Тема 4.

Эксергетические диаграммы.
Влияние параметров окр. ср. на эксергию

Окружающая среда

Пар-ры ОС

P_0, T_0, φ_0

Хим. состав

1. Хар-ся тем, что ее параметры не зависят от параметров рассматриваемой системы

2. Все компоненты окр. Ср. д. находиться в полном т/д равновесии

До тех пор, пока все параметры системы и ее частей не сравнялись с соответствующими пар-ми ОС, равновесие не будет достигнуто и система во взаимодействии со средой м. произвести или отдать некоторую внешнюю работу, т.е. обладает некоторой эксергией

При полном равновесии системы и среды эксергия системы равна нулю

Идеальный процесс – работа равна эксергии (убыли эксергии)

Взаимодействие системы с ОС:

- ОБРАТИМОЕ (идеальный процесс);
- НЕОБРАТИМОЕ (реальный процесс)

Реальный процесс – работа меньше убыли эксергии.
Часть эксергии не превращается в работу, а исчезает (!!!) – рассеивается

I закон ТД : Энергия не исчезает, а превращается из одной формы в другую

I. Эксергия вещества в замкнутом объеме e_v

u, s, v, p, T - Параметры закрытой системы

u_0, s_0, v_0, p_0, T_0 - параметры окр. ср

В термомеханических системах обмен веществом ч/з границы исключен, а энергетический обмен проходит в двух формах –

1) термическое взаимодействие (q);

2) деформационное взаимодействие (работа l)

Получение макс работы(эксергии)

$$u, s, v, p, T \rightarrow u_0, s_0, v_0, p_0, T_0$$

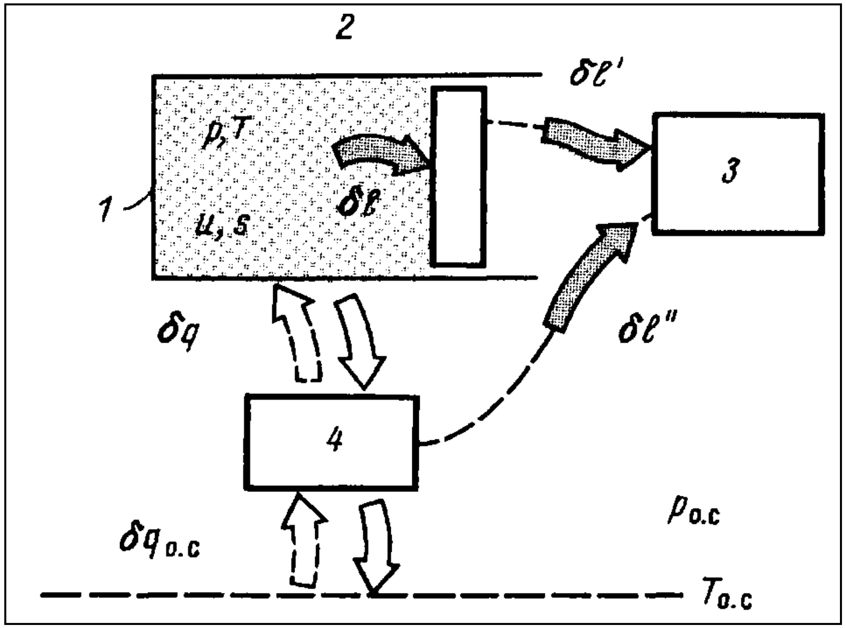
Задача определения эксергии сводится к определению максимальной работы, которая м. произвести система при переходе ее от заданного внутренне-равновесного состояния к нулевому.

1. *Термическое взаимодействие*.
Обратимый перенос энтропии от ед. массы вещества на уровень окр ср (или в обратном направлении) - **работа**

$$-\delta l'' = \frac{T - T_0}{T} \cdot \delta q \qquad (*)$$

Обмен веществом через границы исключен. Энергетическое взаимодействие системы и о.ср. происходит в 2-х формах – теплоты q (термическое взаимодействие) и работы l (мех.)

Обратимый процесс



2. *Изменении объема системы v.*
Работа δl производится непосредственно.

$$\delta l = \delta l' + \delta l'''$$

Полезная работа

Потеря работы (затрачивается на преодоление сопротивления окр ср с давлением p_0

$$\delta l''' = p_0 \cdot d\upsilon$$

1 – система,
2- окр ср,
3 – приемник работы,
4 – вспомогательная система, преобразующая тепловой поток в работу

$$\delta l' = \delta l - p_o \cdot d\upsilon$$

Общая величина работы, отдаваемой ед. массы системы внешнему объекту

$$-de_v = -\left(\delta l' + \delta l''\right) = \frac{T - T_0}{T} \cdot \delta q + \delta l - p_0 \cdot dv$$

$\delta q = du - \delta l$

I з-н ТД

$\delta q / T = \delta S$

II з-н ТД

$$de_v = du - T_0 \cdot dS + p_0 \cdot dv$$

Ексергия вещества
для процесса, завершающегося выравниванием
соответствующих параметров системы и окр ср

$$e_v = (u - u_0) - T_0 \cdot (S - S_0) + p_0 \cdot (v - v_0)$$

Обозначим

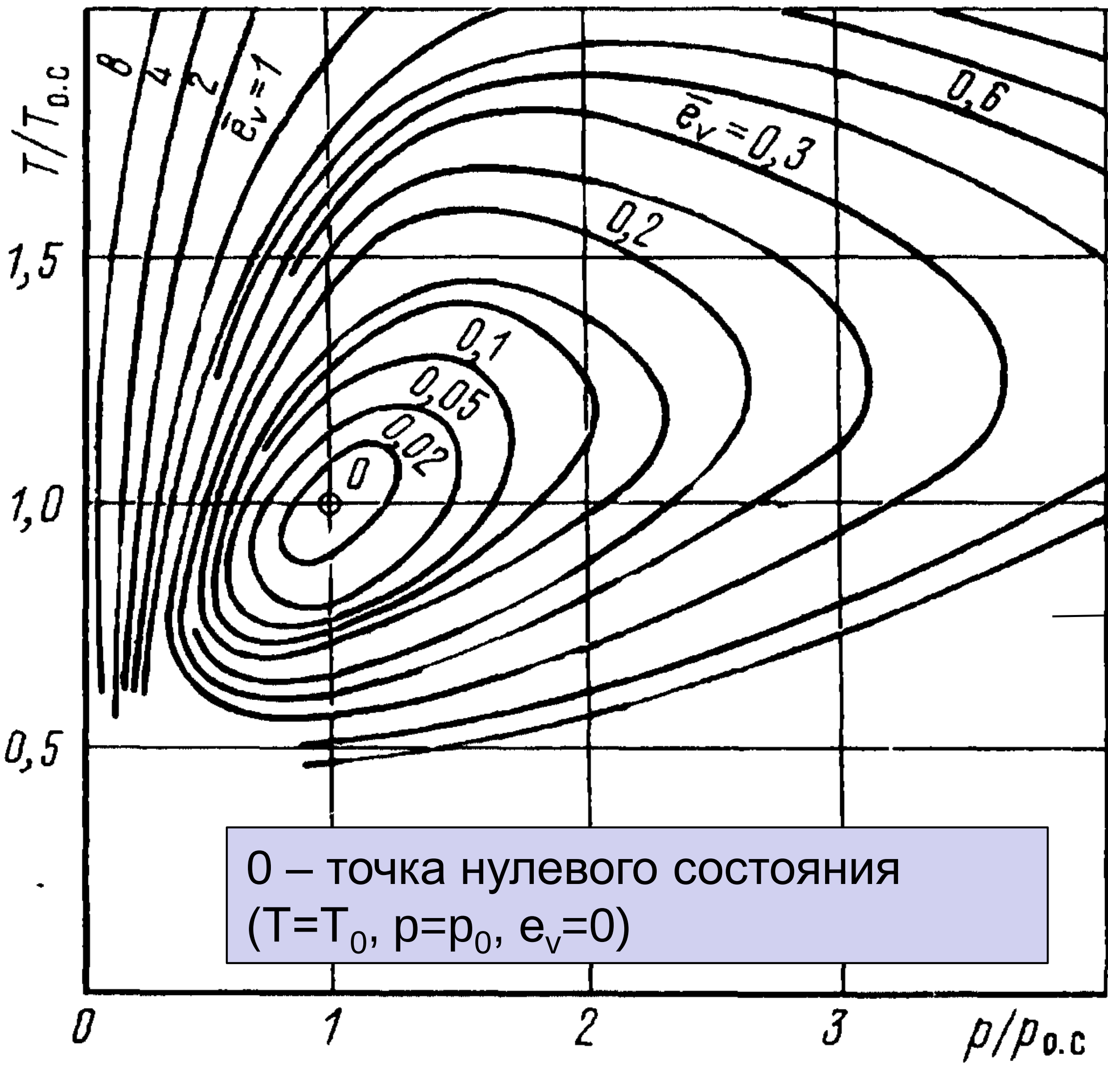
$$c = u_0 - T_0 \cdot S_0 + p_0 \cdot v_0$$

$$e_v = u - T_0 \cdot S + p_0 \cdot v + c$$

Изменение эксергии при переходе из одного состояния в другое (**$\Delta c = 0$**)

$$\Delta e_v = \Delta u - T_0 \cdot \Delta S + p_0 \cdot \Delta v$$

4.1. Эксергетическая диаграмма $e_v=f(p, T)$



0 – точка нулевого состояния
($T=T_0$, $p=p_0$, $e_v=0$)

