§ 19. Максимальная работа

Рассмотрим теплоизолированную систему, состоящую из нескольких тел, не находящихся друг с другом в тепловом равновесии. В течение процесса установления равновесия система может совершать работу (над какими-либо внешними объектами). Переход в равновесие может, однако, совершаться различным образом, причем будут различными и окончательные равновесные состояния системы; в частности, будут различными ее энергия и энтропия.

Соответственно этому полная работа, которую можно получить от неравновесной системы, будет зависеть от способа установления равновесия, и можно поставить вопрос о том, каким образом должен произойти переход в равновесное состояние, для того чтобы система произвела наибольшую возможную работу. При этом мы интересуемся именно той работой, которая производится за счет неравновесности системы; это значит, что надо исключить работу, которая могла бы быть произведена за счет общего расширения системы,— такая работа могла бы производиться и системой, находящейся самой по себе в равновесии. Соответственно этому будем предполагать, что в результате процесса общий объем системы остается неизменным (хотя и может меняться в течение процесса).

Пусть первоначальная энергия системы есть E_0, а энергия в состоянии равновесия как функция от энтропии системы в этом состоянии $E(S)$. Вследствие теплоизолированности системы произведенная ею работа равна просто изменению энергии:

$$|R| = E_0 - E(S)$$

(мы пишем $|R|$, так как по принятому нами условию $R < 0$, если работа производится самой системой).

Дифференцируя $|R|$ по энтропии S конечного состояния, имеем

$$\frac{\partial |R|}{\partial S} = -\left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_V = -T,$$

где T — температура конечного состояния; производная берется при заданном значении объема системы в конечном состоянии (совпадающем с его начальной величиной). Мы видим, что эта производная отрицательна, т. е. $|R|$ уменьшается с увеличением S. Но энтропия теплоизолированной системы не может убывать. Поэтому наибольшее возможное $|R|$ будет достигнуто, если S останется в течение всего процесса неизменной.

Таким образом, мы приходим к выводу, что система производит максимальную работу в том случае, когда ее энтропия остается постоянной, т. е. переход в равновесное состояние совершается обратимым образом.

Определим максимальную работу, которая может быть произведена при обмене малым количеством энергии между двумя телами с различными температурами T_1 и T_2; пусть $T_2 > T_1$. Прежде всего подчеркнем, что если бы передача энергии происходила непосредственно при соприкосновении обоих тел, то никакой работы вообще не было бы произведено. Процесс был бы необратимым (энтропия обоих тел увеличилась бы на $\delta E(1/T_1 - 1/T_2)$, где δE — перенесенное количество энергии).

Поэтому для того, чтобы осуществить обратимый перенос энергии и, соответственно, получить максимальную работу, необходимо ввести в систему еще одно вспомогательное тело (*рабочее тело*), совершающее определенный обратимый круговой процесс. Процесс этот должен осуществляться таким образом, чтобы тела, между которыми происходит непосредственный обмен энергией, находились при одинаковой температуре. Именно, рабочее тело при температуре T_2 приводится в соприкосновение с телом с температурой T_2 и изотермически получает от него определенную энергию. Затем оно адиабатически охлаждается до температуры T_1, отдает при этой температуре энергию телу с температурой T_1 и, наконец, адиабатически возвращается в первоначальное состояние. При расширениях, связанных с этим процессом, рабочее тело производит работу над внешними объектами. Описанный круговой процесс называется *циклом Карно*.

Переходя к вычислению получающейся максимальной работы, замечаем, что рабочее тело можно при этом не рассматривать, поскольку оно возвращается в результате процесса в исходное состояние. Пусть более нагретое второе тело теряет количество энергии $-\delta E_2 = -T_2 \delta S_2$, а первое получает при этом энергию $\delta E_1 = T_1 \delta S_1$. Ввиду обратимости процесса сумма энтропий обоих тел остается постоянной, т. е. $\delta S_1 = -\delta S_2$. Произведенная работа равна уменьшению полной энергии обоих тел, т. е.

$$|\delta R|_{\max} = -\delta E_1 - \delta E_2 = -T_1 \delta S_1 - T_2 \delta S_2 = -(T_2 - T_1)\,\delta S_2,$$

или

$$|\delta R|_{\max} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}\,|\delta E_2|. \tag{19,1}$$

Отношение совершенной работы к количеству затраченной энергии называют *коэффициентом полезного действия* η. Максимальный коэффициент полезного действия при переходе энергии от более нагретого к менее нагретому телу равен, согласно (19,1),

$$\eta_{\max} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \tag{19,2}$$

Более удобной величиной является *коэффициент использования* n, определяемый как отношение произведенной работы к максимальной работе, которая может быть получена в данных условиях. Очевидно, что $n = \eta/\eta_{\max}$.