Установки для получения низких температур

Термины и понятия

Холод – теплота, отведенная от тела в процессе искусственного охлаждения

Холодопроизводительность – количество теплоты, отводимой в единицу времени при температуре ниже температуры окружающей среды.

Удельная холодопроизводительность – то же для 1кг рабочего тела

Среди процессов, образующих цикл холодильной машины, должен быть по крайней мере один, сопровождающийся понижением температуры в адиабатных условиях, либо поглощением тепла в изотермических условиях.

Холдопроизводящими процессами называются процессы, при которых уменьшается *энтальпия* рабочего тела.

- охлаждение сжатого или сжимаемого газа;
- конденсация рабочего тела;
- детандирование;
- динамические процессы температурного расслоения и т.д.

Уравнения состояния реального газа

Простейшее по форме эмпирическое уравнение :

$$pv = zRT \qquad или \qquad pV = zGRT$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \qquad или \qquad p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}$$

$$a = \frac{27}{64}\frac{R^2 T_{кр}^2}{p_{кр}}; \qquad b = \frac{1}{8}\frac{R\ T_{кр}}{p_{кр}}.$$

Выражения для внутренней энергии и энтальпии принимают вид:

$$u = u_0(T) - a/v$$

$$h = h_0(T) - a/v + pv$$

Основные процессы для получения низких температур.

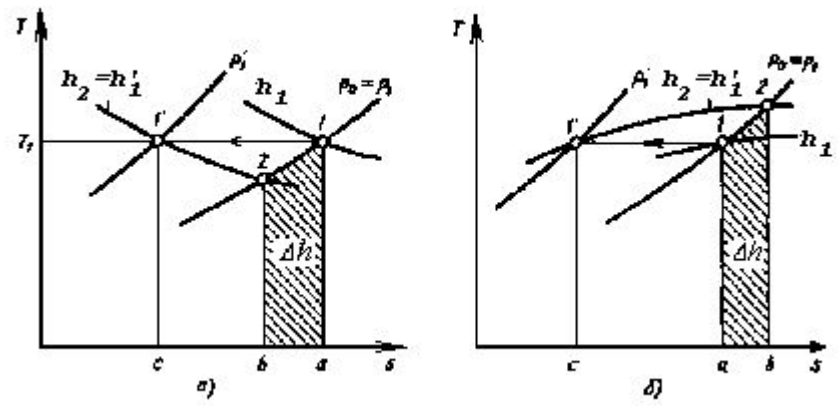
Сжатие реального газа.

При изотермическом сжатии реального газа внутренняя энергия всегда уменьшается

$$\Delta u = u'_1 - u_1 = a\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v'_1}\right) < 0,$$

Характер изменения энтальпии в разных областях состояний не одинаков:

$$\Delta h = h'_1 - h_1 = (u'_1 - u_1) + p'_1 v'_1 \left(1 - \frac{p_1 v_1}{p'_1 v'_1}\right) \Delta h = (u'_1 - u_1) + p'_1 v'_1 \left(1 - \frac{z_1}{z'_1}\right)$$

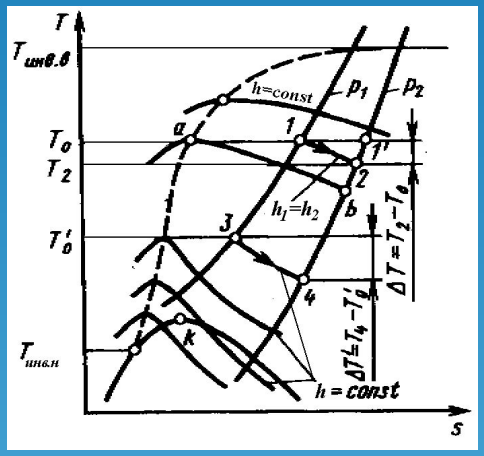


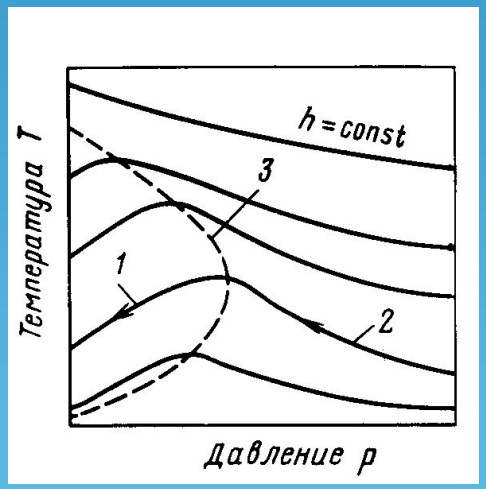
$Q_{отв} = L_{сж} - \Delta h$

а) $\Delta h < 0$; б) $\Delta h > 0$

Основные процессы для получения низких температур.

Процесс *h=const* . Дросселирование.





Изменение температуры при дросселировании характеризуется дифференциальным эффектом Джоуля-Томсона a_h

$$\alpha_h = \left(\partial T / \partial p\right)_h .$$

Из термодинамики :

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = C_p dT + \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dp$$

При Δh=0: $$\alpha_h = \frac{1}{C_p}\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right].$$

1-область понижения
2- область повышения температуры,
3- кривая инверсии.

$$\alpha_h = \frac{1}{C_p}\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right].$$

Для идеального газа: $\left(\partial v/\partial T\right)_p = R/p = v/T \longrightarrow \Delta h = 0;$

При использовании уравнения состояния в виде $pv = zRT$

$$\left(\partial v/\partial T\right)_p = Rz/p + RT/p\left(\partial z/\partial T\right),$$

$$\alpha_h = \frac{1}{C_p}\left[\frac{RT^2}{p}\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p\right] = \frac{1}{C_p}\frac{vT}{z}\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p.$$

При использовании уравнения состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\alpha_h = \frac{1}{C_p}\frac{(2a/RT)(1-b/v)^2 - b}{[1-(2a/vRT)(1-b/v)^2]} \approx \frac{1}{C_p}\left(\frac{2a}{RT} - b\right).$$

Для практических условий, когда имеется конечная разность давлений

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{C_p}\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] dp.$$

Равновесное адиабатное расширение газа (*s=const)*.

