

6.1. Эксергия термодинамических систем

При рассмотрении второго закона термодинамики (раздел 2.4) на примере преобразования теплоты в работу было установлено, что различные виды энергии обладают неодинаковыми свойствами с точки зрения возможности преобразования их в другие виды. Одни из них могут быть полностью преобразованы в любые иные. Это энергии упорядоченных форм движения. Другие виды энергии – энергии неупорядоченных форм движения (например теплового движения молекул) -могут быть преобразованы в энергию иных форм лишь в ограниченной части и при соблюдении некоторых условий. Очевидно, что именно эта часть представляет интерес при анализе процессов, протекающих в тепловых машинах.

Часть энергии системы, которая может быть преобразована в энергию организованных форм, называется *эксергией*. Остальная часть называется *анергией*. Мерой эксергии является максимальная полезная работа, которую можно получить при обратимом изменении состояния системы от заданного (при параметрах p, T) до состояния равновесия с окружающей средой при параметрах p_0 и T_0 . Таким образом, в отличие от энергии, эксергия является функцией не только параметров системы, но и параметров окружающей среды.

Выясним, как определяется эксергия различных систем.

Рассмотрим изолированную систему, состоящую из вещества, занимающего при давлении p и температуре T некоторый объем V , и окружающей среды при давлении p_0 и температуре T_0 . Эксергию этого вещества можно найти, рассчитав, как сказано выше, максимальную полезную работу, совершаемую в обратимом процессе изменения его параметров до параметров p_0, T_0 . Такое обратимое изменение параметров можно осуществить в результате последовательного проведения двух процессов. Вначале следует провести обратимое адиабатное (изоэнтропное) расширение вещества так, чтобы его температура стала равна температуре окружающей среды T_0 (процесс 1-а на рис.6.1), а затем обратимое изотермическое расширение до давления окружающей среды p_0 (процесс а-0 на рис. 6.1). В последнем процессе к веществу подводится теплота, равная (в расчете на 1 кг) $q = T_0(s_0 - s)$ и суммарно совершенную в этих двух процессах работу можно найти по уравнению первого закона термодинамики (1.11)

$$l = u - u_0 - T_0(s - s_0)$$

Однако это не есть эксергия, так как часть этой работы должна быть затрачена на работу против постоянного давления окружающей среды при увеличении объем вещества от начального до объема при конечных параметрах p_0, T_0 . Поэтому *эксергия вещества в замкнутом объеме* равна

$$e_v = u - u_0 - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v) \quad (6.1)$$

Если в подобной системе вещество находится не в замкнутом объеме, а в потоке, то обратимо изменить его параметры до параметров окружающей среды можно с помощью той же последовательности процессов, что рассмотрена выше и представлена на рис. 6.1. В этом случае

при нахождении эксергии следует учесть, что техническая работа потока это и есть эксергия, так как ее можно полностью полезно использовать на валу вращающегося механизма (турбины, компрессора и т.п.). Тогда из уравнения первого закона термодинамики для потока (1.27) получим, что эксергия вещества в потоке равна