Линии e_v =const (идеальный газ, k=1,4)

$$e_v = u - T_0 \cdot S + p_0 \cdot v + c$$

$$\bar{e}_v = \frac{e_v}{R \cdot T_0}$$

Для произвольного газа

$$\bar{e}_v = (0 \div \infty)$$

!!!! В процессе выравнивания пар-ров раб тела и среды внешний объект всегда будет получать работу от рассматриваемой системы

1. Тепловой поток между системой и средой всегда м.б. использован для получения работы, независимо от его направления

$$-\delta l'' = \frac{T - T_0}{T} \cdot \delta q$$

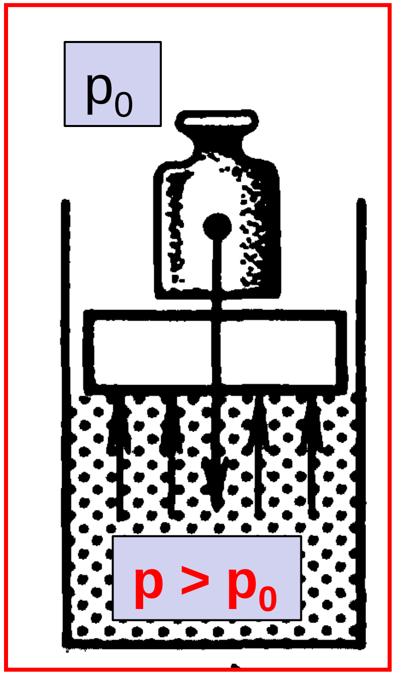
Знак при δl не меняется при изменении направления переноса теплоты

$$T > T_0 \Rightarrow \delta q > 0$$

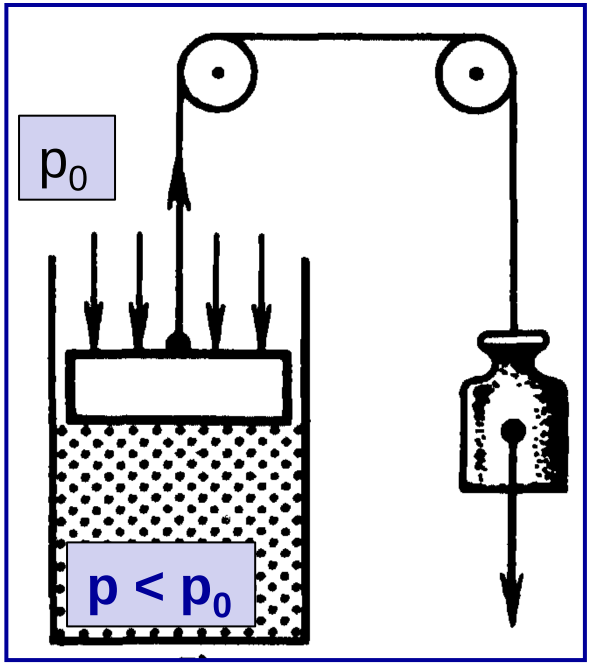
$$T < T_0 \Rightarrow \delta q < 0$$

2. Разница давлений p и p_0 всегда м.б. использована для производства работы независимо от (**$p > p_0$**) или (**$p < p_0$**)

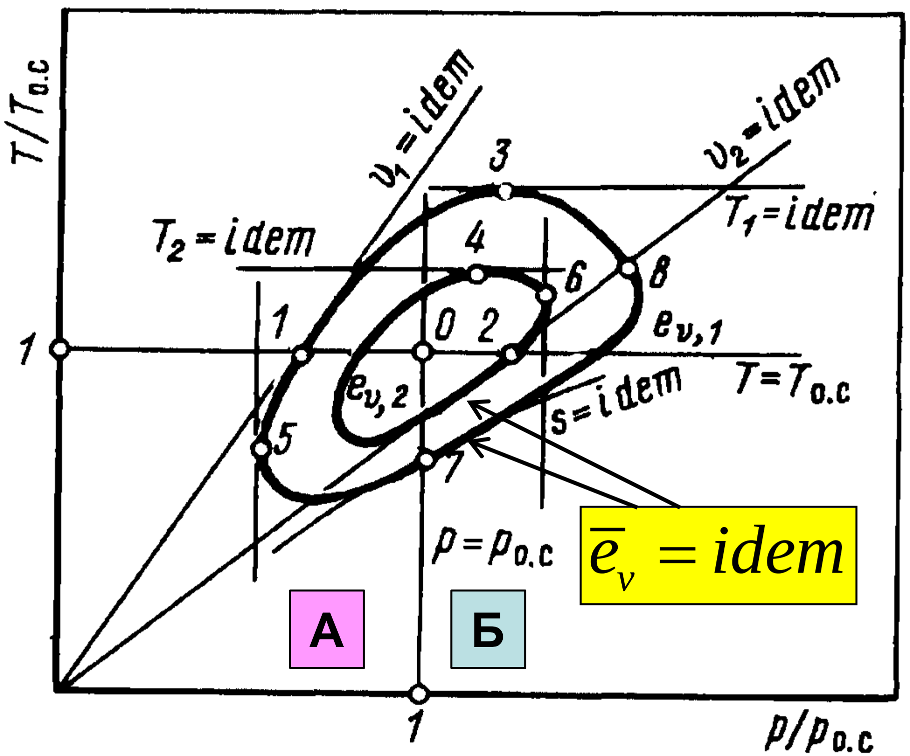
Объем системы ↑ и она совершает работу против давления среды (поднимать груз)



Работает окр ср, преодолевая сопротивление системы (уменьшая ее обем) и поднимая груз



Свойства диаграммы e_v=*f(p,T)*



1. e_v=*idem* – замкнутые кривые.

T=const

Имеются два значения *p*, для которых **е** равны

P=const

Имеются два значения *T*, для которых **е** равны

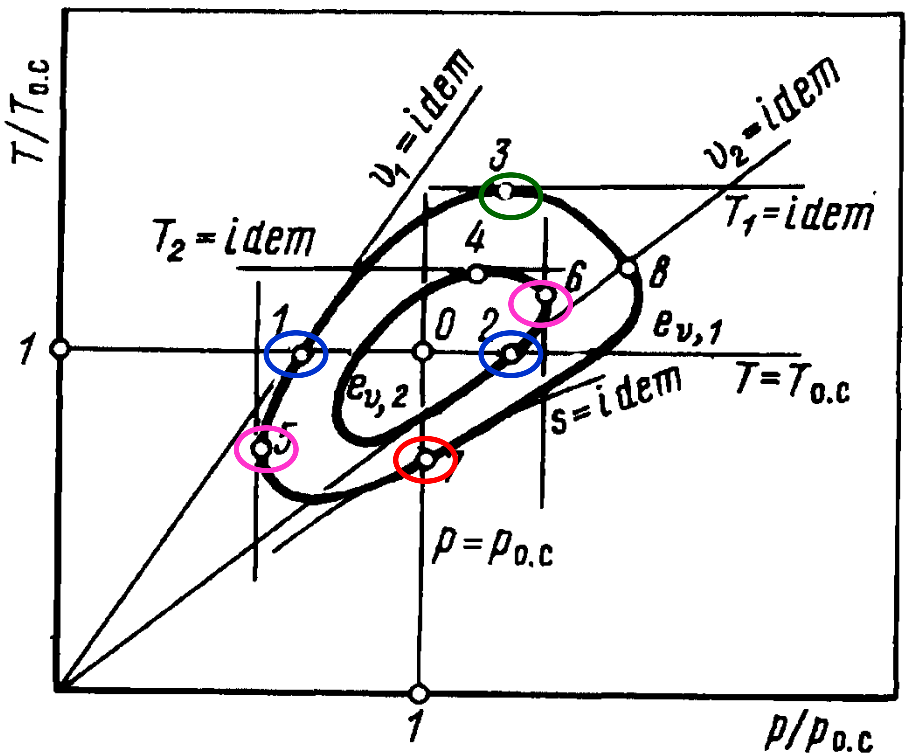
Исключение – для точек, где линии **e_v =idem** – касательны к изобаре (изотерме)

2. **Изменение эксергии при разных р** зависит от зоны изменения р

А. В зоне (**р < p_0**) линии **e_v =idem** располагаются более плотно.
Это объясняется тем, что при **р < p_0** работа изменения объема системы быстро растет (т.к. быстро меняется **р/ p_0**), стремясь к ∞ при р →0.