Коэффициент изоэнтропного расширения:

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{T}{C_p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \qquad \text{(всегда >0)}$$

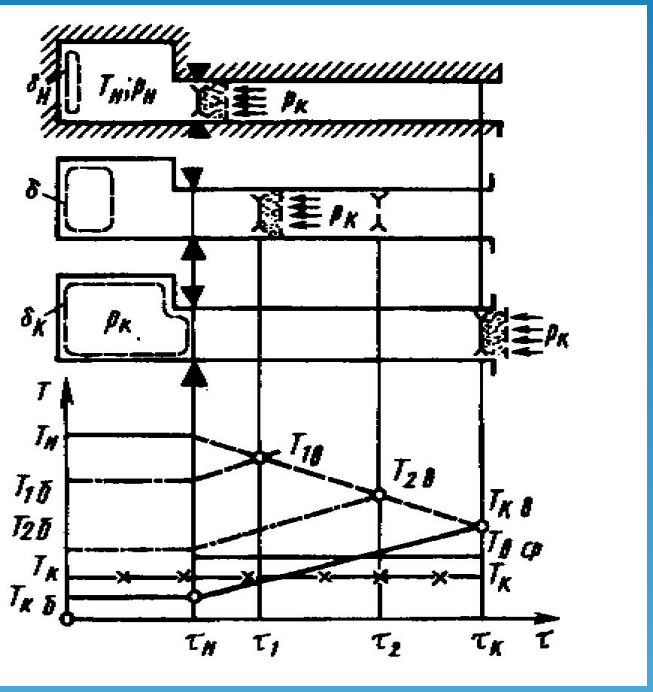
Для разных видов уравнения состояния

$$\alpha_s = \frac{RT}{C_p p}\left[z + T\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p\right] \quad , \quad \alpha_s = \frac{v(1-b/v)}{C_p\left[1-(2a/(vRT))(1-b/v)^2\right]} .$$

При z=const и k= const

$$\Delta T = T_1[1-(p_2/p_1)^{k-1/k}] \quad .$$

Процесс выхлопа или свободный выпуск газа из баллона.



Работа 1 кг газа в закрытой системе

$$l = u_к - u_н = -p_к(v_к - v_н).$$

для реального газа

$$du = c_v dT + (pT/z)(\partial z/\partial T)_v dv,$$

$$u_н - u_к = c_v(T_н - T_к) = p_к Rz(T_к/p_к - T_н/p_н),$$

$$T_к = T_н\left[(1-(p_k/p_н)(k-1))/k\right]$$

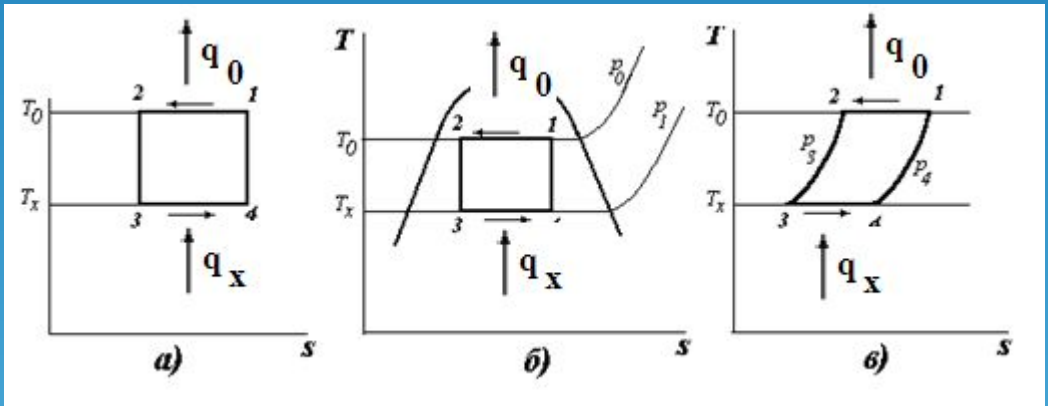
$$T_н - T_к = T_н\frac{k-1}{k}\left(1 - p_к/p_н\right)$$

$$\alpha_{выхл} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{выхл}.$$

Задачи, решаемые криогеникой

Криогенное термостатирование

Криогенное термостатирование - процесс поддержания постоянной температуры (на уровне ниже 120 К) в каком-либо веществе или среде.



