

Это значит, что газовая и термодинамическая температуры тождественны. Поэтому их можно не различать.

§ 23. Обобщенный цикл Карно

Рассмотрим основы термодинамической теории двигателя. Двигателем называется система, работающая по круговому процессу и преобразующая в результате своей работы взаимодействия любого рода в механические.

С точки зрения термодинамического анализа двигатель представляет систему с двумя степенями свободы, из которых одна обязательно механическая, а другая — любая. Если вторая степень свободы тепловая, то двигатель — тепловой, электрическая — электрический и т. д.

Системе с двумя степенями свободы отвечают четыре термодинамических параметра: $x_1, P_1; x_2, P_2$.

Пусть, совершая круговой процесс, система взаимодействует с двумя источниками (внешними телами) различных потенциалов P' и P'' (в случае теплового двигателя — с двумя источниками различной температуры T' и T'').

Условимся, что $P' > P''$. Изучение процесса, совершаемого двигателем, будем вести в координатной системе Px (рис. 12).

Нанесем в произвольном масштабе на график линии равного потенциала P' и P'' . Доведем значение потенциала системы до значения P' (точнее $P' - \epsilon$) и приведем ее в контакт с внешним телом, имеющим потенциал P' . Допустим, что координата x системы в этом случае примет значение x' . Отметим начальное состояние системы точкой 1 на диаграмме.

Будем производить расширение рабочего тела при постоянном потенциале P' . При этом точка, отображающая состояние системы, будет перемещаться вдоль линии P' , причем направление перемещения (в сторону

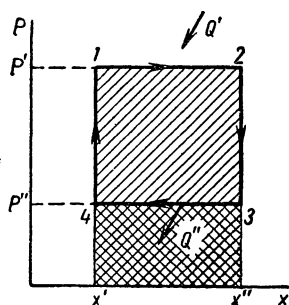


Рис. 12

возрастающих или убывающих x) определяется физическими свойствами системы. Для конкретности рассмотрения примем, что отображающая точка перемещается вправо от точки 1 (т. е. $(\frac{\partial x}{\partial V})_P > 0$). Пусть она достигнет положения 2 с координатой x'' . В процессе расширения рабочее тело получит от источника 1 количество воздействия Q' . В точке 2 отключим рабочее тело от источника 1 и произведем расширение его при постоянном значении x'' . Процесс расширения в этом случае сопровождается понижением потенциала, что следует из $(\frac{\partial P}{\partial x})_V \cdot (\frac{\partial x}{\partial V})_P \cdot (\frac{\partial V}{\partial P})_x = -1$, откуда, в связи с тем, что $(\frac{\partial P}{\partial x})_V > 0$ (условие стабильности) и $(\frac{\partial x}{\partial V})_P > 0$, $(\frac{\partial V}{\partial P})_x < 0$. Когда потенциал P системы достигнет значения P'' (точка 3), система приводится в контакт с источником потенциала P'' и производится процесс сжатия при постоянном потенциале P'' до состояния 4, которому соответствует $x = x'$. В процессе сжатия рабочее тело отдало источнику потенциала P'' количество воздействия Q'' . В состоянии 4 рабочее тело отключается от источника и производится сжатие при постоянном значении координаты до начального состояния 1. В результате потенциал системы возрастает до значения P' . Круговой процесс совершен. В применении к тепловому двигателю процесс представляет собой цикл Карно (две изотермы $T' = \text{const}$, $T'' = \text{const}$ и две адиабаты $S' = \text{const}$, $S'' = \text{const}$). В нашем случае мы получили **обобщенный цикл Карно**.

В качестве примера обобщенного цикла Карно рассмотрим цикл электростатического двигателя. Пусть имеется плоский конденсатор, пластины которого могут перемещаться друг относительно друга. Такой конденсатор является системой с двумя степенями свободы: электрической и механической. При изменении расстояния между пластинами изменяется емкость конденсатора, наряду с этим перемещение пластин может быть использовано для совершения работы.

Цикл такого двигателя совершается при взаимодействии конденсатора с двумя источниками разных электрических потенциалов V' и V'' . Пусть $V' > V''$.

Изобразим цикл двигателя в диаграмме Vq ($P = V; x = q$), где q — электрический заряд (рис. 13). Нанесем на диаграмме линии равных потенциалов V' и V'' . Конденсатор приводится в контакт с источником потенциала V' и приобретает заряд q' . Это начальное состояние изображим точкой 1 на диаграмме.

При постоянном потенциале V' производим сближение пластин конденсатора. При этом емкость конденсатора возрастает, от источника потенциала V' к конденсатору подтекают заряды. Одновременно вследствие перемещения пластин совершается механическая работа.

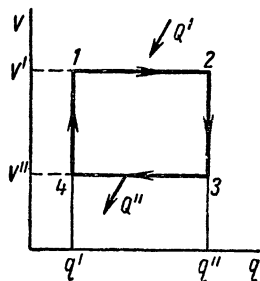


Рис. 13

В точке 2, которой соответствует заряд q'' , конденсатор отключается от источника и производится дальнейшее сближение пластин. Этот процесс идет при постоянном заряде q'' , и так как емкость продолжает увеличиваться, потенциал системы падает. Процесс идет до тех пор, пока конденсатор не приобретает потенциал V'' (точка 3).

В точке 3 конденсатор приводят в контакт с источником потенциала V'' и начинают раздвигать пластины при $V = \text{const}$. Емкость конденсатора будет уменьшаться, и заряд будет оттекать к источнику. Процесс продолжается до тех пор, пока заряд, убывая, достигнет первоначального значения q' (точка 4).