Б. В зоне (**р > p_0**) линии **e_v =idem** располагаются реже.
Повышение эксергии от 0 до ∞ требует изменения давления также в очень большом интервале – от **p_0** до ∞.

Свойства диаграммы эксергии e_v



3. Расчет максимальной работы при наличии ограничений на процесс

При отсутствии ограничений система всегда стремится к нулевому состоянию (равновесию с окр ср).

При наличии ограничений система не может достигнуть нулевого состояния, тогда диаграмма дает возможность найти параметры, при которых **e →min** для заданных конечных условий.

3.1. ***v=idem (dv=0)***

Точки касания прямых *v=const* с линиями **e_v =const** при $T=T_0$ соответствуют **e →min** при заданном объеме - точки **1** и **2**.

3.2. ***S=idem***

Точки касания прямых *S=idem* с линиями **e_v =const** при $p=p_0$ соответствуют **e →min** при данной S –точка **7.**

3.3. ***T=idem*** **e →min** соответствует т. **3**.

3.4. ***p=idem*** **e →min** соответствует т. **5, 6.**

4.2. Графическое представление эксергии потока ex (в h,S- диаграмме)

$$\boxed{ex = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)}$$

Эксергия вещества в потоке EX

4.2.1. Прямая окружающей среды

$$ex = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$ (**)

1. При фиксированных параметрах окр. ср. эксергия является функцией состояния рабочего тела.

2. Для эксергии существует начало отсчета - ее нулевое значение, определяемое параметрами окр. ср.

Представим функцию ***ex=f(h,S***) как поверхность в пространстве (h, S, e).

Уравнение (**) описывает параллельные плоскости, которые пересекают плоскость (h, S) при разных значениях ex.

$$\mathrm{h} - \mathrm{h}_0 - \mathrm{T}_0 \cdot (\mathrm{S} - \mathrm{S}_0) - \mathrm{ex} = 0$$

Одна из таких плоскостей (e=0) пересекает (h, S) по прямой , проходящей через точку нулевого состояния с координатами (h_0, S_0) и угловым коэффициентом T_0.

Прямая окружающей среды **(названа** Ф. Бошняковичем **)**

$$h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0) - ex = 0$$

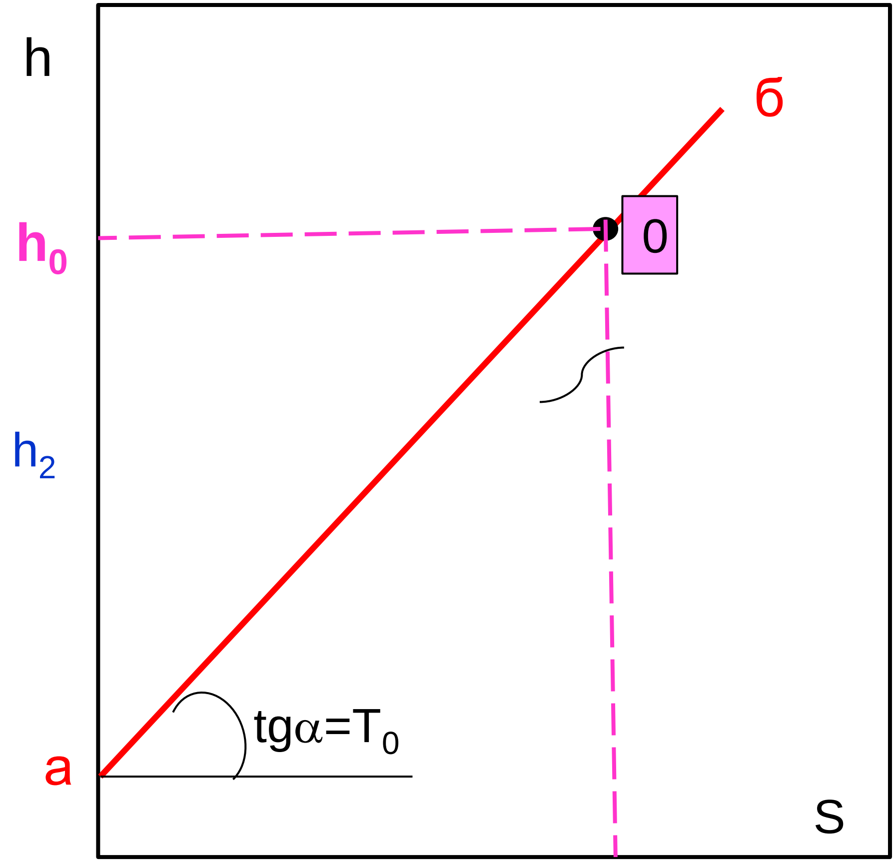
=0

$$h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0) = 0$$

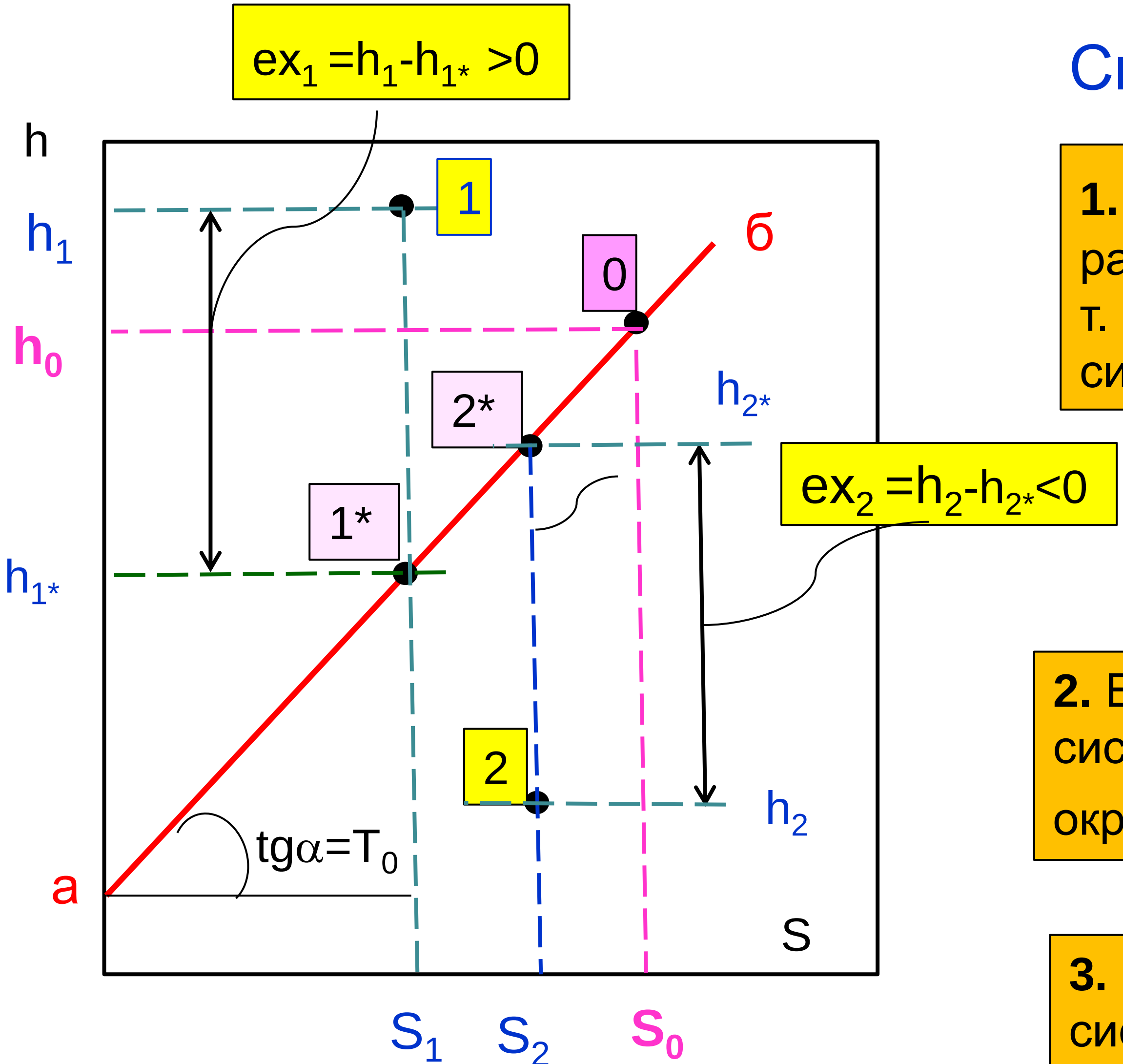
$$h = h_0 + T_0 \cdot S - T_0 \cdot S_0$$

