

## 6.2. Потеря эксергии в необратимых процессах

Полученные в предыдущем разделе выражения для эксергии определяют максимальную работу, которую можно получить в различных системах при проведении обратимых – идеализированных -процессов. Реальные же процессы всегда в той или иной степени необратимы, что приводит к уменьшению способности системы производить работу. Это уменьшение и называется *потерей эксергии*.

Как можно определить уменьшение эксергии системы вследствие необратимости процесса разберем на примере необратимого процесса адиабатного дросселирования, рассмотренного в разделе 5.4. Поток газа в сечении 1 (рис. 6.5) перед местным сопротивлением (клапаном) имеет параметры  $p_1$ ,  $h_1$ ,  $s_1$  и скорость  $w_1$ . В результате трения в клапане давление уменьшается до  $p_2$ , но энтальпия в сечении 2 - $h_2$  - равна  $h_1$  и скорости газа в сечениях 1 и 2 примерно одинаковы.

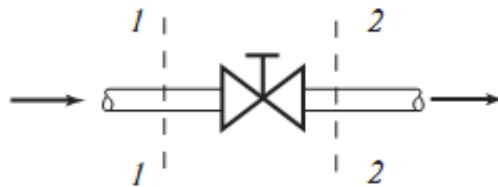


Рис. 6.5

Процесс дросселирования существенно необратим и  $s_2 > s_1$ . Эксергия газа согласно (6.2):

- до дросселирования

$$e_1 = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0),$$

- после дросселирования

$$e_2 = h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0)$$

Уменьшение эксергии составит

$$\Delta e = e_1 - e_2 = T_0(s_2 - s_1)$$

Поскольку процесс дросселирования адиабатный, то увеличение энтропии газа представляет собой увеличение энтропии всей системы. Поэтому запишем

$$\Delta e = T_0 \Delta s_{сис} \quad (6.5)$$

где  $\Delta s_{сис}$  - увеличении энтропии системы вследствие любых необратимых процессов. Формула (6.5) носит название *формулы Гюи – Стодолы* и справедлива для расчета потери эксергии в любых необратимых процессах, независимо от причин необратимости.

Таким образом, в отличие от энергии, которая не исчезает, а лишь превращается из одной формы в другую, эксергия может уменьшаться при необратимых процессах. Потеря эксергии

означает, что вследствие необратимости дополнительное количество энергии будет передано окружающей среде, где она имеет нулевую возможность преобразования ее в работу.

Понятие эксергии дает возможность сопоставлять различные виды энергии по их ценности с точки зрения получения работы за их счет, а понятие потери эксергии позволяет судить о термодинамическом совершенстве процессов преобразования энергии. Показателем термодинамического совершенства процесса служит эксергетический коэффициент полезного действия равный отношению эксергии, полученной в результате процесса  $e_{получ}$ , к эксергии затраченной  $e_{затр}$ .

$$\eta_{ex} = e_{получ} / e_{затр}. \quad (6.6)$$

Полученная эксергия может быть или равна затраченной (в обратимом процессе) или меньше нее на величину потерь  $\Delta e$ . Поэтому эксергетический кпд можно представить как

$$\eta_{ex} = 1 - T_0 \Delta s_{сист.} / e_{затр}. \quad (6.7)$$

Эксергетический кпд применим для анализа совершенства любых процессов и теплотехнических устройств. Так можно говорить об эксергетическом кпд цикла, комбинированной установки для выработки электричества и теплоты для целей теплофикации, теплообменного аппарата, тепловой изоляции и т.д. В частности, применим его для оценки совершенства обратимого цикла Карно (рис.6.6).

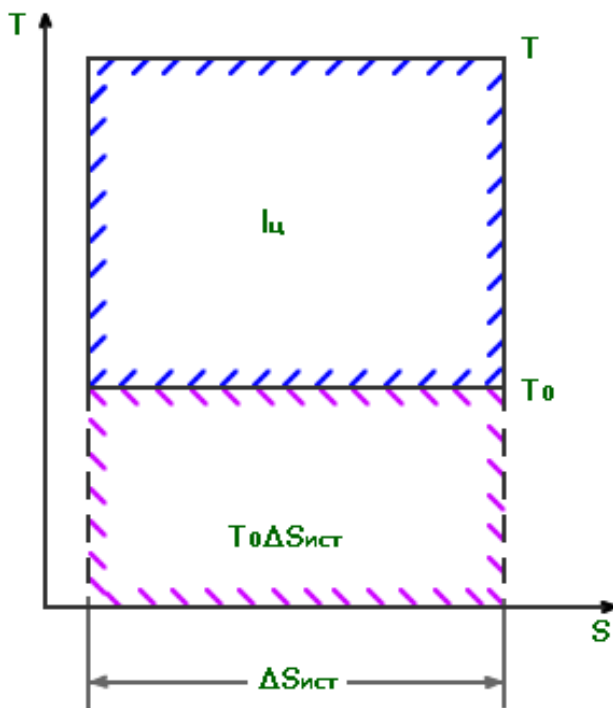


Рис. 6.6

В этом случае полученная эксергия есть работа цикла  $l_u$ , затраченная эксергия – эксергия теплоты  $q_1$ , равная по (6.4)  $e_{q_1} = q_1 - T_0 \Delta s_u$  и эксергетический КПД равен

$$\eta_{ex}^k = l_u / (q_1 - T_0 \Delta s_u)$$

Из графического представления этих составляющих в T,s – диаграмме (рис.6.5) ясно, что  $\eta_{ex}^k = 1$ . Подобным образом, эксергетический КПД любого обратимого цикла равен единице. Это означает, что такой цикл термодинамически совершенен и с помощью него в полной мере осуществляется преобразование теплоты в работу, возможное в заданных условиях