минимальная удельная работа: $l_{\min} = q_0 - q_x,$

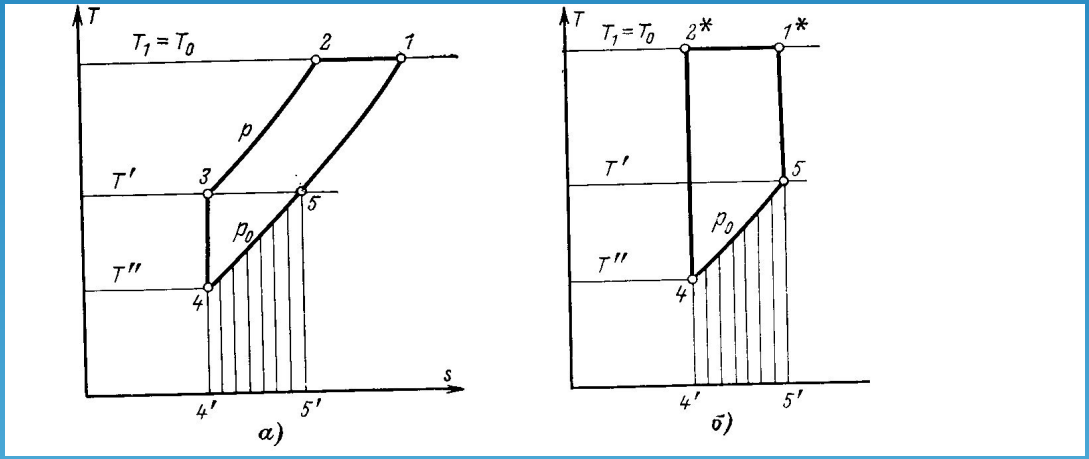
коэффициент ϕ_{min} затрат удельной мощности:

$$\varphi_{\min} = (T_0 - T_x)/T_x = T_0/T_x - 1$$

Задачи, решаемые криогеникой

Процесс охлаждения вещества от T_x' до T_x''

Отводимая теплота: $q_x = h'_x - h_x''$



Уравнение энергии (для а) и б)).

$$l_к - l_д = q_к - q_x$$

$$l_{к1-2} + l_{к5-1} - l_д = q_к - q_x$$

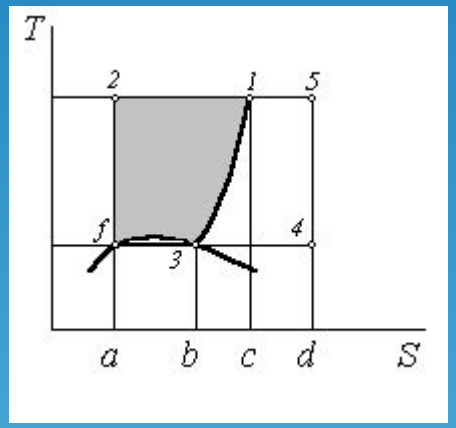
Минимальная работа:

$$l_{\min} = T_0(s_5 - s_4) - (h_5 - h_4).$$

Задачи, решаемые криогеникой

Конденсацию или кристаллизацию чистого вещества наиболее часто осуществляют при постоянном давлении. В этом случае процесс протекает при постоянной температуре T_x с выделением тепла, которое необходимо отвести в окружающую среду.

Ожижение газа



Работа изотермического сжатия:

$$l_к = T_0(s_1 - s_2) + (h_2 - h_1),$$

работа расширения газа в детандере:

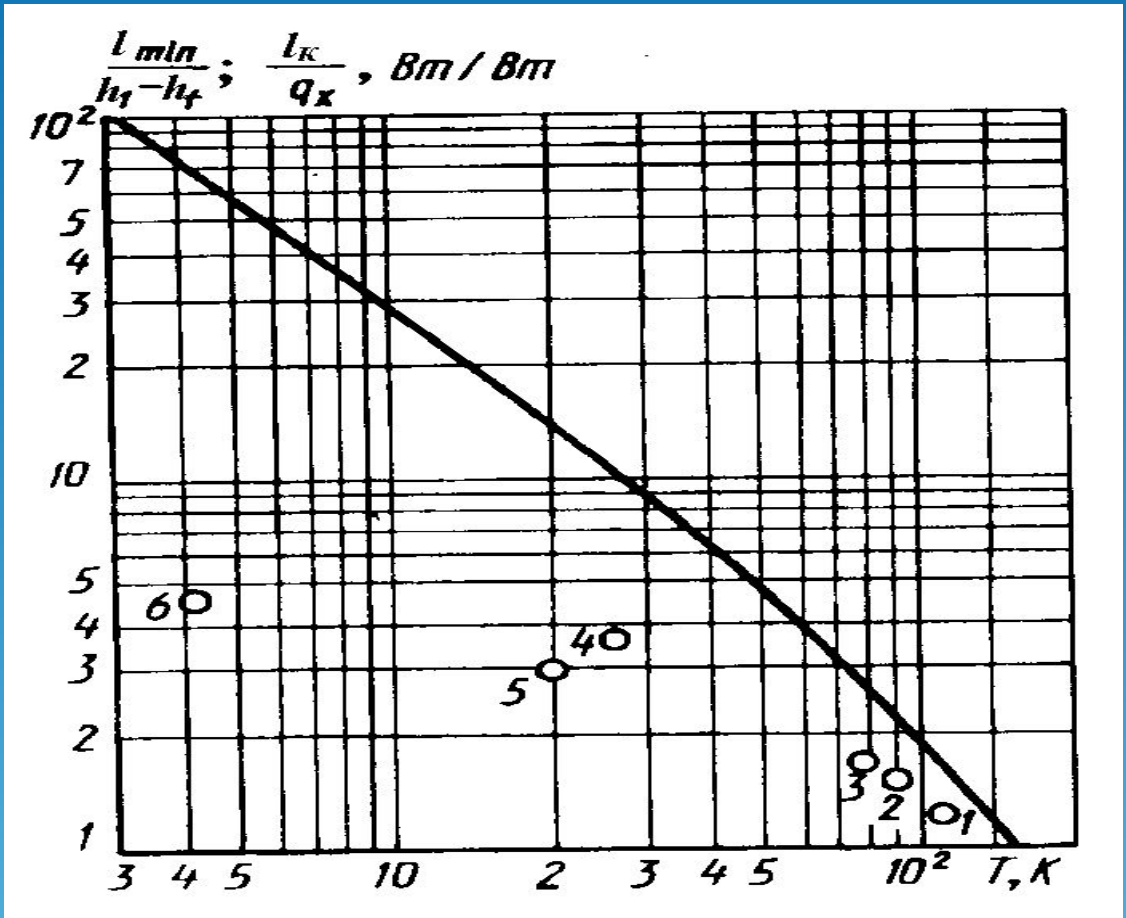
$$l_д = h_2 - h_f,$$

минимально необходимая работа:

