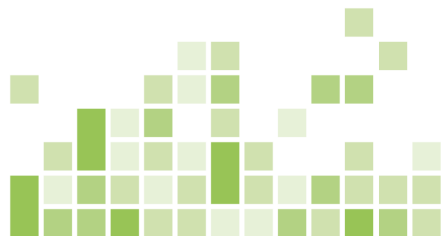




**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 7. Получение работы в изолированной системе. Эксергия в объеме и ее потери



Второй закон термодинамики позволяет охарактеризовать условия, при которых возможно получить работу в данной системе. Возможность получения работы в изолированной системе определяется ее неравновесностью. Таким образом, получение работы в системе определяется не запасом энергии в ней (в изолированной системе запас энергии не меняется), а наличием разности давлений, температур, электрических потенциалов и т.д.



В технической термодинамике рассматривается возможность получения механической работы за счет использования внутренней тепловой энергии тел. Поэтому исключим из рассмотрения химические и внутриатомные процессы, действие гравитационных, магнитных, электрических и других полей, а также изменение кинетической энергии видимого движения вещества.



В изолированной термодинамической системе возможно получение механической работы при наличии в ней механической (разность давлений) или термической (разность температур) неравновесности или того и другого одновременно. Например, имеем баллон со сжатым воздухом и тело, имеющее высокую температуру, оба объекта находятся в окружающей среде с постоянными параметрами.



В баллоне имеется механическая неравновесность, что позволяет системе получить работу, для этого открывается вентиль баллона и устанавливается воздушная турбина (вертушка). У горячего тела имеется термическая неравновесность, это в свою очередь дает возможность получить работу с помощью теплового двигателя, в качестве холодного тела здесь выступает окружающая среда.



В обоих случаях возможность получения работы исчерпывается, когда система приходит в состояние термодинамического равновесия. Но система может прийти в состояние равновесия и без совершения полезной работы, в результате протекания в ней необратимых процессов.

Например, можно выпустить воздух из баллона в атмосферу или охладить горячее тело за счет его взаимодействия с окружающей средой без совершения полезной работы.



Таким образом, при переходе системы из неравновесного состояния в равновесное величина полезной работы зависит от характера процесса такого перехода. Наибольшая работа получается в том случае, когда система переходит в равновесное состояние при протекании в ней только обратимых процессов. При протекании таких процессов отсутствуют потери возможной работы на трение и на необратимый теплообмен, а обратимые циклы имеют максимальный КПД, т.е. максимальная доля теплоты горячего источника превращается в работу.



Проанализировав вышеизложенное, можно сделать два важных вывода, которые имеют непосредственное отношение ко второму закону термодинамики.

1. Работу в изолированной системе можно получить только в том случае, если она не находится в состоянии термодинамического равновесия. Работоспособность системы исчерпывается при достижении в ней равновесного состояния.



2. Наибольшая возможная работа может быть получена при переходе системы из неравновесного состояния в равновесное, при протекании в ней только обратимых процессов.



Эксергия в объеме

В технической термодинамике наибольший интерес представляет возможность получения работы в системе, состоящей из тел и внешней среды, находящихся в неравновесном состоянии. Окружающая среда в большинстве энергетических установок выступает в качестве холодного источника теплоты: водоемы для ТЭС и АЭС, окружающий воздух для ДВС и ГТУ и т.п.



Эксергия в объеме

Тела, не находящиеся в равновесном состоянии с окружающей средой: продукты сгорания органического топлива, тепловыделяющие элементы ядерных реакторов и т.п., представляют собой горячие источники теплоты, т.е. они выступают в роли потенциальных источников работы. Для оценки максимально возможного количества полезной работы, которое может быть получено в таких системах, в 1955 г. югославским ученым З. Рантом было введено понятие эксергии.



Эксергия в объеме

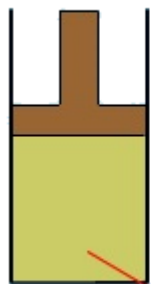
Эксергией в объеме называется максимально возможная полезная работа постоянной массы вещества в закрытой системе. Она может быть получена при переходе данного вещества (тела) из неравновесного состояния в состояние равновесия с окружающей средой только по обратимым процессам.

Для иллюстрации понятия эксергии в объеме рассмотрим газообразное тело в цилиндре под поршнем.



Эксергия в объеме

$$E = L - L_{\text{вн}}$$



$T_{\text{oc}}; P_{\text{oc}}$

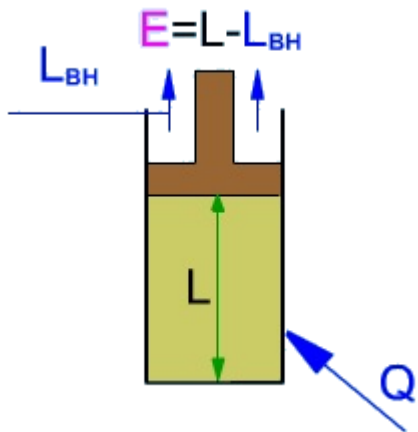
$T_1; P_1; U_1; S_1$

Тело имеет параметры P_1, T_1 ,
окружающая среда – $P_{\text{oc}}, T_{\text{oc}}$.
Пусть эта система находится
в неравновесном состоянии,
т.е. $P_1 \neq P_{\text{oc}}$ и $T_1 \neq T_{\text{oc}}$. В соот-
ветствии с определением
эксергии в такой системе
максимальная полезная

работа получается при обратимом переходе тела из
начального состояния в состояние полного термо-
динамического равновесия с окружающей средой.



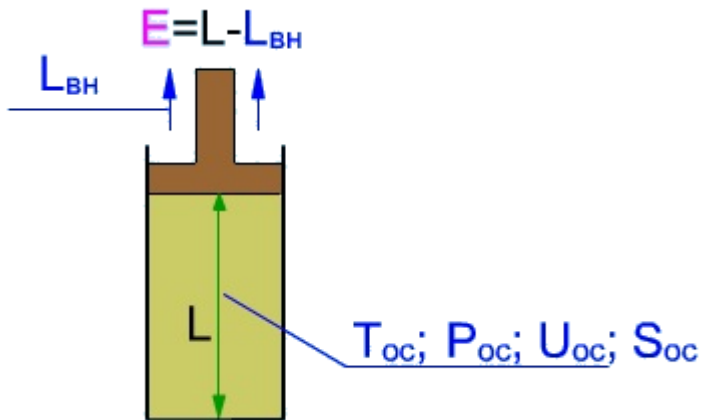
Эксергия в объеме



Таким образом, эксергии будет соответствовать работа на штоке поршня при обратимом переходе тела из первоначального состояния с параметрами P_1, T_1, U_1, S_1 в состояние его термодинамического равновесия с окружающей средой.



