодильник как составная часть тепловой машины в её конструкции зачастую отсутствует. В качестве холодильника выступает окружающая среда.



**Рис. 3.1.**  
**Схема тепловой машины**



**Рис. 3.2.**  
**Термодинамический цикл тепловой машины**

Принцип действия тепловых машин заключается в следующем. Нагреватель передает рабочему телу теплоту  $Q_1$ , вызывая повышение его температуры. Рабочее тело совершает работу  $A$  над каким-либо механическим устройством, например, приводит во вращение турбину, и далее отдает холодильнику теплоту  $Q_2'$ , возвращаясь в исходное состояние. Величина  $Q_2 = -Q_2'$  представляет собой количество теплоты, передаваемое холодильником рабочему телу, и имеет отрицательное значение.

Отметим, что наличие холодильника и передача ему части полученной от нагревателя теплоты, являются обязательными, так как иначе работа тепловой машины невозможна. Действительно, для получения механической работы необходимо наличие потока, в данном случае потока теплоты. Если же холодильник будет отсутствовать, то рабочее тело неизбежно придет в тепловое равновесие с нагревателем, и поток теплоты прекратится.

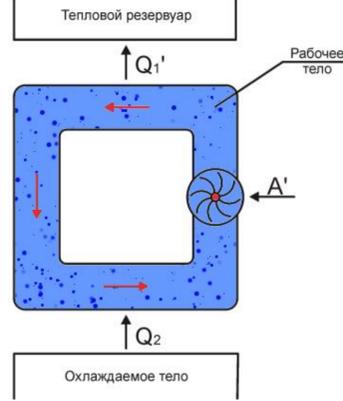
В соответствии с первым началом термодинамики (1.4), при осуществлении кругового процесса, из-за возвращения рабочего тела в исходное состояние, его внутренняя энергия за цикл не изменяется. Поэтому совершенная рабочим телом механическая работа равна разности подведенной и отведенной теплоты:

$$A = Q_1 - Q_2'. \quad (3.1)$$

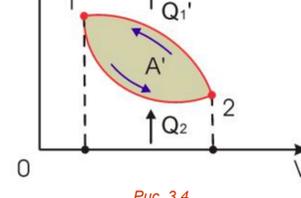
Тепловой коэффициент полезного действия (к.п.д.) цикла любой тепловой машины можно рассчитать как отношение полезной работы  $A$  к количеству теплоты  $Q_1$ , переданной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1}. \quad (3.2)$$

Из выражения (3.2) следует, что к.п.д. любой тепловой машины всегда меньше единицы, так как часть полученной от нагревателя теплоты должна передаваться холодильнику. Термодинамический цикл, осуществляемый в обратном направлении, может быть использован для работы *холодильной машины*, схема и термодинамический цикл которой приведены соответственно на рис. 3.3 и рис. 3.4. Такие машины, в отличие от тепловых двигателей, предназначены не для получения механической работы из теплоты, а позволяют осуществлять охлаждение различных тел за счет совершения работы.



**Рис. 3.3.**  
**Схема холодильной машины**



**Рис. 3.4.**  
**Термодинамический цикл холодильной машины**

В холодильной машине за счет совершения внешними телами работы  $A'$  над рабочим телом происходит отвод теплоты  $Q_2$  от охлаждаемого тела и передача теплоты  $Q_1'$  тепловому резервуару, в качестве которого обычно выступает окружающая среда.

Коэффициент полезного действия или холодильный коэффициент холодильной машины можно определить как отношение отнятой от охлаждаемого тела теплоты  $Q_2$  к затраченной для этого механической работе  $A'$ :

$$\eta_{\text{холод. маш.}} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1' - Q_2}. \quad (3.3)$$

Так как в зависимости от конкретной конструкции холодильной машины количество отводимой от охлаждаемого тела теплоты  $Q_2$  может как превышать затраченную работу  $A'$ , так и быть меньше ее, то к.п.д. холодильной машины, в отличие от к.п.д. тепловой машины, может быть как больше, так и меньше единицы.

