1.5.3. Ранжирование источников и стоков теплоты с помощью идеальной машины Карно

Тепловая энергия является важной промежуточной формой энергии в процессах преобразования и при использовании всех видов энергоресурсов, как первичных (природных), так и вторичных. Основные тепловые потоки в энергетике, промышленности и коммунальном хозяйстве рождаются в результате сжигания ископаемого органического топлива.

Как следует из анализа функционирования машины Карно, чтобы перевести тепловую энергию в наиболее квалифицированную форму энергии – макроскопическую (механическую или электрическую) работу, помимо самого источника теплоты необходимо также наличие подходящего стока теплоты на более низком температурном уровне. Такого рода универсальным, наиболее доступным стоком в процессах преобразования теплоты в работу является окружающая человека природная среда, точнее циркулирующие в окружающей среде потоки воздуха, пресной или морской воды.

Пусть $\boldsymbol{T}$ – температура, при которой отводится теплота от данного источника тепловой энергии; $\boldsymbol{T}_0$ – температура той части окружающей среды, которая может быть использована в качестве стока теплоты. Максимальная величина работы, которая может быть получена из отведенной теплоты $\boldsymbol{Q}$ от данного источника с помощью идеальной машины Карно, действующей между источником и окружающей средой, определяется формулой (1.17), в которой нужно положить $\boldsymbol{T}_1 \equiv \boldsymbol{T}$ и $\boldsymbol{T}_2 \equiv \boldsymbol{T}_0$:

$$\boldsymbol{W} = \left(1 - \left(\boldsymbol{T}_0/\boldsymbol{T}\right)\right)\cdot \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) = \eta_{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0\right)\cdot \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}), \qquad (1.19)$$

где $\eta_{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0\right) \equiv 1 - \left(\boldsymbol{T}_0/\boldsymbol{T}\right)$. Это простое соотношение позволяет ранжировать все источники тепловой энергии по их относительной ценности. Очевидно, что наибольшую энергетическую ценность представляет собой теплота, отведенная от высокотемпературных источников:

$$\eta_{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0\right) \to 1 \qquad \text{при} \qquad \boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0 \to \infty .$$

Такими источниками, помимо химических процессов окисления углеводородного топлива, являются тепловыделение в активной зоне ядерного реактора; солнечное излучение, сфокусированное с помощью зеркальных отражателей, и др. Напротив, минимальную «потребительную стоимость» имеет теплота от источника, близкого по температуре к окружающей среде:

$$\eta_{\boldsymbol{T}}\left(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0\right) \to 0 \qquad \text{при} \qquad \boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0 \to 1.$$

Соответствующим образом могут быть ранжированы и потребители тепловой энергии в разнообразных сферах промышленного производства и коммунального хозяйства. Сначала рассмотрим то их множество, которое составляют эндотермические процессы, протекающие при температурах выше $\boldsymbol{T}_0$. Пусть $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T})$ – количество теплоты, переданное потребителю при температуре $\boldsymbol{T}$. Для того, чтобы перекачать данное количество теплоты от универсального теплового резервуара с температурой $\boldsymbol{T}_0$ к потребителю, идеальной машине Карно, действующей в обратном цикле – цикле т е п л о в о г о н а с о с а, потребуется затратить такую же по величине работу, какая была бы произведена в прямом цикле между теми же температурными уровнями T и T_0 (см. последний абзац предыдущего раздела 1.5.2). Таким образом, формула (1.19) остается справедливой и в этом случае, при отрицательных значениях $Q(T)$ и W. При этом коэффициент $\eta_T(T/T_0)$ приобретает более общий физический смысл, выражая «стоимость» единицы тепловой энергии данного потенциала по отношению к единице работы.