Эксергия в объеме



При этом его давление и температура будут такими же, как и у окружающей среды, P_{oc}, T_{oc} , а внутренняя энергия и энтропия

тела будут определяться как функция этих параметров – $U_{oc} = F(P_{oc}, T_{oc}), S_{oc} = f(P_{oc}, T_{oc})$.



Эксергия в объеме

Аналитическое выражение для определения эксергии получается из выражения первого закона термодинамики для тела, находящегося в закрытой системе, при совершении телом обратимых процессов.

Первый закон термодинамики для обратимого процесса имеет вид

$$Q = U_{\text{oc}} - U_1 + L. \quad (7.1)$$



Эксергия в объеме

Количество теплоты, подведенное к телу в нашем примере, можно рассчитать через параметры его состояния на основании следующих положений.

Поскольку система состоит только из нашего тела и окружающей среды, то количество теплоты, подведенное к телу, в соответствии с первым законом термодинамики равно количеству теплоты, отданному окружающей средой, взятому с обратным знаком: $Q = -Q_{oc}$.



Эксергия в объеме

В системе происходят только обратимые процессы, следовательно, в соответствии со вторым законом термодинамики изменение энтропии такой системы равно нулю:

$$\Delta S_c = \Delta S_T + \Delta S_{oc} = 0,$$

а изменение энтропии тела равно изменению энтропии окружающей среды, взятому с обратным знаком: $\Delta S_T = -\Delta S_{oc}$.



Эксергия в объеме

Температура окружающей среды не изменяется, следовательно, теплоту окружающей среды можно представить в виде выражения, соответствующего изотермическому процессу:

$$Q_{oc} = T_{oc} \Delta S_{oc}. \quad (7.2)$$

Теплоту, полученную телом, можно рассчитать по выражению (7.2), взяв его с обратным знаком и выразив изменение энтропии окружающей среды через изменение энтропии самого тела:



Эксергия в объеме

$$Q = -Q_{oc} = -T_{oc}\Delta S_{oc} = T_{oc}\Delta S_T = T_{oc}(S_{oc} - S_1), \quad (7.3)$$

где S_1 , S_{oc} – энтропия тела в начальном состоянии и в состоянии равновесия с окружающей средой (при P_{oc} и T_{oc}).

При изменении объема тело совершает работу L , но всю эту работу как полезную рассматривать нельзя. Часть работы расширения тела L расходуется на перемещение внешней среды, т.е. в нашем примере при движении поршня он перемещает внешнюю среду.



Эксергия в объеме

Эта работа называется внешней, а так как давление внешней среды не изменяется, то она может быть подсчитана в виде выражения

$$L_{\text{вн}} = P_{\text{ос}}(V_{\text{ос}} - V_1), \quad (7.4)$$

где V_1 и $V_{\text{ос}}$ – объем тела при начальных параметрах и при давлении и температуре окружающей среды.

Таким образом, максимальная полезная работа будет представлена в виде разности работы расширения тела и внешней работы:



Эксергия в объеме

$$\begin{aligned} L_{\max \Pi} &= E = L - L_{\text{ВН}} = Q - (U_{\text{oc}} - U_1) - L_{\text{ВН}} = \\ &= T_{\text{oc}}(S_{\text{oc}} - S_1) - (U_{\text{oc}} - U_1) - P_{\text{oc}}(V_{\text{oc}} - V_1). \end{aligned} \quad (7.5)$$

После деления правой и левой частей выражения (7.5) на массу тела получается расчетное выражение удельной максимально полезной работы, которое и является аналитическим выражением эксергии постоянной массы вещества в закрытой системе:

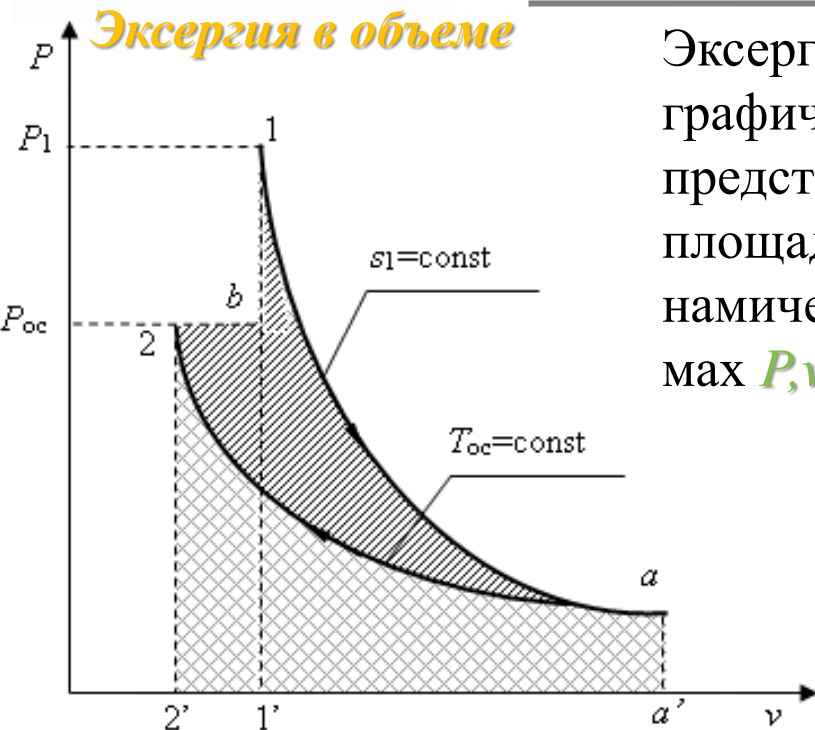
$$e = (u_1 - u_{\text{oc}}) - T_{\text{oc}}(s_1 - s_{\text{oc}}) + P_{\text{oc}}(v_1 - v_{\text{oc}}). \quad (7.6)$$



Эксергия в объеме

В выражении (7.6) параметры начального состояния тела в разностях поставлены на первое место для лучшего восприятия формулы. Из выражения (7.6) видно, что эксергия при неизменном состоянии внешней среды является функцией состояния вещества, т.е. ее можно представить в виде