Холодильная машина может быть использована не только для охлаждения различных тел, но и для отопления помещения. Действительно, даже обычный бытовой холодильник, охлаждая помещенные в нем продукты, одновременно нагревает воздух в комнате. Принцип динамического отопления был предложен Томсоном (лордом Кельвином) и положен в основу действия современных *тепловых насосов*. Этот принцип заключается в использовании обращенного цикла тепловой машины для перекачки теплоты из окружающей среды в помещение.

Схема теплового насоса совпадает с приведенной на рис. 3.3 схемой холодильной машины. Основное отличие заключается в том, что теплота  $Q_1'$  подводится к нагреваемому телу, например к воздуху в обогреваемом помещении, а теплота  $Q_2$  забирается из менее нагретой окружающей среды. Термодинамические циклы холодильной машины и теплового насоса совпадают (см. рис. 3.4).

К.п.д. теплового насоса определяется как отношение полученной нагреваемым телом теплоты  $Q_1'$  к затраченной для этого механической работе  $A'$ :

$$\eta_{\text{тепл. насоса}} = \frac{Q_1'}{A'} = \frac{Q_1'}{Q_1' - Q_2}. \quad (3.4)$$

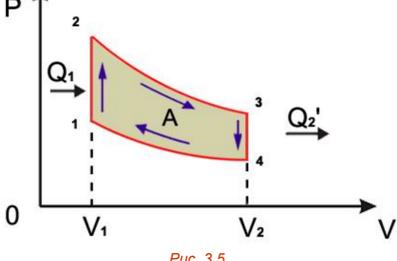
Учитывая то, что отводимая от окружающей среды теплота  $Q_2$  всегда отлична от нуля, к.п.д. теплового насоса, в соответствии с его определением, обязательно должен быть больше единицы. Из сравнения формул (3.2) и (3.4) следует, что к.п.д. теплового насоса является величиной, обратной к.п.д. тепловой машины:

$$\eta_{\text{тепл. насоса}} = \frac{Q_1'}{A'} = \frac{-Q_2}{-A} = \frac{1}{\eta}. \quad (3.5)$$

К.п.д. теплового насоса тем выше, чем больше теплоты  $Q_2$  отводится от окружающей среды. Указанный результат не противоречит законам термодинамики, так как в данном случае для перекачки теплоты от менее нагретой окружающей среды к более нагретому воздуху в помещении используется работа внешних сил. При этом на каких-то участках цикла рабочее тело может совершать положительную работу, так как при тепловом контакте с окружающей средой его температура должна быть ниже температуры среды.

Преимущество теплового насоса по сравнению с электронагревателем заключается в том, что на нагрев помещений используется не только преобразованная в теплоту электроэнергия, но и теплота, отобранная от окружающей среды. По этой причине эффективность тепловых насосов может быть гораздо выше обычных электронагревателей, что определяет их потенциальные возможности для широкого использования.

**Задача 3.1.** Рассчитать к.п.д. двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме, термодинамический цикл которого состоит из следующих процессов (см. рис. 3.5): 1-2 - изохорический подвод теплоты при сгорании топлива в цилиндре двигателя; 2-3 - адиабатическое расширение рабочего тела; 3-4 - изохорический отвод теплоты при выбросе отработавшего газа в атмосферу; 4-1 - адиабатическое сжатие рабочего тела. Подвод теплоты производится при постоянном объеме  $V_1$ , а отвод - при объеме  $V_2 = \epsilon V_1$ . Считать, что рабочее тело можно рассматривать как идеальный газ с показателем адиабаты, равным  $\gamma$ .