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (6.2)$$

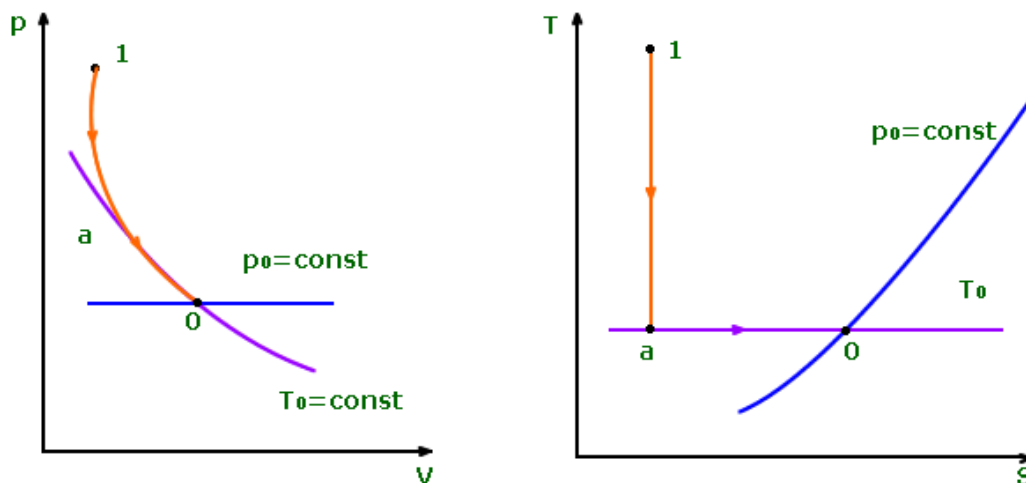


Рис. 6.1

Заметим, что в это уравнение не включена эксергия кинетической энергии потока, равная самой этой энергии, так как при желании это легко сделать, а обычно нас гораздо больше интересует, что можно получить за счет изменения параметров вещества.

Эксергия вещества в потоке может быть наглядно представлена в h,s диаграмме (рис.6.2). В этой диаграмме к изобаре окружающей среды $p_0 = \text{const}$ в точке $0(p_0, s_0)$, соответствующей состоянию окружающей среды, проведена касательная. В данных переменных производная на изобаре равна $(\partial h / \partial s)_{p_0} = T_0$ и, следовательно, угол наклона касательной определяется условием $\text{tg} \alpha = T_0$. Поэтому эта линия называется *прямой среды*. Если состояние вещества в потоке определено параметрами h_1 и s_1 (тч.1), то составляющие формулы (6.2) получают простое геометрическое представление, показанное на рис.6.2, и эксергия его e_1 изображается в h,s диаграмме вертикальным отрезком 1 –а.

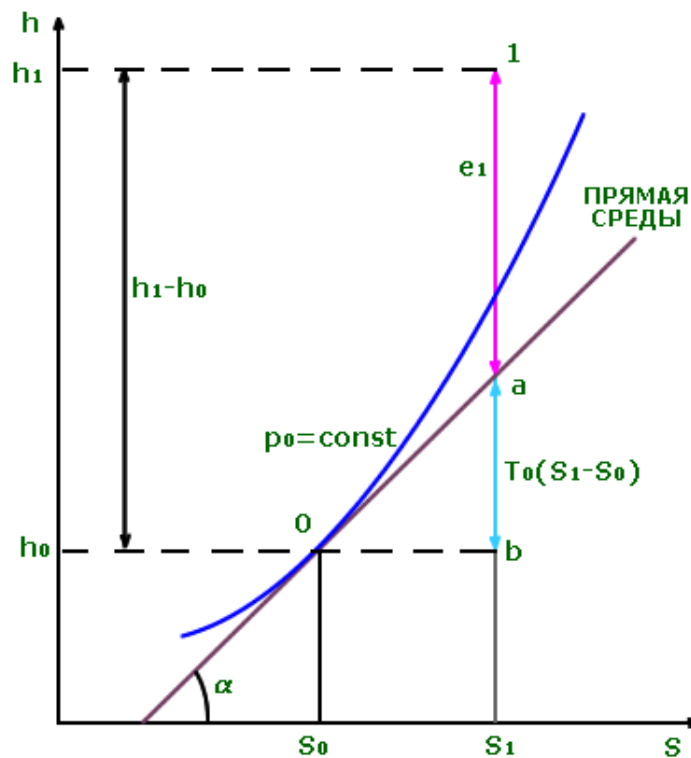


Рис. 6.2

Выясним далее как определяется эксергия теплоты, отводимой от источника теплоты в системе, состоящей из этого источника и окружающей среды с постоянной температурой T_0 . Если температура теплового источника T не изменяется при отводе теплоты q , то, очевидно, что максимальная работа может быть получена при осуществлении за счет этой теплоты обратимого цикла Карно. Поэтому эксергия теплоты в этом случае равна