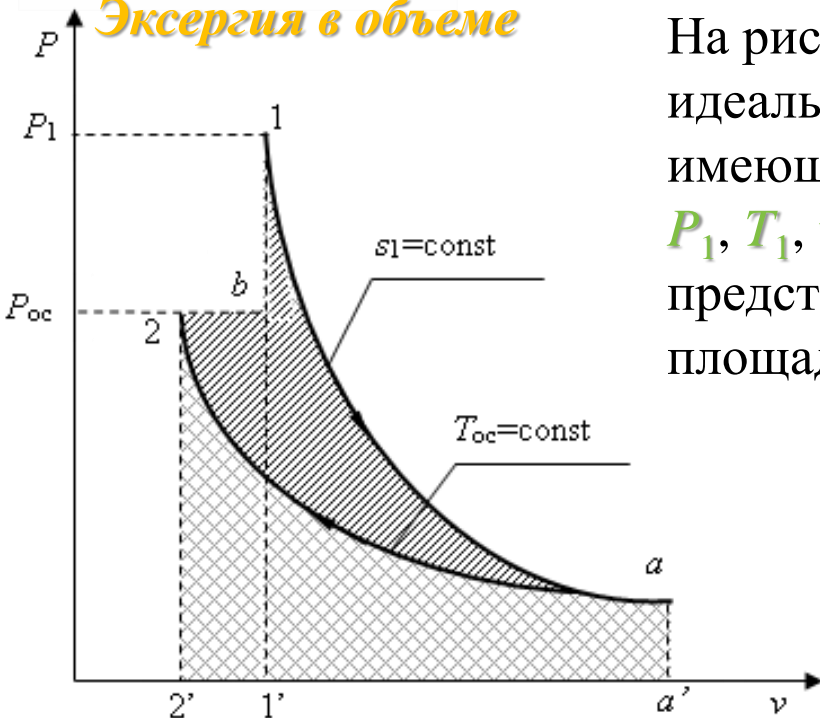
$$e = u_1 - T_{oc} s_1 + P_{oc} v_1 - \text{const}, \quad (7.7)$$



Эксергию в объеме графически можно представить в виде площади в термодинамических диаграммах P, v и T, s .



Эксергия в объеме



На рисунке эксергия
идеального газа,
имеющего параметры
 P_1 , T_1 , v_1 , u_1 , s_1 ,
представлена в виде
площади $1a2b1$.



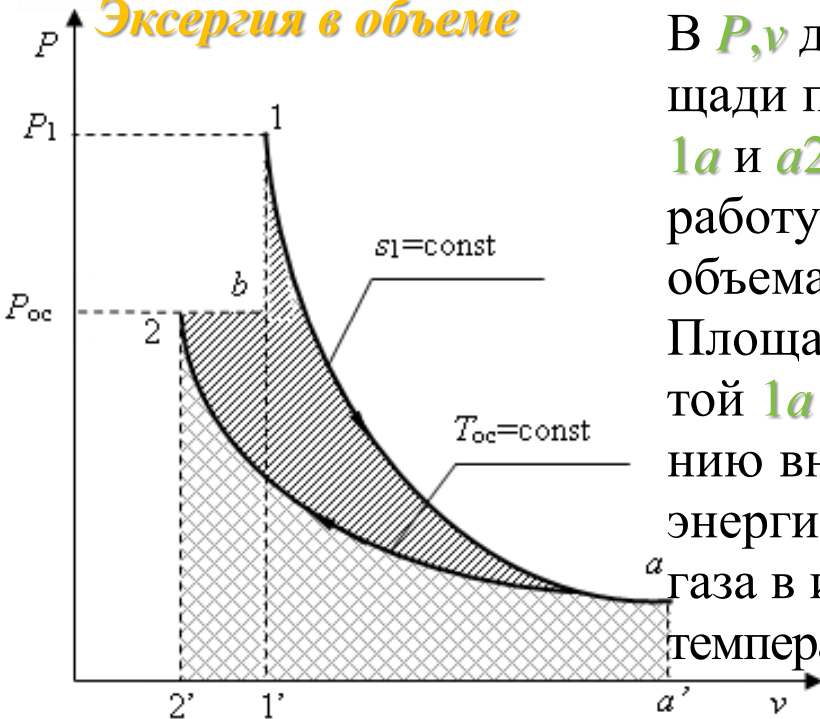
Эксергия в объеме



В данном примере обратимый переход идеального газа из первоначального состояния (точка 1) в состояние равновесия с окружающей средой (точка 2) происходит по адиабате $1a$ при $s_1 = \text{const}$ и изотерме $a2$ при $T_{0c} = \text{const}$.



Эксергия в объеме



В P, v диаграмме площади под процессами $1a$ и $a2$ представляют работу изменения объема данного газа. Площадь под адиабатой $1a$ равна изменению внутренней энергии идеального газа в интервале температур от T_1 до T_{0c} .



Эксергия в объеме



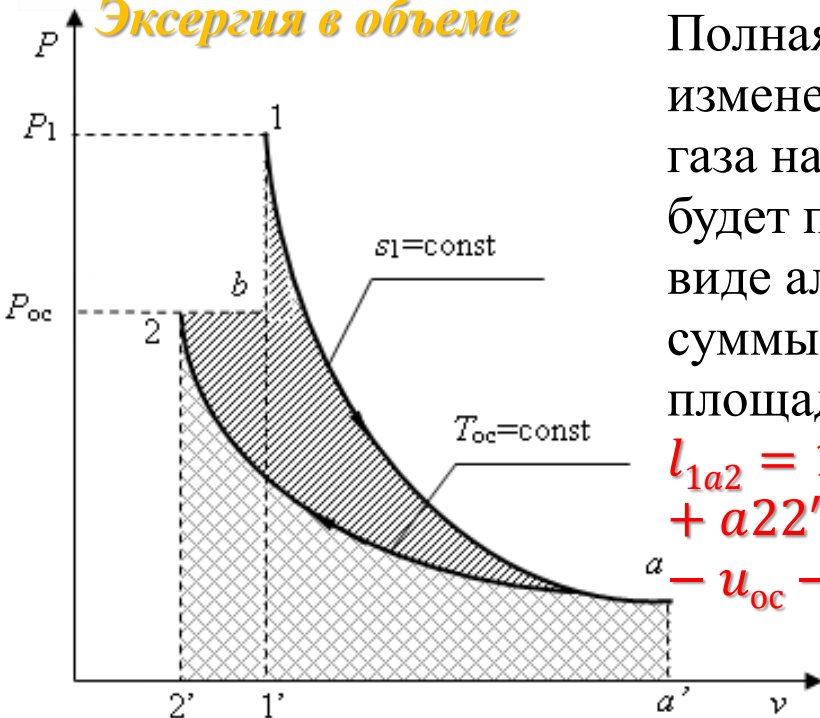
Т.е. площадь
 $1aa'1'1 = l_{1a} = u_1 - u_{oc}$.