По поводу оценки «стоимости» потребленной тепловой энергии может возникнуть резонный вопрос, не рациональнее ли подвести требуемое количество теплоты потребителю не от окружающей среды, а от некоторого высокотемпературного источника с уровнем температуры T^*, не только не затрачивая в таком варианте работу теплового насоса, а производя ее с помощью тепловой машины, действующей между температурными уровнями источника T^* и потребителя T (см. рис. 1.11). Покажем, что термодинамического выигрыша такой вариант переноса энергии не дает (при использовании идеальных тепловых машин!). Действительно, для того, чтобы передать потребителю теплоту $Q(T)<0$, тепловой машине, согласно уравнению сохранения энтропии (1.16), потребуется отвести от источника теплоту $Q(T^*)=-(T^*/T)\cdot Q(T)>0$ (в уравнении (1.16), очевидно, необходимо сделать замены $T_1 \equiv T^*$; $Q_1 \equiv Q(T^*)$; $T_2 \equiv T$; $Q_2 \equiv Q(T)$). При этом тепловая машина произведет работу $W(T^*,T)=(1-(T/T^*))\cdot Q(T^*)>0$. Однако, такой вариант фактически означает потерю работы, которую можно было бы получить, если бы то же самое количество теплоты $Q(T^*)$ использовать в тепловой машине, взаимодействующей с окружающей средой, т.е. потерю работы $W(T^*,T_0)=(1-(T_0/T^*))\cdot Q(T^*)$. Складывая выигрыш и проигрыш в работе в рассматриваемом варианте, получим

$$W = W(T^*,T)-W(T^*,T_0)=Q(T^*)\cdot((T_0/T^*)-(T/T^*))=$$
$$=Q(T)\cdot(1-(T_0/T))<0,$$

т.е. те же самые затраты работы, что и при прямой перекачке теплоты от окружающей среды к данному потребителю.

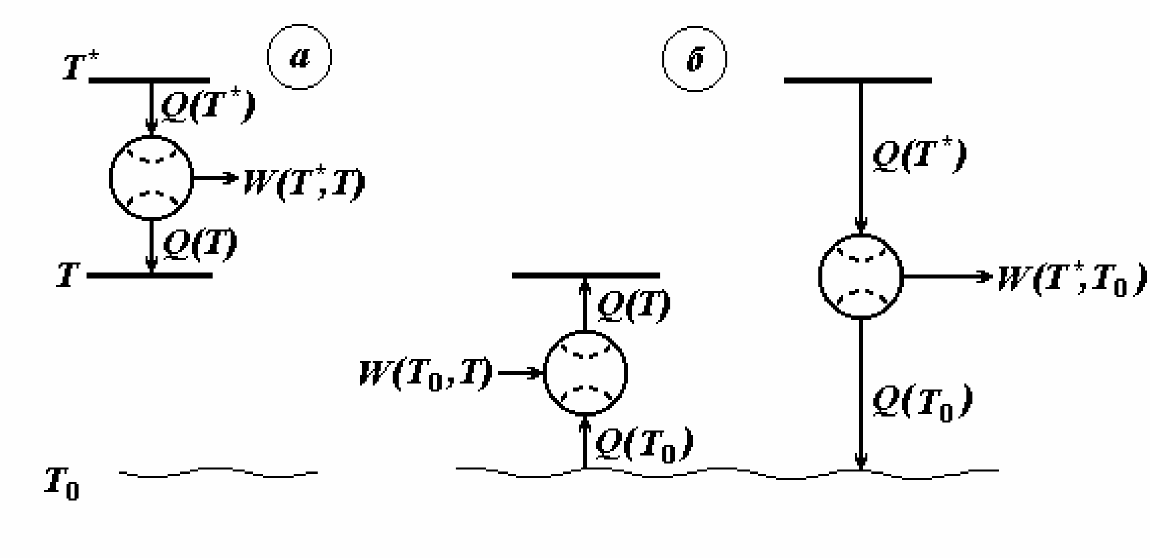

Рис. 1.11. Два эквивалентных варианта подвода теплоты $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T})$ *к потребителю:* ***а)*** *от высокотемпературного источника с температурой* $\boldsymbol{T}^*$ *с помощью тепловой машины;* ***б)*** *от окружающей среды с помощью теплового насоса, при одновременном независимом использовании теплового потока* $\boldsymbol{Q}\left(\boldsymbol{T}^*\right)$ *от высокотемпературного источника.*