**Пример 3.** Определить потерю эксергии и эксергетический КПД газо – водяного подогревателя, в котором газ от начальных параметров  $p_1 = 105$  кПа и

$t_1 = 300^\circ\text{C}$  охлаждается до температуры  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ , а давление его падает до  $p_2 = 100$  кПа (рис.6.6). Вода нагревается от начальных параметров  $t_3 = 30^\circ\text{C}$  и  $p_3 = 1$  МПа до температуры  $t_4 = 160^\circ\text{C}$  при  $p_4 = 900$  кПа. Расчет вести на 1 кг воды. Газы обладают свойствами воздуха. Температура окружающей среды равна  $T_0 = 293,15$  К

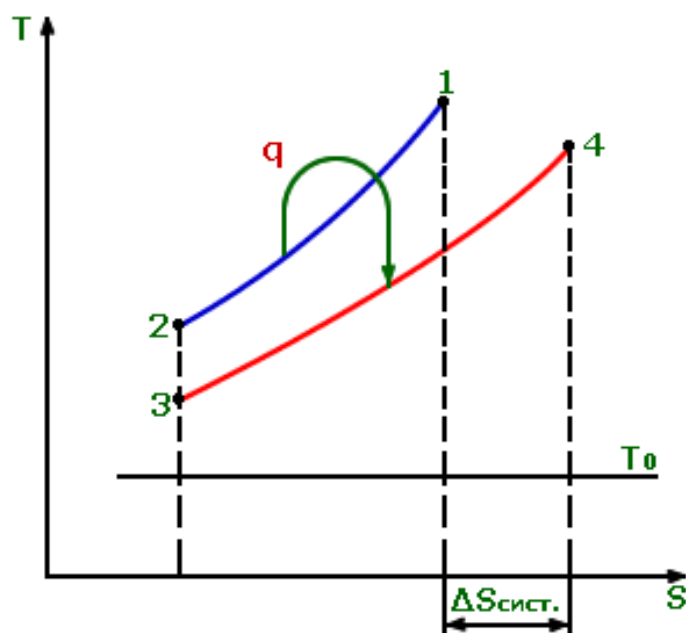


Рис. 6.7

**Решение** Для решения используем уравнение (6.7). Для этого определим свойства рабочих тел в начальном и конечном состояниях. Для газа из таблицы П1 Приложения или из справочника [2] имеем:  $h_1 = 579,05$ ;  $s_1^0 = 7,3637$ ;  $h_2 = 353,73$ ;  $s_2^0 = 6,8685$ . Для воды из таблицы П3 Приложения или из справочника [8] имеем:  $h_3 = 126,7$ ;  $s_3 = 0,4365$ ;  $h_4 = 675,7$ ;  $s_4 = 1,9424$ .

Определим расход газа в расчете на 1 кг воды

$$m_f = (h_4 - h_3) / (h_1 - h_2) = (675,7 - 126,7) / (579,05 - 353,73) = 2,4365 \text{ кг/кг}$$

Найдем изменение энтропии системы  $\Delta S_{сист} = \Delta S_g + \Delta S_w$ . Для этого изменение энтропии газа рассчитаем по

(2.5)

$$\Delta S_z = m_z(s_2 - s_1) = m_z(s_2^0 - s_1^0 - R \ln p_2 / p_1) =$$

$$= 2,4365(6,8685 - 7,3637 - 0,287 \ln 100/105) = -0,4812 \cdot 2,4365 = -1,1724 \text{ кДж/К}$$

Изменение энтропии воды рассчитаем как

$$\Delta S_g = m_g(s_4 - s_3) = 1 \cdot (1,9424 - 0,4365) = 1,5059 \text{ кДж/К}$$

Изменение энтропии системы составит

$$\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_z + \Delta S_B = -1,1724 + 1,5059 = 0,3335 \text{ кДж/К}$$

Потерю эксергии вычислим по формуле Гюи –Стодолы (6.5)

$$\Delta E = T_0 \Delta S_{\text{сист}} = 293,15 \cdot 0,3335 = 97,77 \text{ кДж}$$

Для определения эксергетического КПД найдем затрату эксергии, применив для расчета эксергии газа уравнение (6.2)

$$E_{\text{затр.}} = m_z[h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)] = m_z(h_1 - h_2) - T_0(-\Delta S_z) =$$

$$= 2,4365(579,05 - 353,73) - 293,15 \cdot 1,1724 = 205,3 \text{ кДж}$$

Эксергетический КПД подогревателя равен

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - T_0 \Delta S_{\text{сист}} / E_{\text{затр.}} = 1 - 97,77 / 205,3 = 0,524$$