В точке 4 конденсатор отключают от источника и производят дальнейшее раздвигание пластин. Так как процесс идет при постоянном заряде конденсатора, то уменьшение емкости при раздвигании пластин влечет за собой увеличение потенциала. Раздвигание производится до тех пор пока потенциал системы достигнет первоначального значения V' (точка 1). На отрезке цикла 1—2 количество воздействия Q' было подведено от источника потенциала V' к системе, на отрезке 3—4 количество воздействия Q'' было отдано систе-

мой источнику потенциала V'' . Электростатический двигатель работал по обобщенному циклу Карно.

Возвратимся теперь к циклу двигателя, рассматриваемому в общем виде, и вычислим коэффициент полезного действия этого цикла.

Рабочее тело получило от источника с потенциалом P' количество воздействия Q' :

$$Q' = \int_{x'}^{x''} P dx = P'(x'' - x'). \quad (23.1)$$

На диаграмме Q' графически изображается площадью прямоугольника $12x''x'$.

Рабочее тело отдало источнику с потенциалом P'' количество воздействия Q'' :

$$|Q''| = \int_{x'}^{x''} P dx = P''(x'' - x'). \quad (23.2)$$

На диаграмме Q'' изображается площадью прямоугольника $34x'x''$. Разность полученного и отданного системой количества воздействия было преобразовано в работу:

$$Q' - |Q''| = (P' - P'')(x'' - x'). \quad (23.3)$$

Определим коэффициент полезного действия цикла.

$$\eta = \frac{Q' - |Q''|}{Q'} = \frac{P' - P''}{P'} = 1 - \frac{P''}{P'}. \quad (23.4)$$

Мы пришли к замечательному результату. Коэффициент полезного действия обобщенного цикла Карно не зависит от физических свойств рабочего тела и размеров двигателя, а полностью определяется отношением потенциалов обоих источников.

Проанализируем выражение (23.4). Очевидно, коэффициент полезного действия цикла Карно будет тем больше, чем меньше будет дробь $\frac{P''}{P'}$, т. е. чем ниже будет нижний потенциал и выше — верхний потенциал. Поэтому из всех имеющихся источников для работы цикла необходимо выбирать источники с P_{\min} и P_{\max} .

Тогда

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (23.5)$$

Практически увеличение коэффициента полезного действия цикла идет за счет возможного повышения верхнего потенциала, так как нижний в преобладающем большинстве двигателей фиксирован (температура внешней среды, давление внешней среды, потенциал земли и т. д.).

Может ли коэффициент полезного действия быть равным единице? Принципиально да, если $\frac{P''}{P'} = 0$. Но это возможно в двух случаях: 1) $P'' = 0$ или 2) $P' \rightarrow \infty$.

Физически же оба случая нереализуемы, так как не существует материальных тел, обладающих нулевым или бесконечно большими значениями любого из потенциалов (температуры, электрического потенциала, давления и т. д.). Следовательно, $\eta < 1$ всегда. Надо, однако, отметить, что общность этого результата ограничивается утверждением принципиальной невозможности достигнуть к. п. д., равного единице. Фактические ограничения, связанные с этим неравенством, весьма различаются между собой.

Из выражения для коэффициента полезного действия цикла вытекает, что для его осуществления необходимо привести систему во взаимодействие по крайней мере с двумя источниками разного потенциала. Если потенциал допускает количественную трансформацию путем введения между системой и окружающей средой количественно преобразующей связи, то положение существенно изменяется. В этом случае работа двигателя может совершаться при взаимодействии только с одним источником. Например, можно осуществить работу ранее рассмотренного электрического двигателя, используя только один источник. Для этого надо включить между системой и одним из источников преобразователь напряжения.

Термический потенциал — температура не допускает количественного преобразования. Термическое равновесие возможно лишь при равенстве температур взаимодействующих тел; невозможно осуществ-

вить связь, количественно преобразующую термический потенциал — температуру.

Таким образом, для работы теплового двигателя необходимо иметь минимум два источника разных температур (нагреватель и холодильник). Это положение обычно формулируется как принцип исключенного *perpetuum mobile* II рода, так как им утверждается невозможность использования практически неограниченных и непосредственно доступных источников тепла, таких, как атмосфера, океаны (использование которых создало бы ситуацию, фактически равноценную осуществлению вечного двигателя).

Принцип исключенного *perpetuum mobile* II рода является прямым следствием количественной непреобразуемости термического потенциала, и, следовательно, этот принцип может быть распространен на все те взаимодействия, для которых характерна непреобразуемость соответствующего им потенциала.

§ 24. Обобщенная теорема Карно

Рассмотрим цикл реального двигателя (произвольный цикл в координатной системе Px) и сопоставим коэффициент полезного действия этого цикла с коэффициентом полезного действия цикла Карно, работающего в тех же границах по потенциалу, что и реальный цикл.

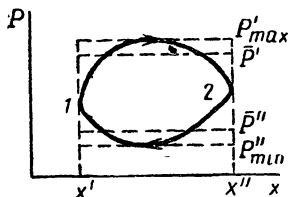


Рис. 14

Пусть в координатной системе Px (рис. 14) цикл двигателя изображается некоторой замкнутой кривой. Выделим два крайних состояния на этой кривой и отметим точки,

соответствующие этим состояниям, — точки 1 и 2. Абсциссы этих точек — x' и x'' . При движении по верхней ветви цикла от точки 1 к точке 2 рабочее тело, взаимодействуя с источниками переменного потенциала P' , получит количество воздействия Q' (происходит увеличение координаты x), измеряемое графически соответствующей площадью на диаграмме.

При движении по нижней ветви кривой от точки 2 к точке 1 рабочее тело отдаст источникам переменного