**Рис. 3.5.**  
**Термодинамический цикл двигателя внутреннего сгорания**

Решение: В соответствии с выражениями (2.55) и (2.61) подведенная и отведенная в изохорических процессах 1-2 и 3-4 теплота может быть определена по формулам:

$$Q_1 = \frac{M}{\mu} C_V (T_2 - T_1),$$

$$Q_2' = \frac{M}{\mu} C_V (T_3 - T_4).$$

Тогда на основании выражения (3.2) имеем:

$$\eta = \frac{\frac{M}{\mu} C_V (T_2 - T_1) - \frac{M}{\mu} C_V (T_3 - T_4)}{\frac{M}{\mu} C_V (T_2 - T_1)} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)}{T_2 - T_1}.$$

Использование формулы (2.86) для адиабатических процессов 2-3 и 4-1 позволяет получить следующие соотношения:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \epsilon^{1-\gamma},$$

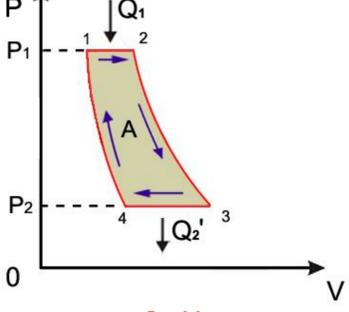
$$\frac{T_4}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \epsilon^{1-\gamma}.$$

Подстановка полученных из этих формул выражений для температур  $T_3$  и  $T_4$  в выражение для к.п.д. дает

$$\eta = \frac{(T_2 - T_1) - (\epsilon^{1-\gamma} T_2 - \epsilon^{1-\gamma} T_1)}{T_2 - T_1} = 1 - \epsilon^{1-\gamma}.$$

Таким образом к.п.д. двигателя внутреннего сгорания зависит от отношения объемов рабочего тела  $\epsilon$ , которое называется степенью сжатия и является одной из основных характеристик двигателя.

**Задача 3.2.** Рассчитать к.п.д. прямогочного воздушно-реактивного двигателя, термодинамический цикл которого состоит из следующих процессов (см. рис. 3.6): 1-2 - изобарический подвод теплоты при сгорании топлива в камере сгорания; 2-3 - адиабатическое расширение продуктов сгорания в сопле; 3-4 - изобарическое охлаждение продуктов сгорания в атмосфере; 4-1 - адиабатическое сжатие атмосферного воздуха. Подвод теплоты производится при постоянном давлении  $P_1$ , а отвод - при давлении окружающей атмосферы  $P_2 = P_1/\beta$ . Считать, что рабочее тело можно рассматривать как идеальный газ с показателем адиабаты, равным  $\gamma$ .



**Рис. 3.6.**

**Термодинамический цикл прямогочного воздушно-реактивного двигателя**

Решение: Для изобарических процессов подвода и отвода теплоты 1-2 и 3-4 имеем:

$$Q_1 = \frac{M}{\mu} C_P (T_2 - T_1),$$

$$Q_2' = \frac{M}{\mu} C_P (T_3 - T_4).$$

Использование формулы (3.2) дает:

$$\eta = \frac{\frac{M}{\mu} C_P (T_2 - T_1) - \frac{M}{\mu} C_P (T_3 - T_4)}{\frac{M}{\mu} C_P (T_2 - T_1)} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)}{T_2 - T_1}.$$

Применение выражения (2.87) для адиабатических процессов 2-3 и 4-1 позволяет записать

$$\frac{T_3}{T_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \beta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}},$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \beta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}.$$

Тогда выражение для к.п.д. рассматриваемого двигателя принимает вид:

$$\eta = \frac{(T_2 - T_1) - \left( \beta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_2 - \beta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_1 \right)}{T_2 - T_1} = 1 - \beta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}.$$

Как следует из полученной формулы к.п.д. прямогочного воздушно-реактивного двигателя зависит от степени увеличения давления рабочего тела (атмосферного воздуха)  $\beta$ . Так как давление воздуха  $P_1$  на входе в прямогочный двигатель зависит от скорости движения летательного аппарата, то величина  $\beta$ , а следовательно и к.п.д. двигателя, возрастают с увеличением скорости полета.