Площадь под
изотермой $a2$ равна
теплоте этого
процесса, т.е. пл.

$$a22'a'a = la_2 = \\ = q_{a2} = T_{oc}(s_{oc} - s_1).$$



Эксергия в объеме

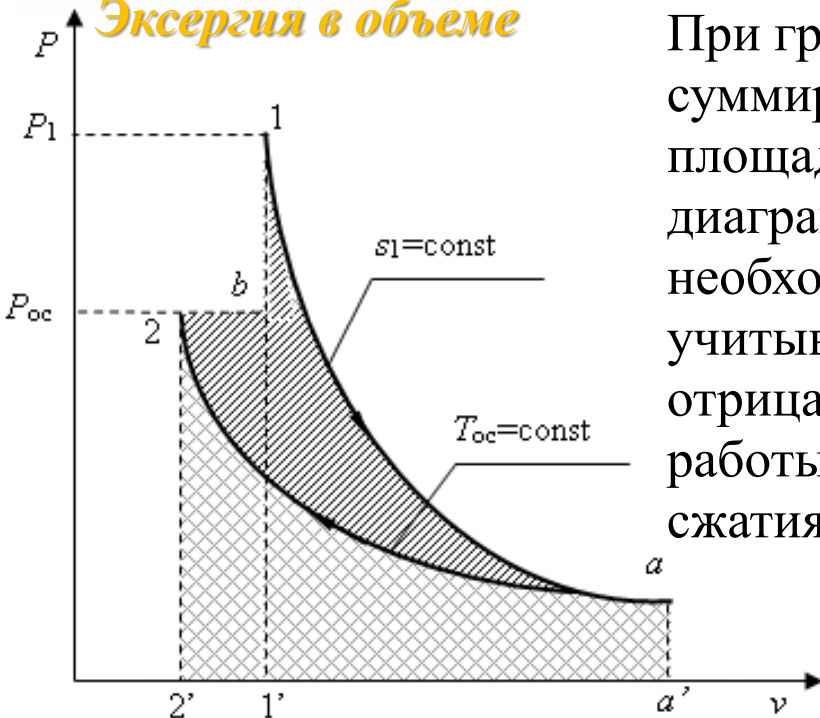


Полная работа
изменения объема
газа на процессе $1a2$
будет представлена в
виде алгебраической
суммы этих
площадей, т.е.

$$l_{1a2} = 1aa'1'1 + \\ + a22'a'a = u_1 - \\ - u_{oc} - T_{oc}(s_1 - s_{oc}).$$



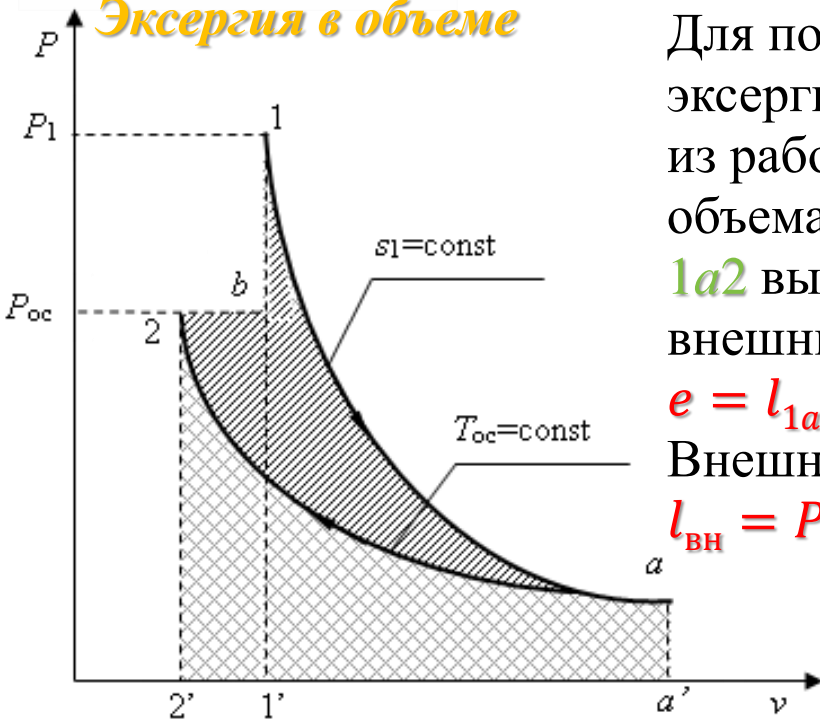
Эксергия в объеме



При графическом суммировании этих площадей в диаграмме P, v необходимо учитывать отрицательный знак работы в процессе сжатия газа $a2$.