$$h = T_0 \cdot S + (h_0 - T_0 \cdot S_0)$$

$y = k \cdot x + b$



4.2.2.Эксергетическая диаграмма ex=f(h, S)



т.1, т.2 – хар-ют состояние системы
(аб) – прямая окр. ср.

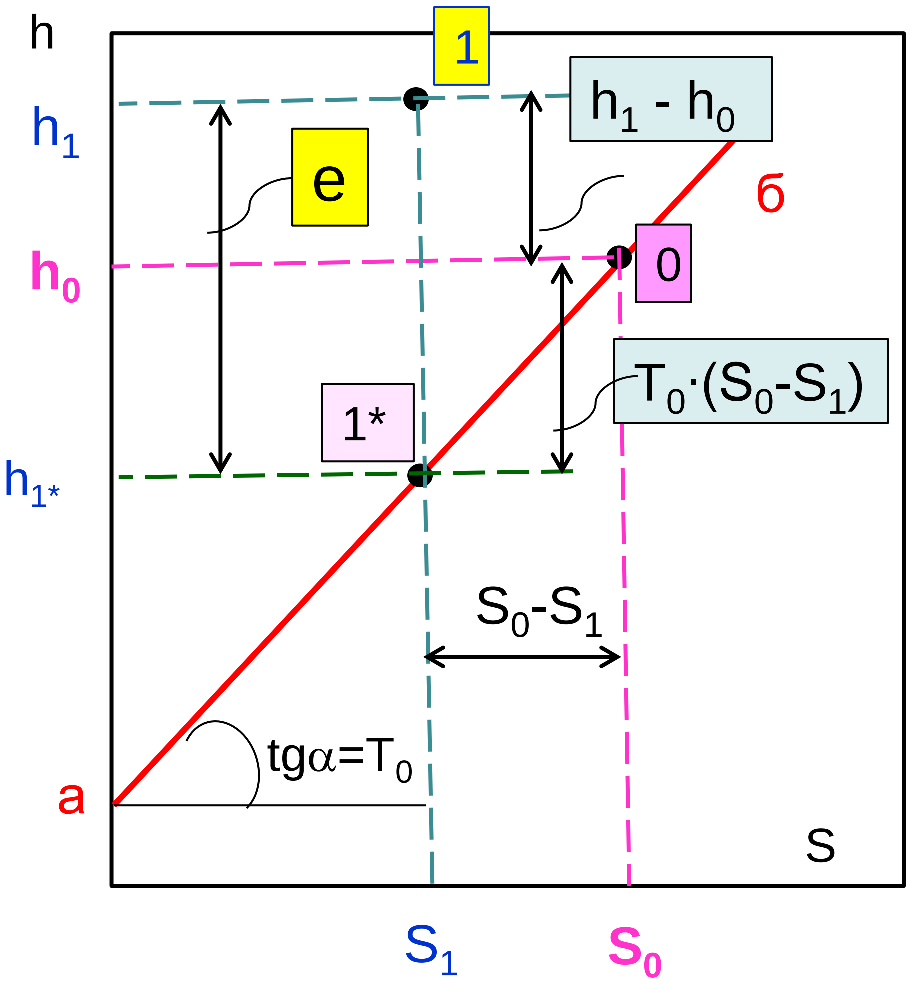
Свойства диаграммы

1. Эксергия ex равна расстоянию по ординате между т. , характ-щей состояние системы, и прямой окр. ср.

2. Если точка с параметрами системы лежит выше прямой окр ср, то ex>0

3. Если точка с параметрами системы лежит ниже прямой окр ср, то ex<0

Составляющие эксергии



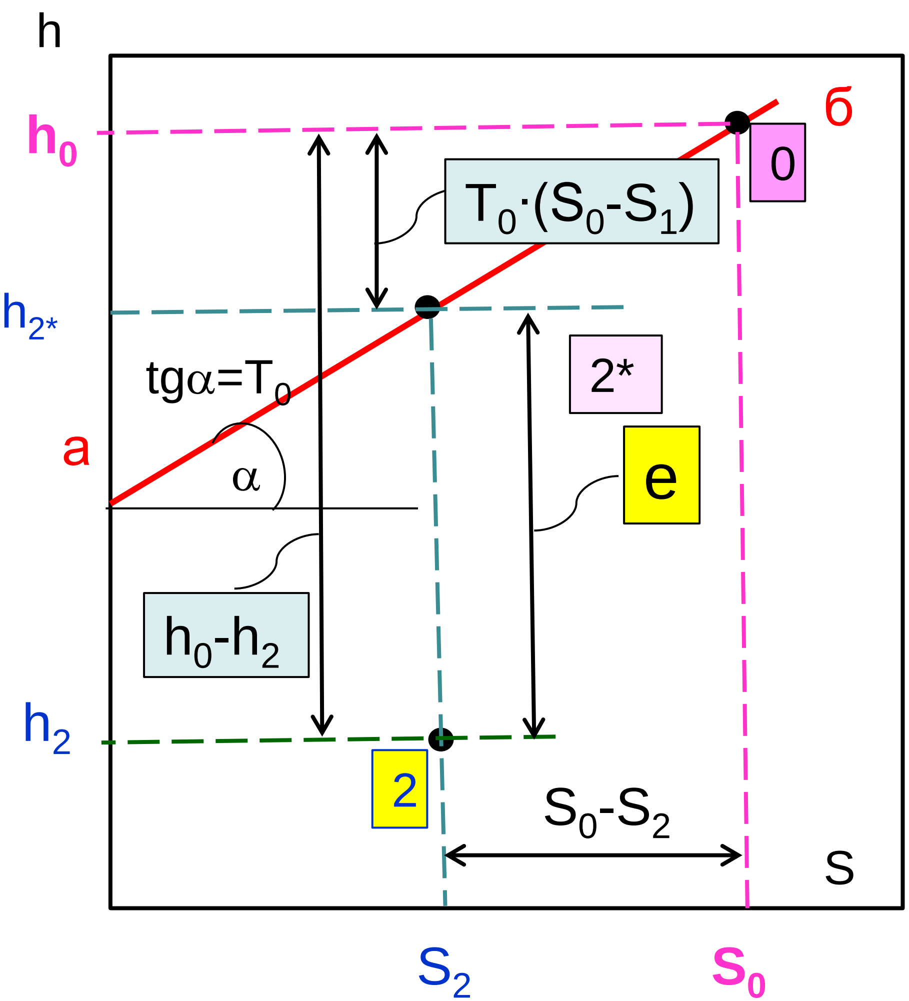
А. Точка с параметрами системы лежит выше прямой окр ср

$$e = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$e = (h_1 - h_0) + T_0 \cdot (S_0 - S_1)$$

Т.1 – состояние системы
(аб) – прямая окр ср

Составляющие эксергии



Б. Точка с параметрами системы лежит ниже прямой окр ср (e<0)

$$e = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$e = (h_2 - h_0) + T_0 \cdot (S_0 - S_2)$$