$$l_{\min} = l_к - l_д = T_0(s_1 - s_2) - (h_1 - h_f).$$

теплота, отбираемая у 1 кг газа: $q_x = h_1 - h_f$

Ожижение газа



В идеальных ожижительных циклах необходимая работа меньше, чем в цикле Карно

1-метан,
2-кислород,
3-азот,
4-неон,
5-водород,
6-гелий.

Зависимость удельного расхода энергии идеального цикла для ожижения газов и цикла Карно от температуры при T_0 =300 К.

Задачи, решаемые криогеникой

Разделение газовой смеси

Энтропия смеси газов, находящейся при давлении p_0 и температуре T_0, отличается суммы энтропий составляющих смесь газов при тех же температуре и давлении.

$$\Delta s = s_0 - \sum_k s_i = R_y \sum_k y_i \ln \frac{p_0}{p_i} = -R_y \sum_k y_i \ln y_i$$

поскольку молярная доля $y_i<1$, $\ln y_i <0$ и $\Delta s>0$.

Для одного моля разделяемой смеси уравнение энергии:

$$l = q - (h_{см} - \sum_k y_i h_i) = T_0 \Delta s - (h_{см} - \sum_k y_i h_i)$$

здесь l – работа разделения.

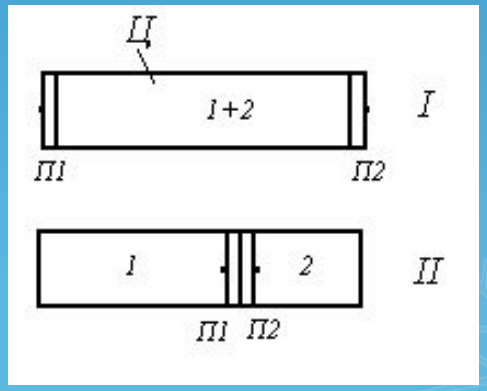


Схема процесса разделения смеси двух газов.

Показатели эффективности реальных циклов

Холодопроизводительность.

Полная - суммарное уменьшение энтальпии единицы массы рабочего тела во всех холодопроизводящих процессах данного цикла.
Полезная – то же минус потери.

Коэффициент ожижения: x - отношение количества сжиженного газа к полному количеству поступившего газа. Удельная холодопроизводительность определяется теплотой, отведенной от газа в процессе его ожижения $q_x=x(h_1-h_f)$, где h_1 и h_f - энтальпия рабочего тела при параметрах окружающей среды и энтальпия жидкости.

Минимальная работа – в отличие от полной работы не учитывает дополнительной работы на сжатие газа, связанной с компенсацией потерь, связанных с необратимостью составляющих цикл процессов. Удельная работа l_0 -полная работа, отнесенная к единице полученного эффекта.

$l_0=L/q_x$, (Дж/Дж), $l_0=L/x$, (кДж/кг жидк), $l_0=L/M_i$, (кДж/м^3 прод.)

Показатели эффективности реальных циклов

Холодильный коэффициент ε *- отношение полезной холодопроизводительности к полной работе.*

Для идеального рефрижераторного цикла Карно

$$\varepsilon_K = \frac{q_x}{l_{\min}} = \frac{T_x}{T_0 - T_x}.$$

Для идеального ожижительного цикла

$$\varepsilon_K = \frac{h_1 - h_f}{T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}.$$

Степень термодинамического совершенства $\eta_т$ $\eta_m = \varepsilon_д / \varepsilon_u$

характеризует эффективность реального цикла по сравнению с соответствующим идеальным прототипом.

для целей термостатирования

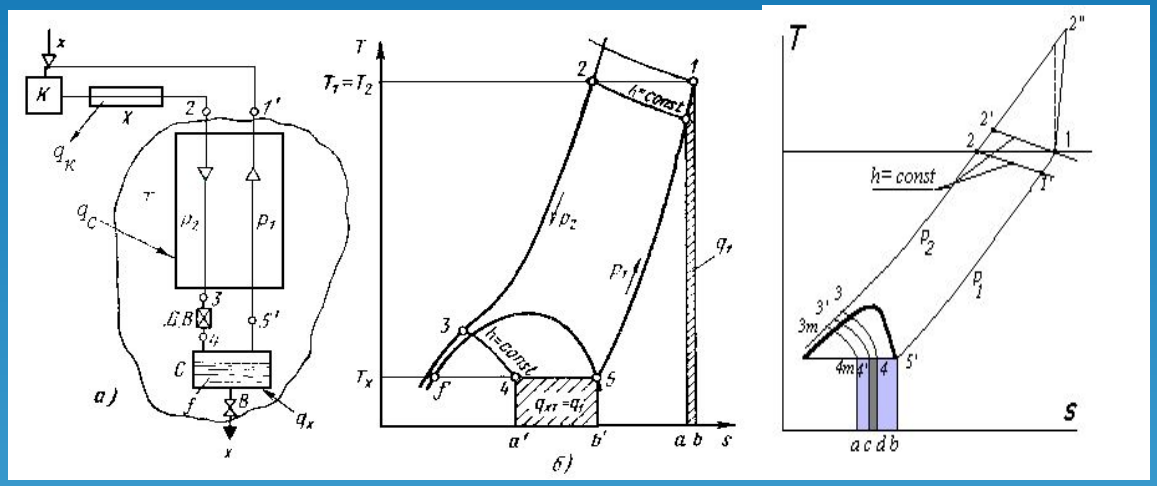
$$\eta_m = \varepsilon_д \left(\frac{T_0}{T_x} - 1 \right)$$