$$e_q = q\eta_T^k = q(1 - T_0/T) \quad (6.3)$$

Выражение, стоящее в скобках, часто называют *эксергетической температурой* τ_e . График ее изменения при изменении температуры источника показан на рис. 6.3, на котором видно, что она может иметь отрицательные значения и, следовательно, эксергия теплоты тоже может быть отрицательна. Это есть просто отражение того факта, что для отвода теплоты от источника с температурой ниже температуры окружающей среды в окружающую среду надо затратить работу.

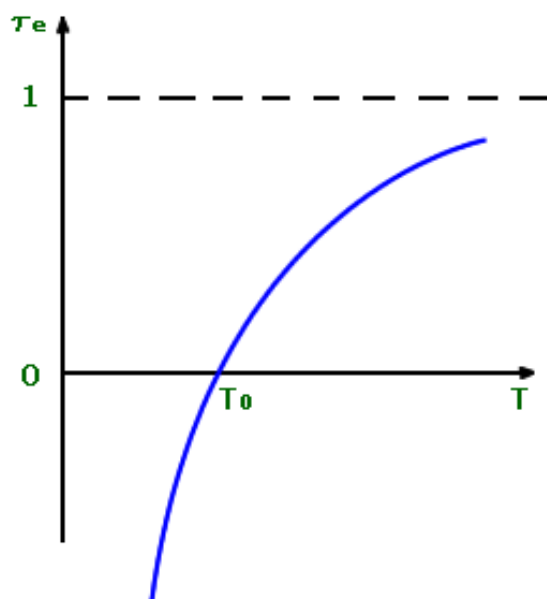


Рис. 6.3

На практике чаще приходится иметь дело с тепловыми источниками, температура которых при отводе тепла изменяется. Примером такого источника теплоты могут служить газообразные продукты сгорания топлива в котельном агрегате, где они при постоянном давлении охлаждаются, отдавая теплоту воде и водяному пару, от температуры сгорания T_1 до (в пределе) температуры окружающей среды T_0 (рис. 6.4). Эксергию теплоты в этом случае можно найти, выделив элементарное количество теплоты dq , эксергия которого определяется выражением (6.3), и проинтегрировав его для всего интервала температур

$$e_q = \int_{T_1}^{T_0} dq(1 - T_0/T)$$

Вспомнив, что согласно (2.1) $dq/T = ds$, в результате интегрирования получим, что *эксергия теплоты, получаемой от источника теплоты переменной температуры, равна*

$$e_q = q - T_0 \Delta s_u \quad (6.4)$$

где Δs_u - изменение энтропии источника теплоты. Графическое представление эксергии теплоты в T,s -диаграмме показано на рис.6.4.

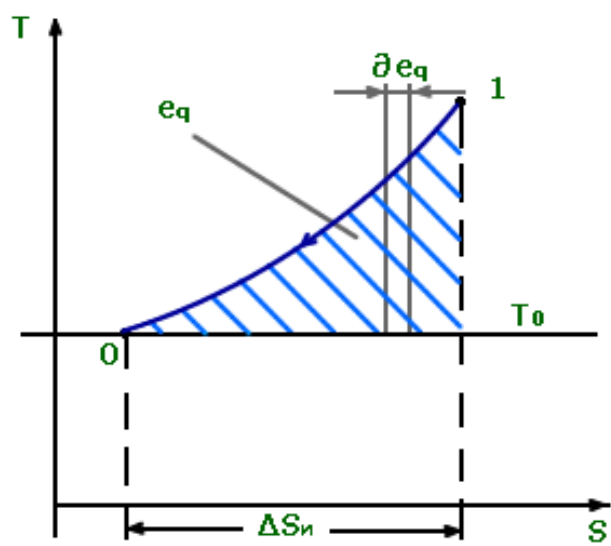


Рис. 6.4