Эксергия в объеме



Для получения
эксергии необходимо
из работы изменения
объема газа процесса

$1a2$ вычесть

внешнюю работу

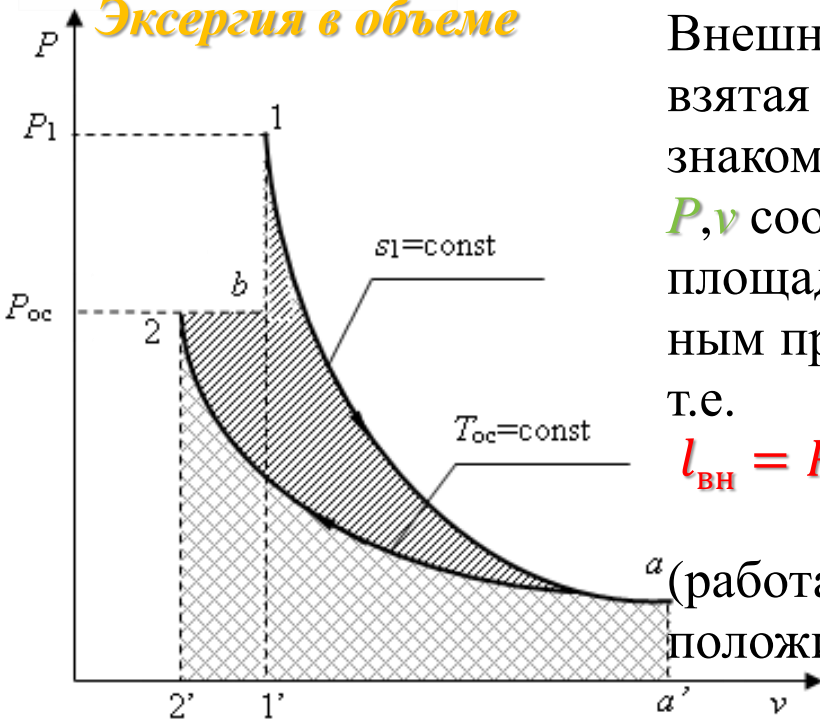
$$e = l_{1a2} - l_{\text{вн}}.$$

Внешняя работа газа

$$l_{\text{вн}} = P_{0c}(v_{0c} - v_1).$$



Эксергия в объеме



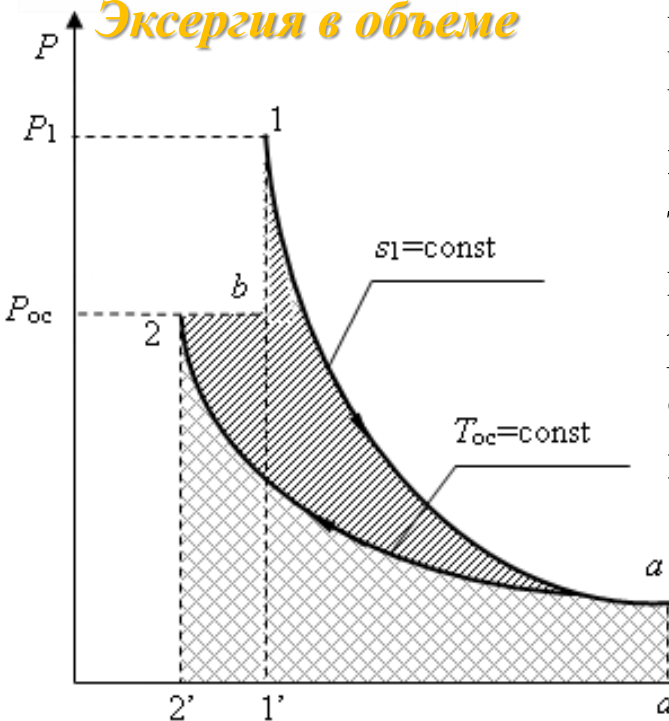
Внешняя работа,
взятая с обратным
знаком, в диаграмме
 P, v соответствует
площади под изобар-
ным процессом $2b$,
т.е.

$$l_{вн} = P_{oc}(v_1 - v_{oc}) = \\ = 2b1'2'2$$

α (работа процесса $2b$
положительная).



Эксергия в объеме

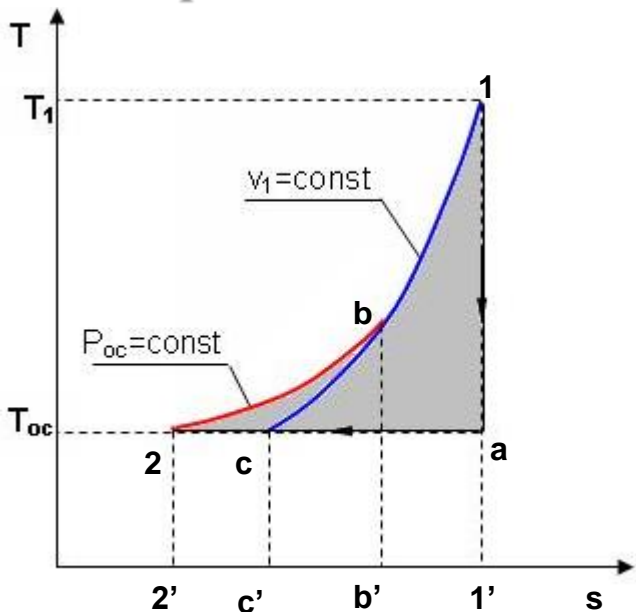


В итоге получили, что эксергии газа, имеющего параметры точки 1, в P, v - диаграмме соответствует работа изменения объема процесса $1a2b$ и площадь под ним:

$$\begin{aligned} 1a2b1 &= e = \\ &= (u_1 - u_{oc}) \\ &\quad - T_{oc}(s_1 - \\ &\quad - s_{oc}) + P_{oc}(v_1 - v_{oc}). \end{aligned}$$



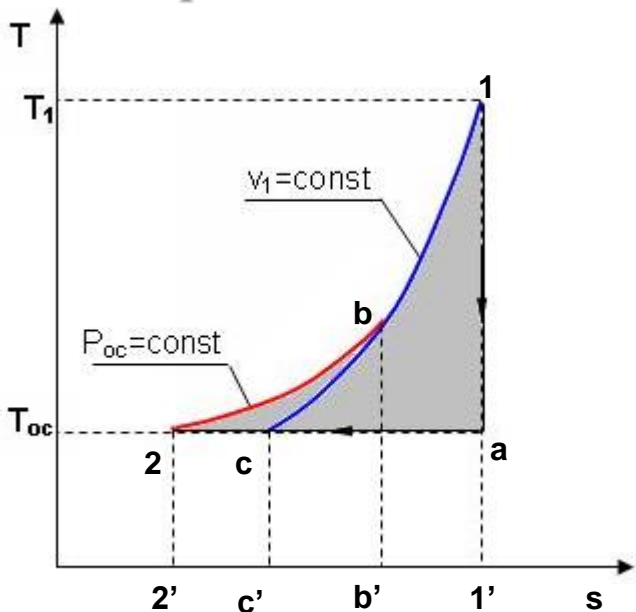
Эксергия в объеме



В диаграмме T,s эксергию идеального газа, имеющего параметры точки **1**, можно показать в виде площади, перенеся процесс $1a2b$ из P,v -диаграммы в диаграмму T,s



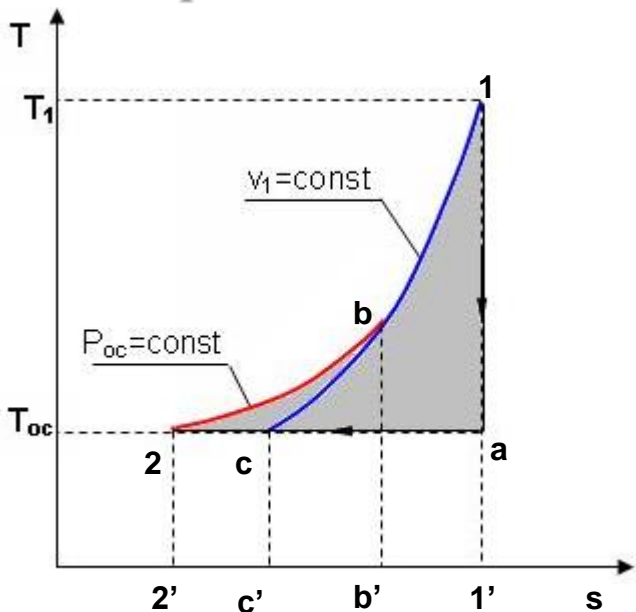
Эксергия в объеме



В диаграмме T,s эксергию идеального газа, имеющего параметры точки **1**, можно показать в виде площади, перенеся процесс $1a2b$ из P,v -диаграммы в диаграмму T,s



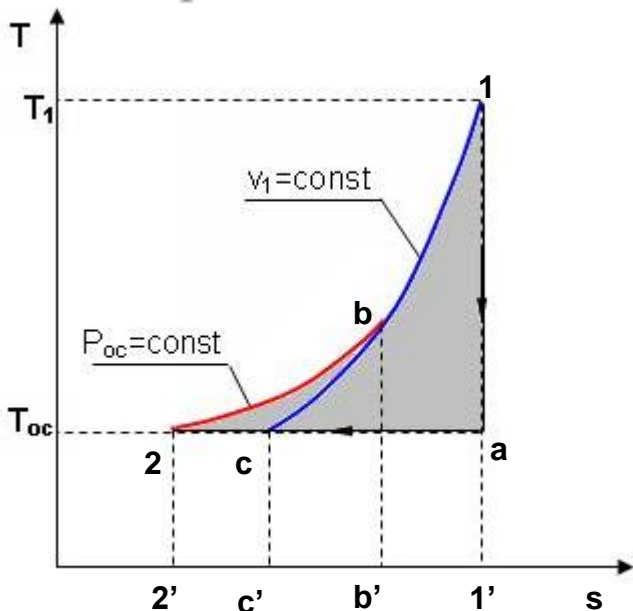
Эксергия в объеме



Площадь под изохойрой $v_1 = \text{const}$ процесса $c1$ соответствует изменению внутренней энергии идеального газа в интервале температур от T_1 до T_{oc} , т.е. пл. $11'd'd1 = u_1 - u_{oc}$.