для целей ожижения

$$\eta_m = \varepsilon_д \frac{T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}{h_1 - h_f}$$

Циклы холодильных машин

цикл с простым дросселированием



дроссель-эффект

$q_{xT}=h_5-h_{4T}=h_1-h_2$

поскольку

$h_2-h_{3T}=h_1-h_5$

и $h_{3T}=h_{4T}$

потери холодопроизводительности: $\Delta q_{x\,рек}=h_3'-h_{3T}=h_4'-h_{4T}$

$\Delta q_{x\,вн}=h_3-h_3'=h_4-h_{4'}$

Для ожижительных циклов баланс энергии для выделенного объема

$$h_2+q_{внеш}=xh_f+(1-x)h_1,$$

откуда

$$x=\frac{h_1-h_2-\Delta q_{x\,рек}-\Delta q_{внеш}}{h_1-h_f-\Delta q_{x\,рек}}$$

Работа компрессора для действительного цикла:

$$l_к = {l_{кт}}/{\eta_{из}} = \frac{1}{\eta_{из}} RT_0 \ln {p_2}/{p_1}.$$

Удельная работа для рефрижераторного цикла

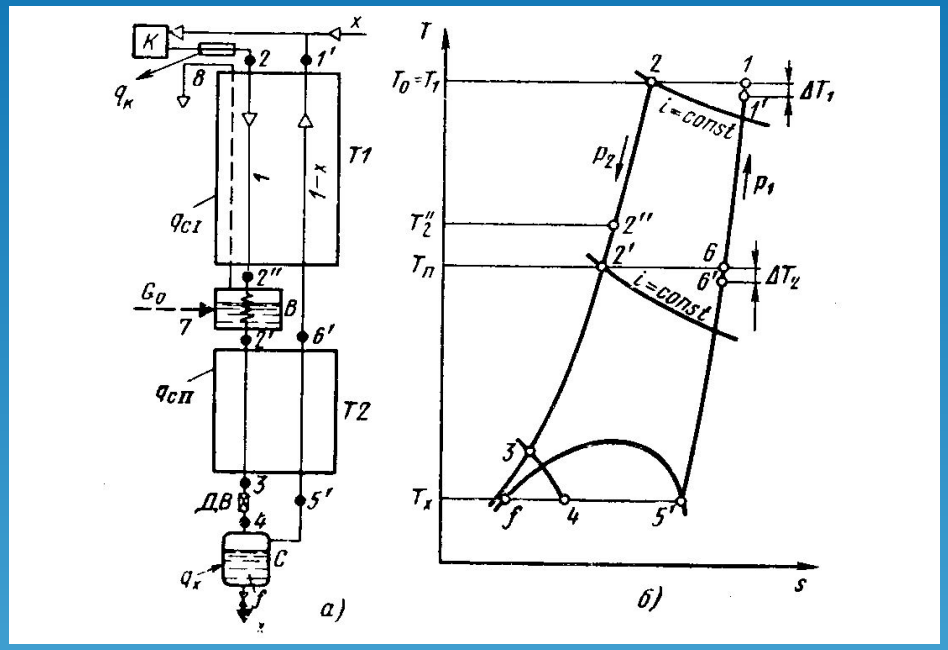
$$l_{0p} = {l_к}/{q_x} = \frac{RT_0 \ln {p_2}/{p_1}}{\eta_{из}(q_{хт} - \Delta q_{х\,рек} - \Delta q_{х\,вн})}$$

для ожижительного цикла

$$l_{0ож} = {l_к}/{x} = \frac{RT_0 \ln {p_2}/{p_1}}{\eta_{из} x}$$

Холодильный коэффициент

Циклы с предварительным охлаждением и дросселированием.



2”-2’ – дополнительный холодопроизводящий процесс

теоретическая суммарная холодопроизводительность

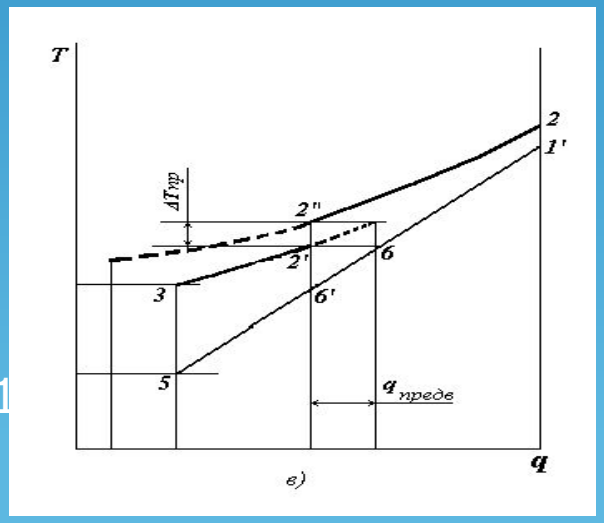
$$\Delta h_{T2}=\Delta h_{T1}+(h_{2''}-h_{2'})=h_6-h_2$$