A<0

B >0 (<0)

Т.2 – состояние системы
(аб) – прямая окр ср

A < 0

| A |> | B |

e<0

4.3. Диаграмма ex=f(P,t)

Уравнение эксергии в диф. форме $$\boxed{dex = dh - T_0 \cdot dS} \quad (*)$$

1. Проинтегрируем (*) в интервале изменения состояния от некоторой точки до параметров окр. ср.

$$ex = c_p \cdot (T - T_0) - T_0 \cdot \left(c_p \cdot \ln\frac{T}{T_0} - R \cdot \ln\frac{p}{p_0} \right) \qquad (**)$$

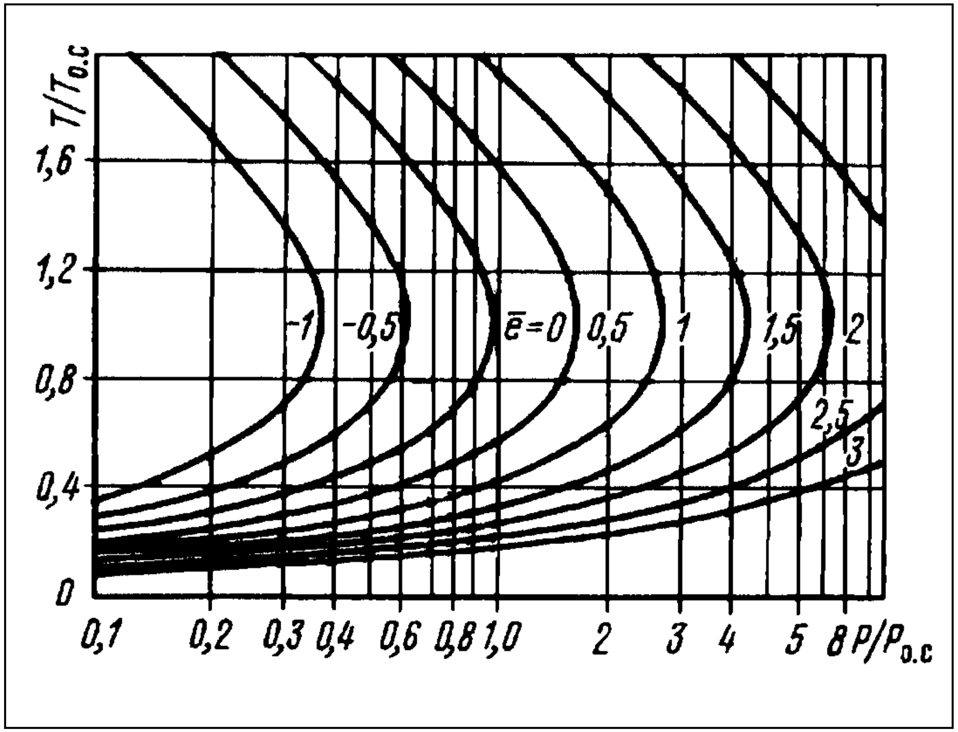
2. Поделим левую и правую части уравнения (**) на T_0

$$\frac{ex}{T_0} = c_p \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) - c_p \cdot \ln\frac{T}{T_0} + R \cdot \ln\frac{p}{p_0}$$

3. Заменим абсолютные значения на относительные

$$e\bar{x} = \frac{ex}{R \cdot T_0} \qquad \bar{T} = \frac{T}{T_0} \qquad \bar{P} = \frac{P}{P_0}$$

$$e\bar{x} = \ln \bar{p} + \frac{c_p}{R} \cdot (\bar{T} - 1) - \frac{c_p}{R} \cdot \ln \bar{T}$$



4.4. Разница в свойствах эксергии вещества в объеме и потока

Эксергия вещества в объеме e_v м. б. только *положительной*, а вещества в потоке **ех** – и *положительной , и отрицательной*.

Различие в свойствах связано с направлением переноса энергии посредством работы при выравнивании пар-ров вещества и окр. ср.

Положительный знак ех показывает, что энергия передается от вещества к окр. ср., отрицательный – от среды к веществу (внешний приемник энергии превращается в источник).

Функция e_v не отражает направление передачи энергии.

4.5. Влияние *T* и *p* окружающей среды на эксергию потока **ex**

$ex=f(p_0,T_0)$??

Рассмотрим ***h,S – диаграмму***, используя свойства ***прямой окружающей среды (ex=0)***

Из термодинамики

$$(\partial h/\partial S)_P=T$$

Тангенс угла между касательной к изобаре (p=idem) и осью абсцисс S равен абсолютной температуре в точке касания.

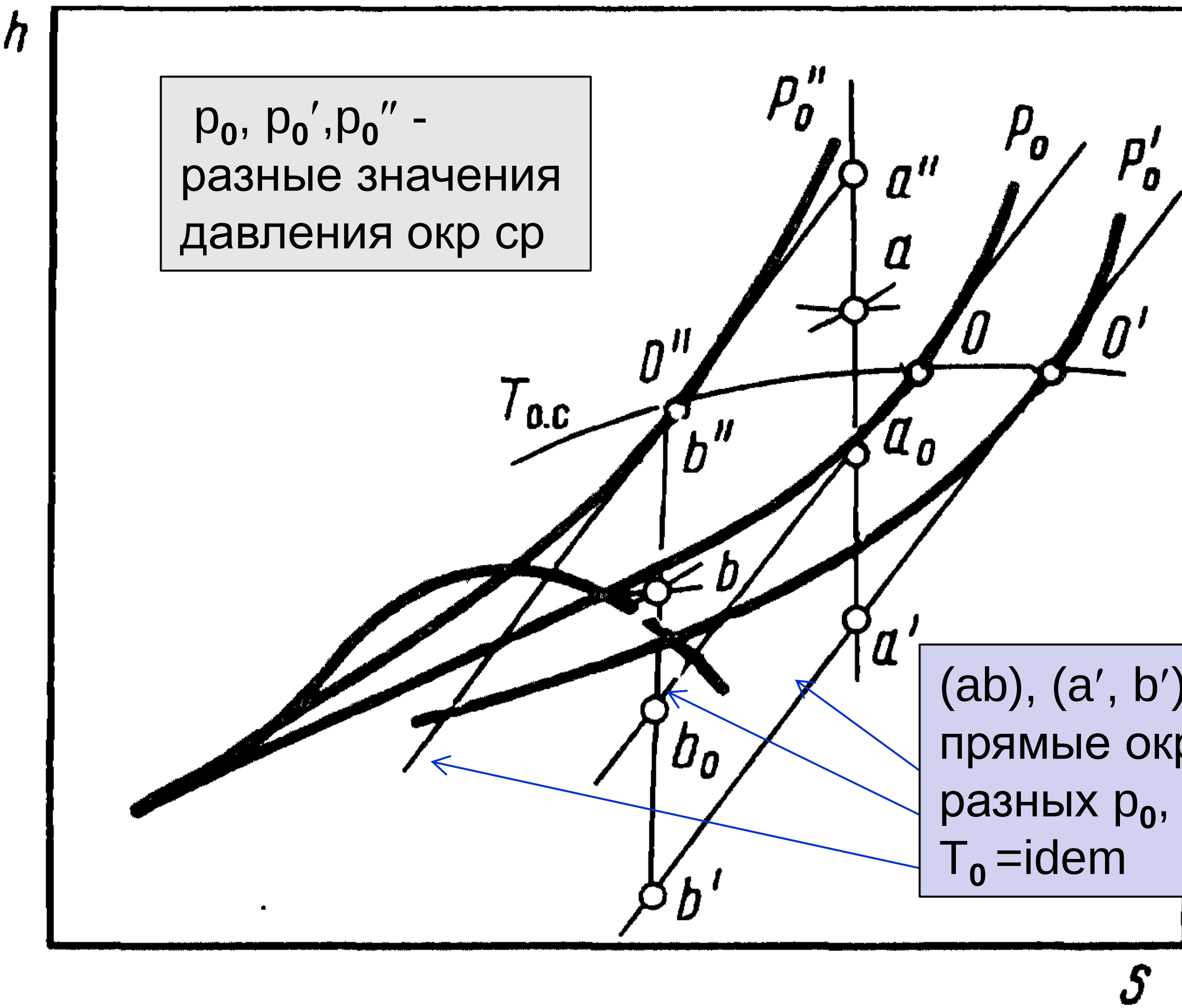
Прямая окр ср позволяет графически в координатах h,S определить эксергию е как расстояние по ординате от данной точки до прямой ex=0.