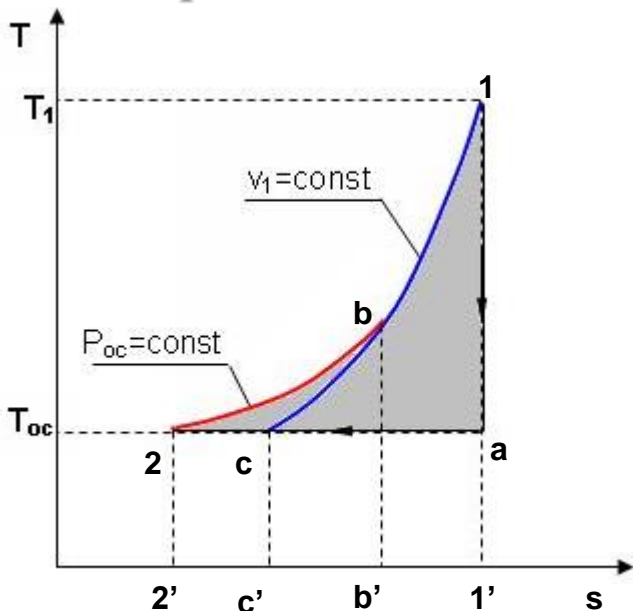
Эксергия в объеме



Площадь под изотермой $T_{oc} = \text{const}$ процесса $a2$ соответствует его теплоте, т.е. пл. $a1'2'2a = q_{a2} = T_{oc}(s_{oc} - s_1)$.
Площадь фигуры $2cbb'2'$ соответствует работе изменения объема изобарного процесса $2c$, т.е. пл. $2cbb'2' = l_{2d} = P_{oc}(v_1 - v_{oc})$.



Эксергия в объеме

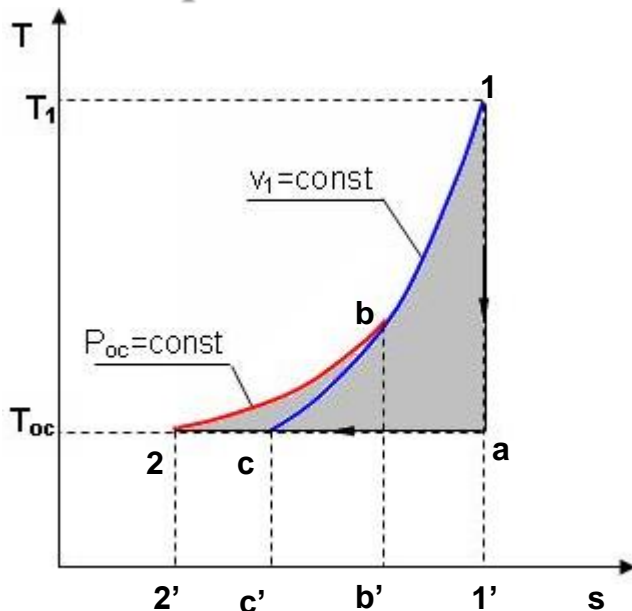


В результате алгебраического сложения площадей под процессом $d1a2b$ в Ts -диаграмме получили площадь фигуры $1a2b1$, которая соответствует величине эксергии, т.е. пл.

$$1a2b1 = e = (u_1 - u_{oc}) - T_{oc}(s_1 - s_{oc}) + P_{oc}(v_1 - v_{oc}).$$



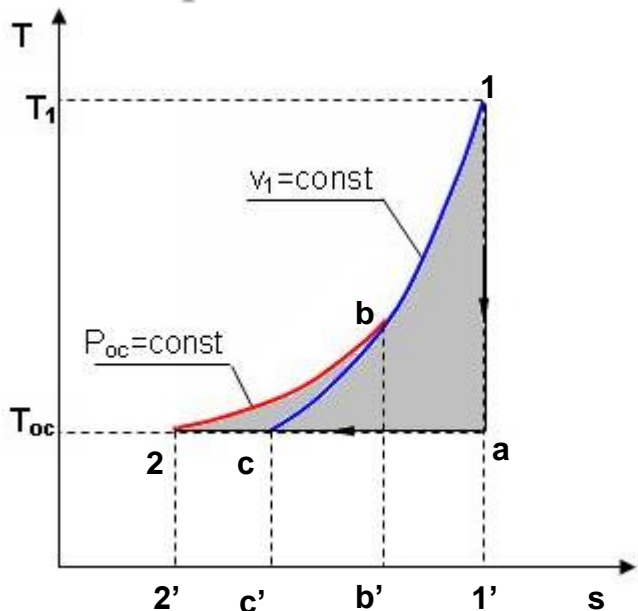
Эксергия в объеме



Показать эксергию в объеме для газа в виде площади в диаграммах P, v и T, s можно, используя и другие обратимые процессы перехода газа из неравновесного состояния в состояние равновесия с окружающей средой.



Эксергия в объеме



Обязательным
условием такого
перехода является
обратимость всех
процессов.



Практическое значение эксергии

Ранее была рассмотрена эксергия газового тела при переходе его в состояние равновесия с окружающей средой по обратимым процессам. В этом случае газ сам выступает в роли рабочего тела. В теплоэнергетике большое значение имеет использование термической неравновесности источника работы (горячее тело) и внешней среды (холодное тело) посредством рабочего тела, совершающего замкнутый процесс изменения состояния — цикл.



Практическое значение эксергии

В этом случае источник работы может иметь любые физические свойства. В теплоэнергетических установках это, как правило, газообразные продукты сгорания топлива, тепловыделяющие элементы или первичный теплоноситель (жидкий или газообразный) атомного реактора. В таких установках рабочее тело совершает цикл, источник работы служит теплоотдатчиком, а внешняя среда – теплоприемником.