Отдельного рассмотрения требуют системы, функционирующие при температурах ниже температуры окружающей среды. Наиболее часто встречающаяся ситуация – когда для поддержания в системе низкотемпературных процессов требуется отвод теплоты от системы (т.е. ее принудительное охлаждение). Естественным резервуаром для сброса отводимой теплоты является окружающая среда. Чтобы отобрать от системы с температурой $\boldsymbol{T}$ тепловой поток $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) > 0$ с помощью идеальной машины Карно, действующей в обратном цикле – в данном случае называемом циклом холодильной машины, потребуется перевести в окружающую среду, согласно уравнению сохранения энтропии (1.16), тепловой поток $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}_0) = -(\boldsymbol{T}_0/\boldsymbol{T}) \cdot \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T})$, затратив на это работу $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) + \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}_0) = \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) \cdot (1 - (\boldsymbol{T}_0/\boldsymbol{T}))$. Таким образом, и в этом случае для оценки «стоимости» отвода теплоты от системы справедлива формула (1.19), в которой «переводной» коэффициент $\eta_{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0) = 1 - (\boldsymbol{T}_0/\boldsymbol{T})$ становится отрицательной величиной. Формула показывает, что чем ниже температура системы, тем значительнее затраты работы на отвод единичного количества теплоты:

$$\boldsymbol{W}/\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) \to -\infty \qquad \text{при} \qquad \boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0 \to 0.$$

Наконец, в том случае, когда в низкотемпературной системе протекают эндотермические процессы, система может быть использована как сток теплоты для тепловой машины, забирающей теплоту от окружающей среды. По аналогии с предыдущим легко установить, что производство работы также будет выражаться формулой (1.19), в которой $\eta_{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{T}/\boldsymbol{T}_0) < 0$ и $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T}) < 0$ (теплота, отдаваемая низкотемпературной системе). Можно сказать, что такая машина работает «на холоде».

Относительно оценки затрат энергии, необходимых для охлаждения системы при $T < T_0$, так же может быть поставлен вопрос , не рациональнее ли в качестве стока теплоты в этом случае использовать не окружающую среду, а некоторую систему, потребляющую теплоту при промежуточной температуре $T < T^* < T_0$, так как затраты работы при этом, очевидно, снижаются. Как и в рассмотренной выше ситуации в области $T > T_0$, такой вариант использования третьего теплового резервуара термодинамического выигрыша не дает, поскольку теряется работа тепловой машины, действующей между окружающей средой и указанным резервуаром с промежуточной температурой T^*.

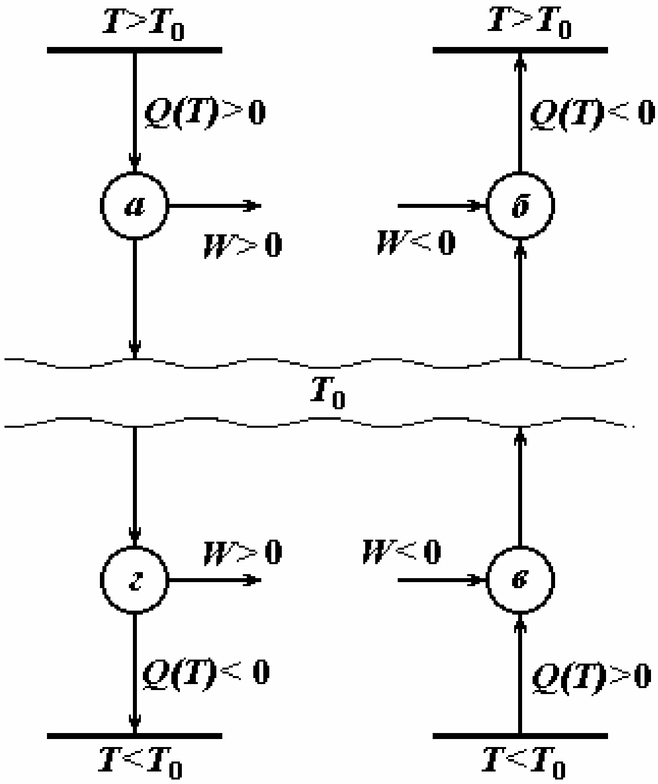

*Рис. 1.12. Четыре сценария использования циклического процесса Карно: **а)** тепловой двигатель; **б)** тепловой насос; **в)** холодильная машина; **г)** двигатель, работающий « на холоде».*

Итак, при любых сценариях преобразования теплоты в работу и обратно, представленных единой схемой на рис.1.12, так сказать, «биржевой курс» теплоты по отношению к более квалифицированной форме энергии – макроскопической работе выражается общей формулой (1.19). Потребует дополнительного обсуждения (см. раздел 1.6.3) вопрос о выборе значения T_0 в качестве характеристики базового теплового резервуара.

В заключение данного раздела необходимо еще раз обратить внимание на то, что знаки потоков энергии в формуле (1.19) определены во всех случаях *по отношению к тепловой машине.*