т.к.

$$h_6=h_1-q_{рек}\ ;h_{2'}=h_2-q_{рек}-(h_{2''}-h_{2'})$$

действительная удельная холодопроизводительность:

$$q_x=\Delta h_{T2}-\Delta q_{x\ рек2}-\Delta q_{x\ вн2}$$



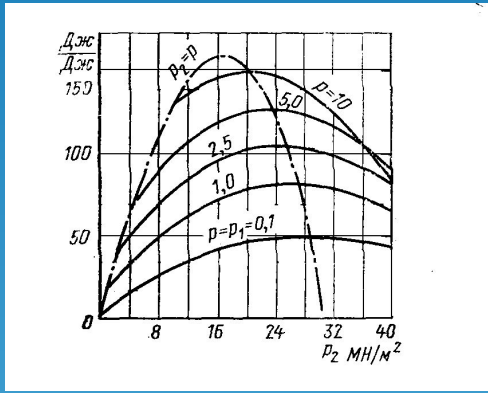
теплота, отводимая при предварительном охлаждении

$$q_B=G_B\Delta h_B=\Delta h_{T2}-\Delta h_{T1}+C_p(\Delta T_1-\Delta T_2)=q_{вн1}$$

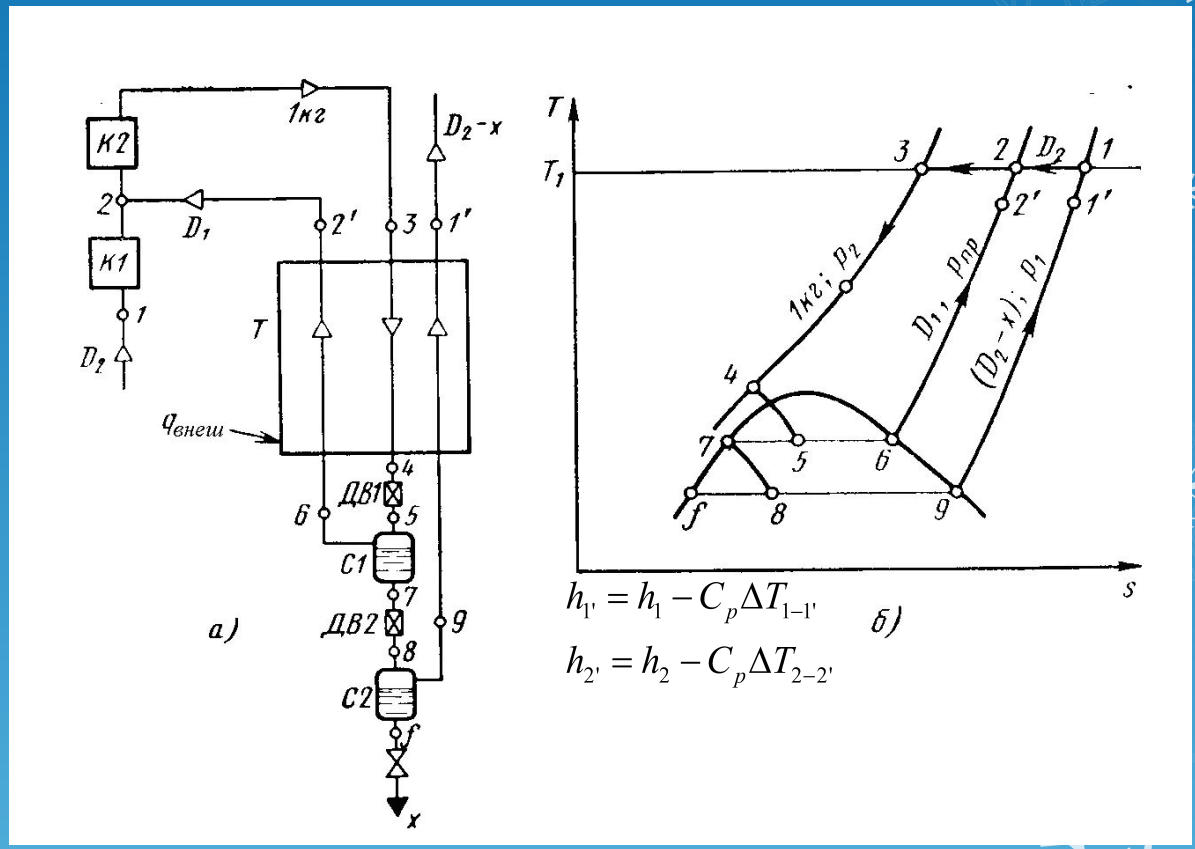
для ожижительного цикла:

$$x=\frac{\Delta h_{T2}-(C_p\Delta T_2+q_{вн2})}{(h_6-h_f)-C_p\Delta T_2}$$

Циклы с двойным дросселированием и циркуляцией потока



$$\varepsilon = \frac{q_x}{l} = \frac{\Delta h_T}{RT_1 \ln p_2 / p_1}$$



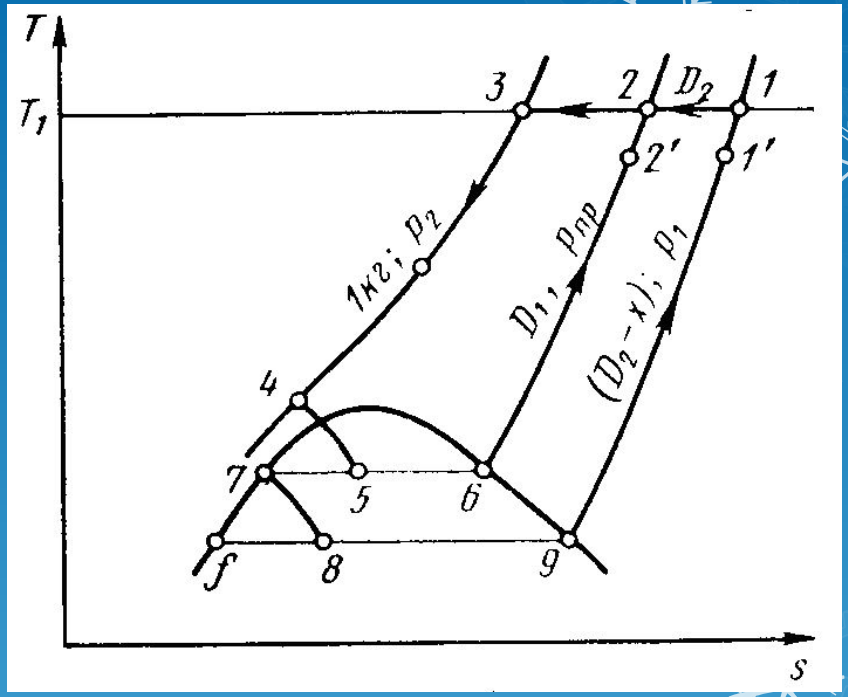
Тепловой баланс:

$$h_3 + q_{внеш} = D_1 h_{2'} + (D_2 - x)h_{1'} + xh_f,$$

$$x[(h_1 - h_f) - C_p\Delta T_{1-1'}] = h_2 - h_3 + D_2(h_1 - h_2 + C_p\Delta T_{2-2'} - C_p\Delta T_{1-1'}) - C_p\Delta T_{2-2'} - q_{внеш}$$

при одинаковых Δ Т:

$$x = \frac{\Delta h_{2-3} + D_2 \Delta h_{1-2} - C_p \Delta T - \Delta q_{внеш}}{h_1 - h_f - C_p \Delta T}$$



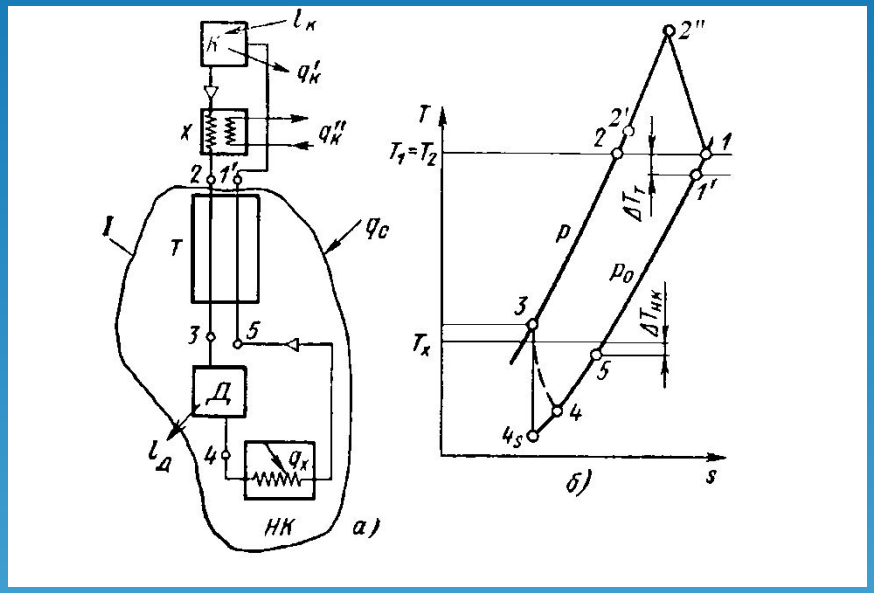
Работа сжатия на единицу ожиженного продукта:

$$l_0 = \frac{RT_1\left(\ln p_2 / p_{пр} + D_2 \ln p_{пр} / p_1\right)}{\eta_{из} x}$$

Доля расхода *D2* должна выбираться из уравнения теплового баланса рекуператора Т :

$$h_3 - h_4 + q_{внеш} = D_1(h_{2'} - h_6) + (D_2 - x)(h_{1'} - h_9)$$

Газовые детандерные циклы
(распространены в рефрижераторных установках)