Угловой к-т прямой окр ср $tg\alpha=T_0$

Прямая окр ср **ex=0** касается изобары **p=idem** в точке пересечения с изотермой $\mathbf{T_0}$

Меняя положение прямой (ex=0) в зависимости от параметров p_0 , T_0 можно определить хар-р изменение ex от p_0 , T_0

T_0=idem *4.5.1. Влияние p_0 на эксергию*



p_0, p_0', p_0'' - разные значения давления окр ср

(ab), (a′, b′), (a″, b″)- прямые окр ср при разных p_0, p_0', p_0'' и T_0=idem

Каждая прямая e=0 проходит касательно к соответствующей изобаре в точке пересечения изобары с изотермой T_0=idem

При T_0=idem прямые e=0 при разных значениях p_0 расположены ***параллельно***, так как их угловые к-ты равны T_0

Прямая окр ср делит плоскость на две части
- Верхняя область → e>0;
- Нижняя область → e<0.

При исходном p_0

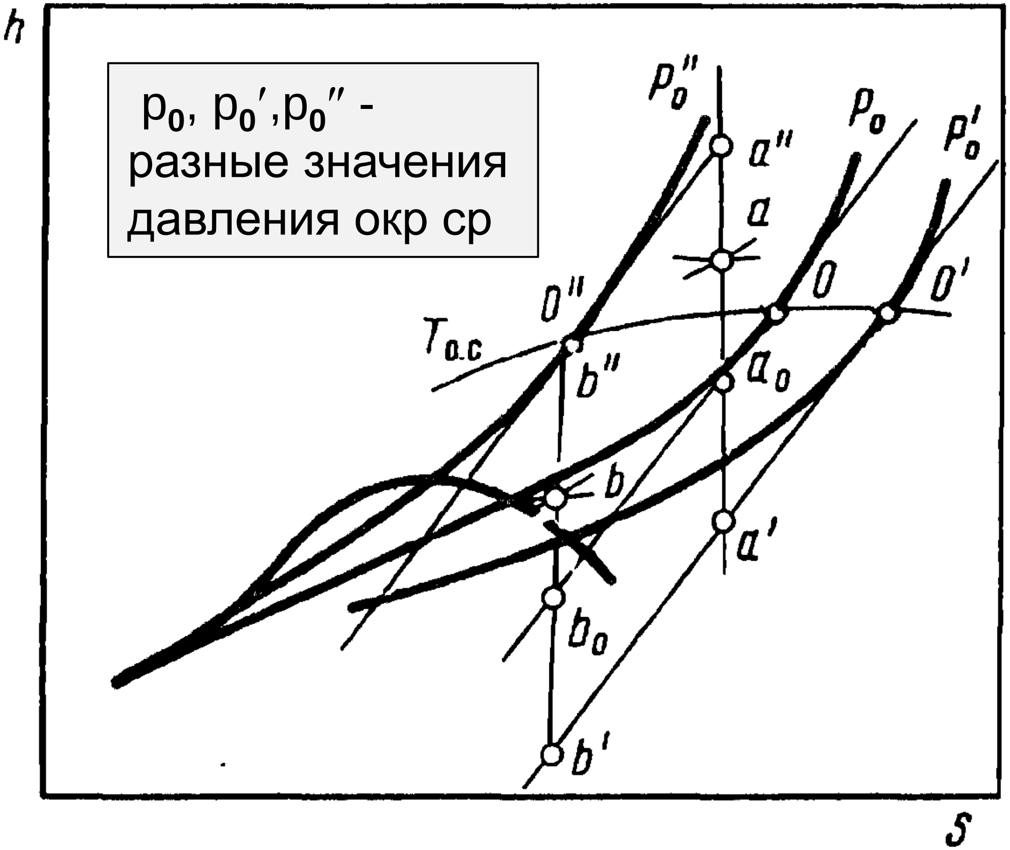
т. а → ex = (a – a_0)>0

т. б → ex = (б – $б_0$)>0

T_0 =idem

Влияние p_0 на эксергию

1. $p_0\downarrow$ (до p_0')



Прямая e=0 перемещается вниз , теперь она касательна к изобаре p_0' в точке 0′

1. Значения ex для точек а и б возрастут

т. а $\rightarrow$ ex=(a- a′)>(a –a_0)

т. б $\rightarrow$ ex=(б- б′)>(б –$б_0$)

2. $p_0\uparrow$ (до p_0'')

т. а $\rightarrow$ ex=(a- a ″)<0

т. б $\rightarrow$ ex=(б- б″)<0

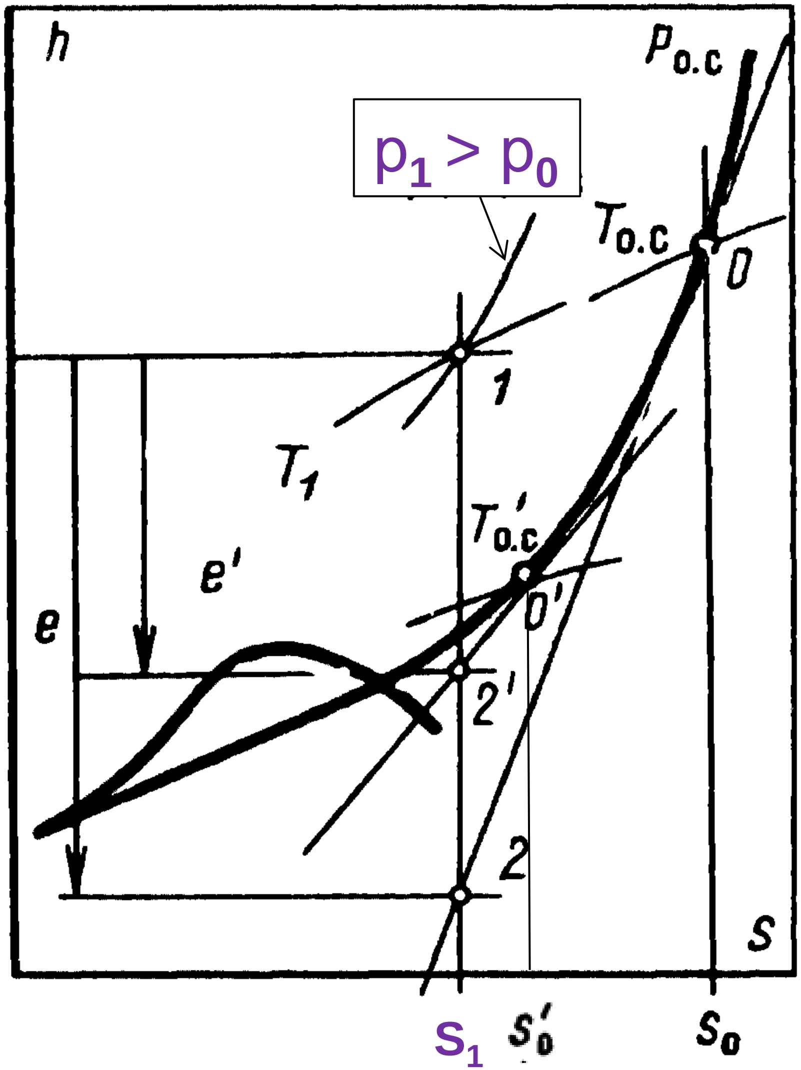
2. Увеличивается область отрицательных значений ex

3. При изменении p_0 разность эксергий в точках а и б не изменится !!!