Практическое значение эксергии

В теплоэнергетике термодинамический анализ термической неравновесности источника работы и внешней среды с использованием понятия эксергии может быть практически использован в следующих направлениях:

1) для определения максимально полезной работы – эксергии, которая может быть получена в системе при использовании определенного количества первичного теплоносителя (источника работы);



Практическое значение эксергии

2) для определения влияния необратимости на полезную работу;

3) для выбора рациональных циклов теплоэнергетических установок.

Последовательно рассмотрим эти направления применительно к наиболее характерным случаям.



Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность

Первоначально рассмотрим источник работы с постоянной температурой (бесконечной теплоемкостью), имеющей большее значение, чем температура внешней среды. Примером такого источника работы являются тепловыделяющие элементы в кипящем ядерном реакторе, вырабатывающем насыщенный водяной пар при постоянном давлении.

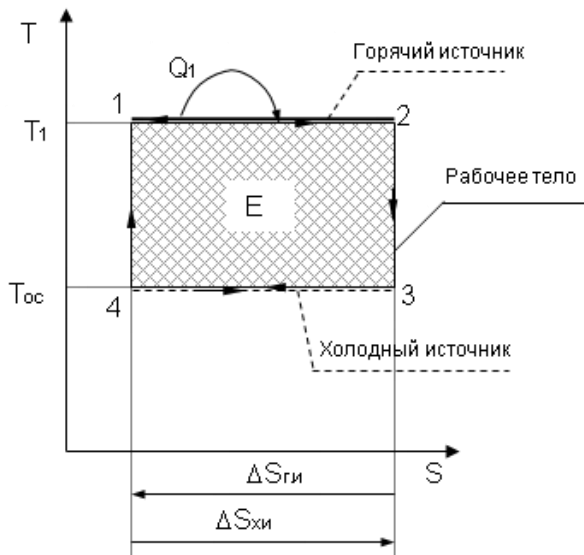


Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность

Для определения эксергии этого источника работы (теплоты) необходимо рассмотреть термодинамическую систему, которая должна включать в себя: горячий источник теплоты с постоянной температурой T_1 (источник работы), внешнюю среду с постоянной температурой T_{oc} (холодный источник теплоты) и рабочее тело (рис. на следующем экране).



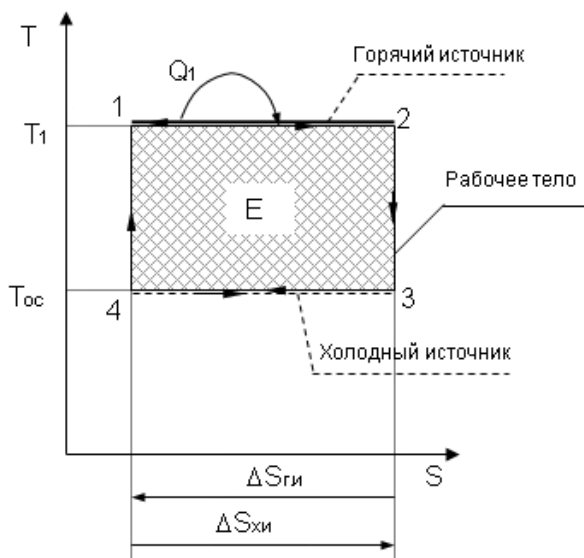
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



В рассматриваемой системе максимально полезная работа, или эксергия, может быть получена только при неизменной энтропии системы ($\Delta S_c = 0$), т.е. при прохождении в ней только обратимых процессов.



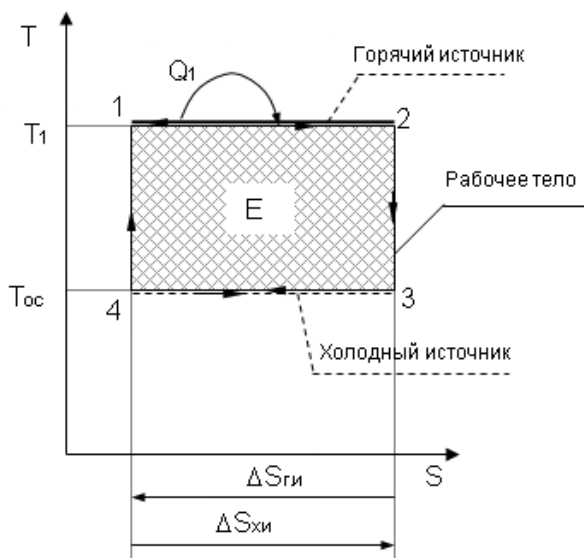
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Выполнение этого условия возможно только при осуществлении в нашей системе обратимого цикла Карно (рисунок) в интервале температур от T_1 до T_{oc} .



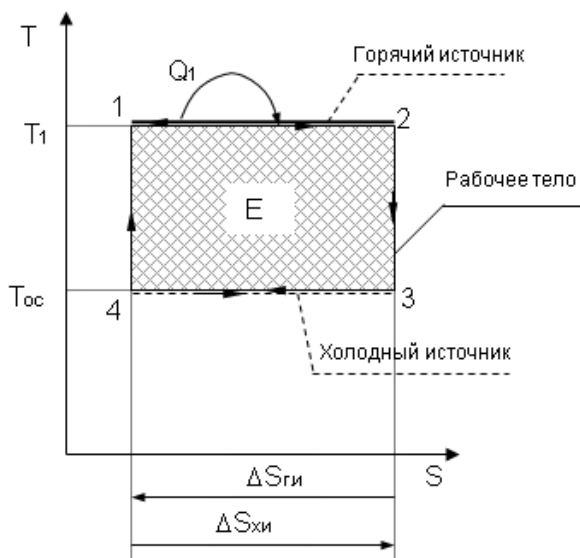
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Только в этом случае в нашей системе не будет протекать никаких необратимых процессов, не будет возрастания энтропии системы и не будет потерь возможной работы.



Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Следовательно,
максимально полезная
работа – эксергия,
получаемая в этом
случае, будет
соответствовать работе
обратимого цикла
Карно 1234:



Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность

$$E = Q_1 \frac{T_1 - T_{oc}}{T_1} = \text{пл. } 12341. \quad (7.8)$$

Множитель $(T_1 - T_{oc})/T_1$ в выражении 7.8 представляет термический КПД данного цикла Карно, он называется *эксергетической температурой*. Всегда целесообразно иметь большее значение эксергетической температуры, поскольку в этом случае эксергия источника работы также будет иметь большее значение.