Влияние p_0 нужно учитывать при анализе открытых систем. Для циклов закрытых систем, где важно изменение Δe, изменение p_0 не имеет значения.

p_0 =idem

4.5.2. Влияние T_0 на эксергию



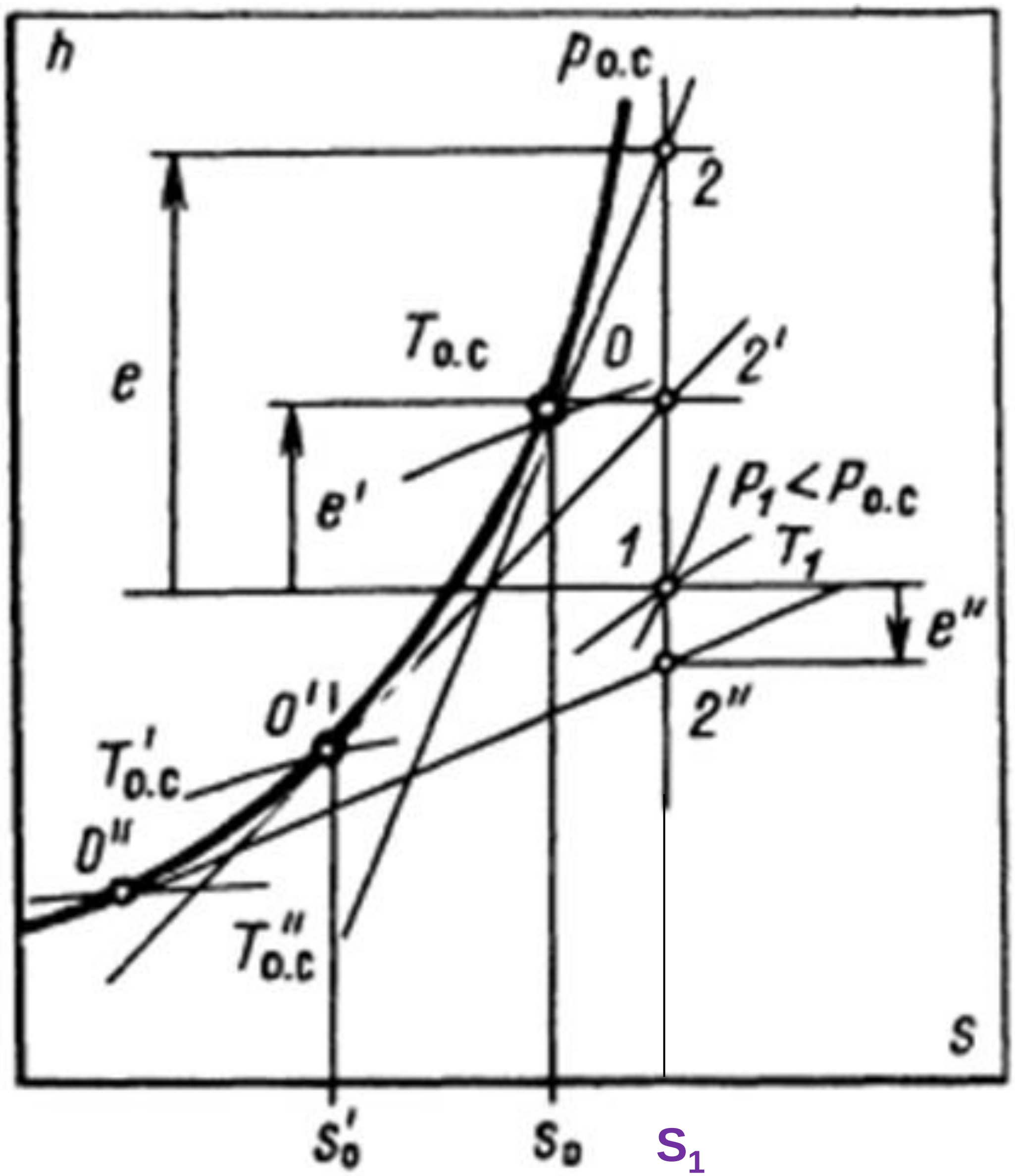
Изменение T_0 приводит к перемещению точки касания прямой окр ср по изобаре p_0 и изменению $tg\alpha=T_0$

1. $p_1 > p_0$

$T_0\downarrow$ (до T_0')

При $\downarrow T_0$ до $T_0' < T_0$ эксергия вещества (т.1) $\downarrow$ от е до е′.

Такой ход изменения эксергии характерен для параметров, которые лежат левее точки нулевого состояния (в обл умеренных и низких температур) $S_1<S_0$



$S_1 > S_0$ - эксергия ↑ с ↓ T_0

2. $p_1 < p_0$

$S_1 > S_0$

При ↓ T_0 эксергия также изменяется ↓ от e (<0) до e′ (<0). Однако при опред. значениях T_0 ее знак может измениться (e″>0)

⇩

Изменение T_0 сказывается не только на положении точки начала отсчета (ex=0), но и на разности величин ex между двумя точками на плоскости h,S.

⇩

Изменение д. учитываться при расчетах любых процессов как в открытых, так и закрытых системах

p_0 =idem

Влияние T_0 на эксергию

При ↓ T_0 до $T_0' < T_0$ эксергия вещества (т.1) ↓ от e до e′.

Влияние T_0 на e неоднозначно и определяется состоянием р. т. (**p_1, T_1**), так как две составляющие эксергии (термическая ex $_t$ (влияние изменения температуры тела от **T_1** до **T_0**) и механическая (обозначим e_p), связанная с работой расширения при изменении давления от p_1 до p_0 ,меняются по – разному при изменении T_0

Термическая составляющая e всегда ↑ с ↑ разности (**T_1** и T_0)

я-

ая

эксергии e_T всегда возрастает по мере увеличения разности между T и $T_{о.с}$. Для состояний, расположенных в зоне, где $s > s_{о.с}$ и температуры более высоки, эта разность растет по мере понижения $T_{о.с}$. Для состояний, где $s < s_{о.с}$, связанных с умеренными и низкими температурами, она уменьшается по мере снижения $T_{о.с}$. В промежуточной температурной зоне, где $T > T_{о.с}$, но $s < s_{о.с}$, в большей степени сказывается влияние механической составляющей эксергии, равной l' и связанной с разностью давлений между p и $p_{о.с}$. Поэтому, несмотря на сближение величин T и $T_{о.с}$, эксергия растет при увеличении $T_{о.с}$.

Для состояний ($S_1 < S_0$) связанных с умеренными и низкими T_1 эксергия ↓ при ↓ T_0 от e до e′.

точек в h

левее то

области

Для со

↓ T_0

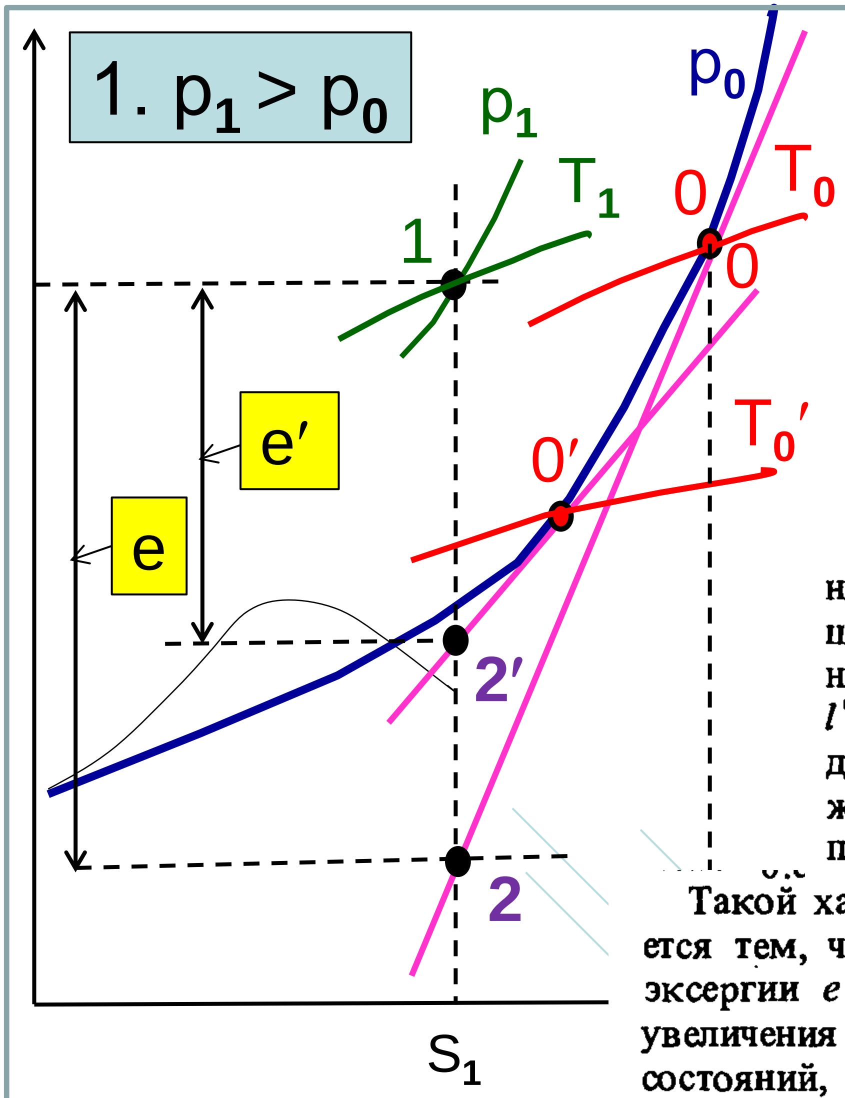
ной зоне, где $T > T_{о.с}$, но $s < s_{о.с}$, в большей степени сказывается влияние механической составляющей эксергии, равной l' и связанной с разностью давлений между p и $p_{о.с}$. Поэтому, несмотря на сближение величин T и $T_{о.с}$, эксергия растет при увеличении $T_{о.с}$.