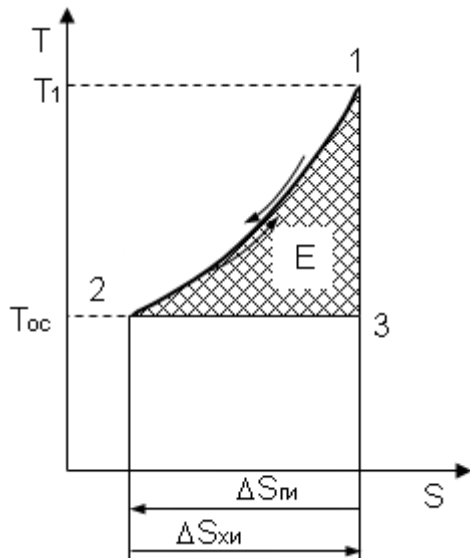


Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность

В случае если источник работы имеет конечную теплоемкость и температуру выше, чем температура окружающей среды, и находится в механическом равновесии с внешней средой ($P = P_{oc}$), он может перейти в состояние термического равновесия с внешней средой при его охлаждении по изобаре $P = const$.



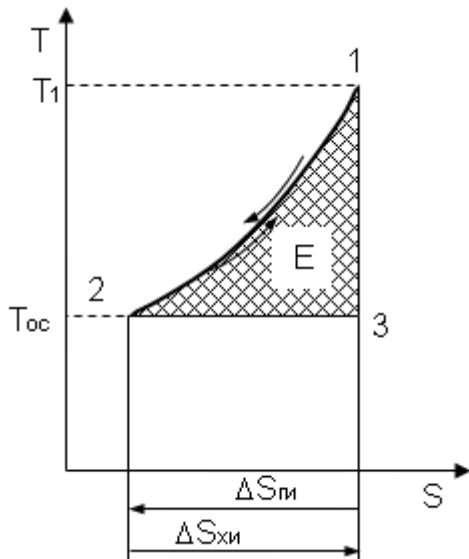
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



На практике существует множество источников работы такого типа: продукты сгорания органического топлива, горячие газы, пары, жидкости и т.п.



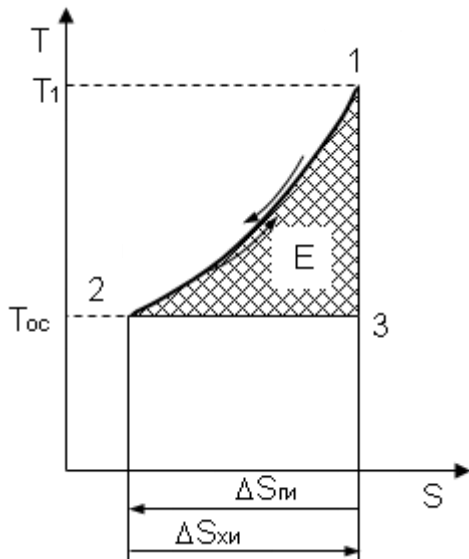
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Рассмотрим определение эксергии таких источников работы на примере продуктов сгорания топлива, охлаждающихся от температуры T_1 до температуры окружающей среды T_{oc} при постоянном атмосферном давлении $P_{oc} = \text{const}$.



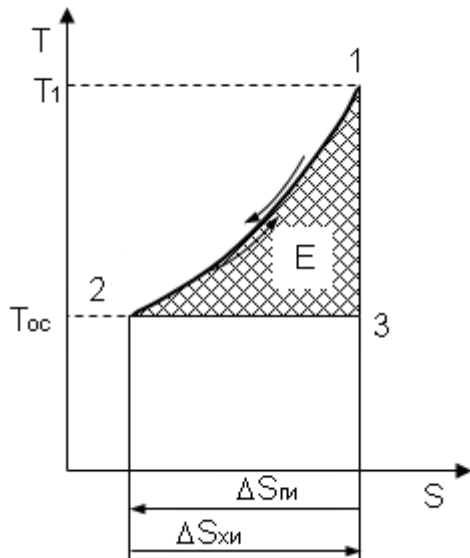
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Для получения работы в этом случае, как и в первом, необходимо, чтобы кроме источника работы система включала внешнюю среду с постоянной температурой T_{oc} и рабочее тело.



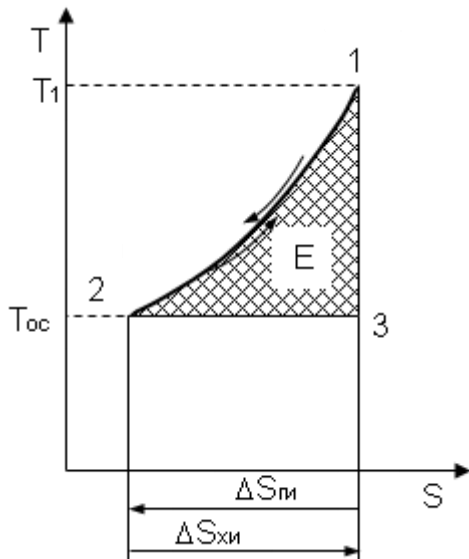
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Получение максимально полезной работы в этой системе также возможно только при протекании в ней обратимых процессов, т.е. при отсутствии увеличения энтропии системы ($\Delta S_c = 0$).



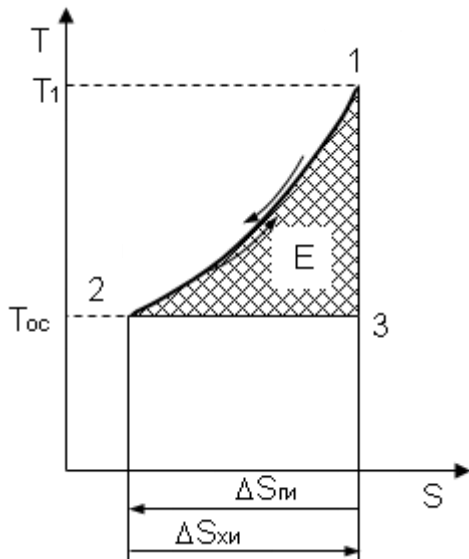
Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Для этого рабочее тело должно совершать цикл **1231**, поскольку только в этом случае изменение энтропии продуктов сгорания (процесс **12**) будет равно изменению энтропии внешней среды (процесс **23**) с обратным знаком.



Определение эксергии источников работы, имеющих термическую неравновесность



Максимальная полезная работа, или эксергия, источника работы в этом случае будет равна площади **1231**. Любой другой цикл рабочего тела не будет полностью обратимым и даст меньшую работу.



Определение влияния необратимости на полезную работу в изолированной системе

Как было установлено ранее, любая необратимость связана с возрастанием энтропии изолированной системы. Рассмотрим, как различные виды необратимости влияют на возможность получения полезной работы в изолированной системе.



Определение влияния необратимости на полезную работу в изолированной системе

Необратимый теплообмен

Необратимый теплообмен обусловлен наличием разности температур между телами. Рассмотрим в T,S - диаграмме сначала случай необратимого теплообмена между двумя телами с постоянными температурами T_1 и T_2 .