Спасибо за внимание!

p_0 =idem

Влияние T_0 на эксергию

При ↓ T_0 до $T_0' < T_0$ эк
(т.1) ↓ от е до е′.



Влияние T_0 на е *<u>определяется состоянием р.т.</u>* (т.1) и ее температурой T_1 , т.к. термическая составляющая ех растет с ↑ T_0

Для состояний ($S_1 < S_0$) связанных с умеренными и низкими T_1 эксергия ↓ при ↓ T_0 от е до е′.

ной зоне, где $T > T_{о.с}$, но $s < s_{о.с}$, в большей степени сказывается влияние механической составляющей эксергии, равной l' и связанной с разностью давлений между p и $p_{о.с}$. Поэтому, несмотря на сближение величин T и $T_{о.с}$, эксергия растет при увеличении $T_{о.с}$.

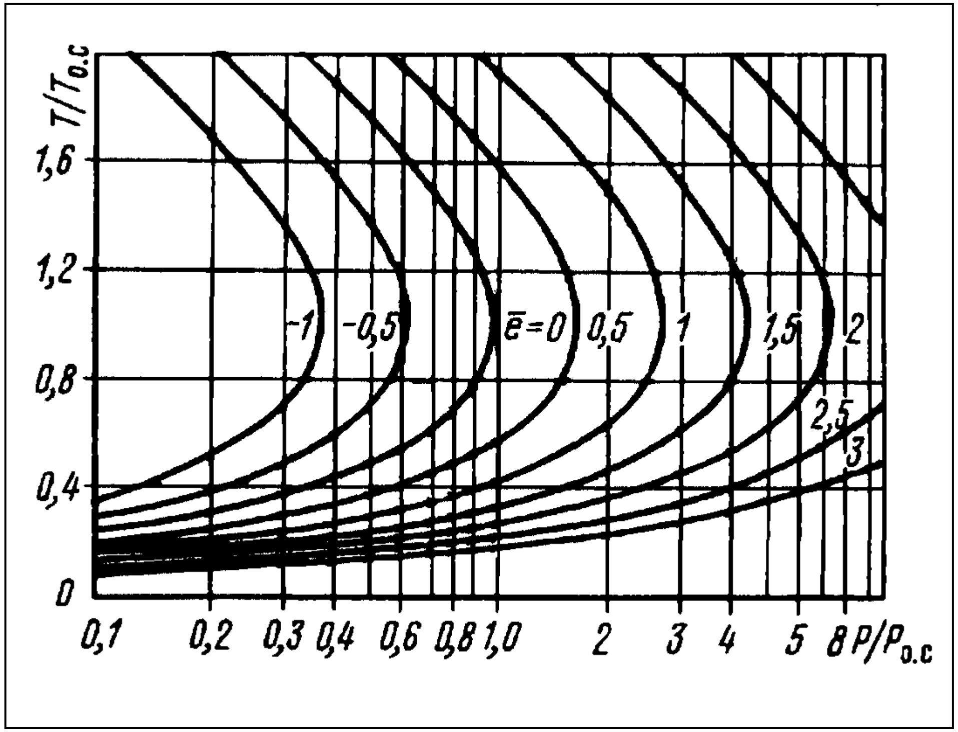
Такой характер изменения e определяется тем, что термическая составляющая эксергии e_T всегда возрастает по мере увеличения разности между T и $T_{о.с}$. Для состояний, расположенных в зоне, где $s > s_{о.с}$ и температуры более высоки, эта разность растет по мере понижения $T_{о.с}$. Для состояний, где $s < s_{о.с}$, связанных с умеренными и низкими температу-

-но для
ложенных
я (S< S_0) в
изких температур.

) эксергия ↑ при

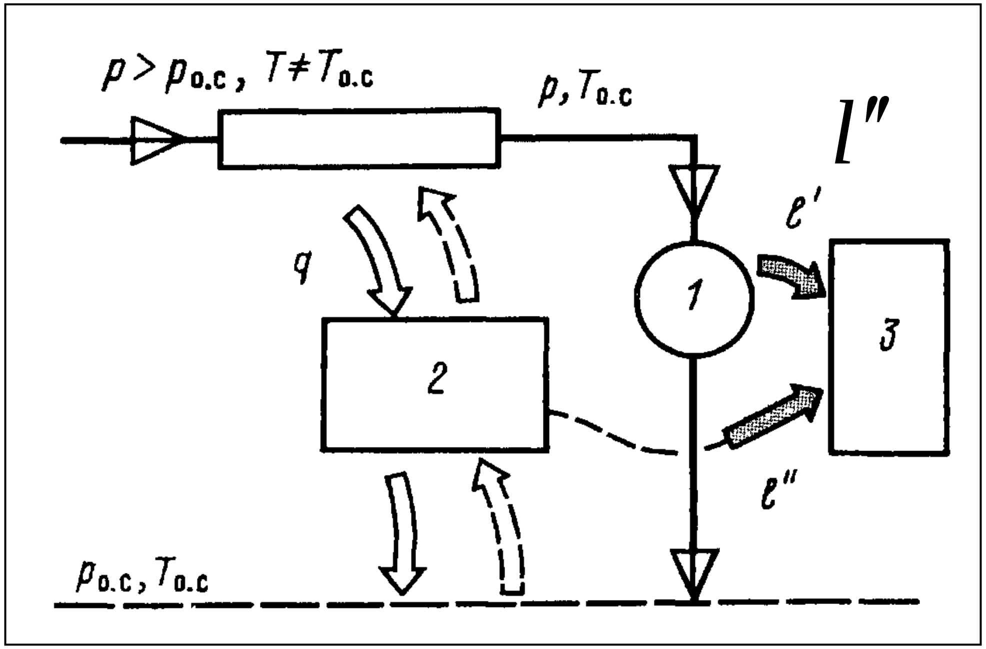
$S_1>S_0$ - эксергия ↑ с ↓ T_0

(рис. 2.10, *б*). Из диаграммы на рис. 2.10, *а* видно, что при понижении температуры с $T_{о.с}$ до $T'_{о.с} < T_{о.с}$ эксергия вещества с параметрами p_1, T_1 уменьшается с e до $e' < e$, так как отрезок *1–2'* короче отрезка *1–2*. Такой ход изменения эксергии e характерен для параметров, которые изображаются на плоскости h, s точками, расположенными левее точки нулевого состояния в области умеренных и низких температур. Для состояний, которые соответствуют точкам с энтропией, большей $s_{о.с}$, эксергия e, напротив, возрастает с уменьшением $T_{о.с}$.



слева $\overline{e} < 0$, справа $\overline{e} > 0$. Для всех давлений существуют две точки, в которых величины $\overline{e}$ (а следовательно, и e) равны, причем в одной из них $T > T_{o.c}$, а в другой $T < T_{o.c}$. При $T = T_{o.c}$ обе точки сливаются и $\overline{e}$ принимает минимальное

Физическая трактовка зависимости **e=f(p,T)**



I. $p>p_0$

l'' - Термическая составляющая эксергии ($T \neq T_0$), всегда $l'' > 0$)

l' - механическая составляющая эксергии ($p \neq p_0$)

1- обратимая расширительная машина (или компрессор), работающая при $\mathbf{T=T_0}$

2 – устройство для проведения обратимого цикла превращения тепла в работу (находится в окр ср и к нему подводится поток с пар-ми **p, T**);

3 – тело, которое м. получать (отдавать) работу

II. $p<p_0$