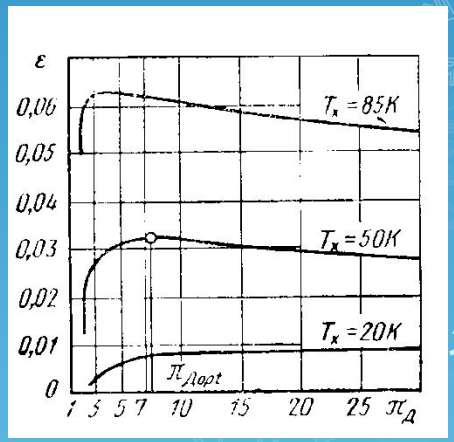


$$l_к = RT_1 \ln \pi_к / \eta_{из},$$

$$l_Д = C_p T_3 (1 - (1/\pi_д)^{k-1/k}) \eta_{ад}$$

$$\pi_к = p_2 / p_1 \qquad \pi_д = p_3 / p_4 = \pi_к (1 - \Delta\bar{p})$$

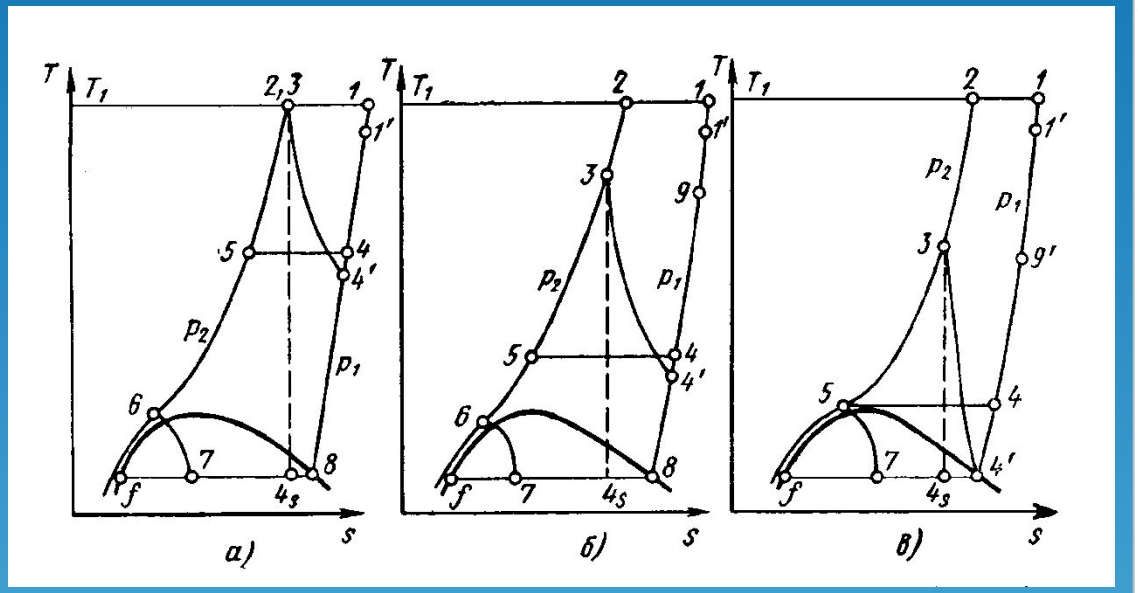
$$\varepsilon = q_x / l_{полн}$$



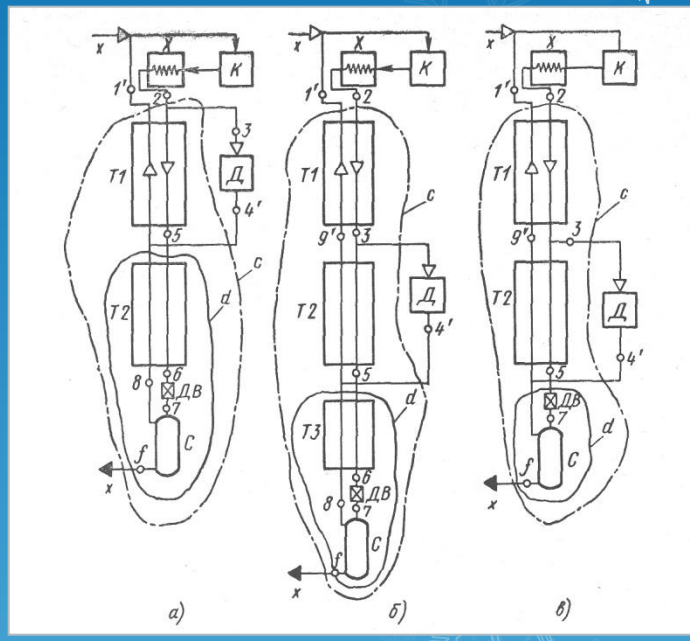
$$q_x = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - [q_{внеш} + C_p (T_1 - T_{1'})]$$

$$l_{полн} = (l_к - l_Д) \eta_{мех}$$

Комбинированные циклы с дросселированием и расширением рабочего тела в детандерах



варианты комбинированных циклов



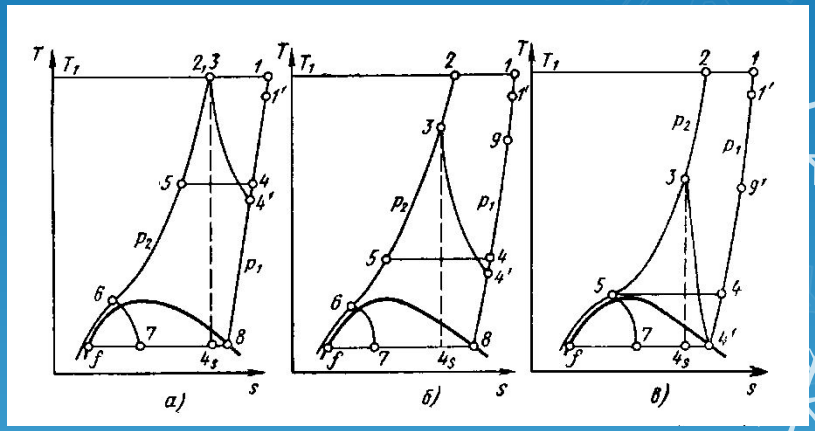
Баланс энергии в теплообменниках (ожижительный цикл):

$$h_2 + Dh_{4'} + q_{внеш} = (1-x)h_{1'} + Dh_3 + xh_f$$

коэффициент ожижения:

$$x = \frac{h_{1'} - h_2 + D(h_3 - h_{4'}) - q_{внеш}}{h_{1'} - h_f} = \frac{h_1 - h_2 + D(h_3 - h_{4'}) - C_p(T_1 - T_{1'}) - q_{внеш}}{h_1 - h_f - C_p(T_1 - T_{1'})}$$

Уравнения энергии



для дроссельной ступени охлаждения

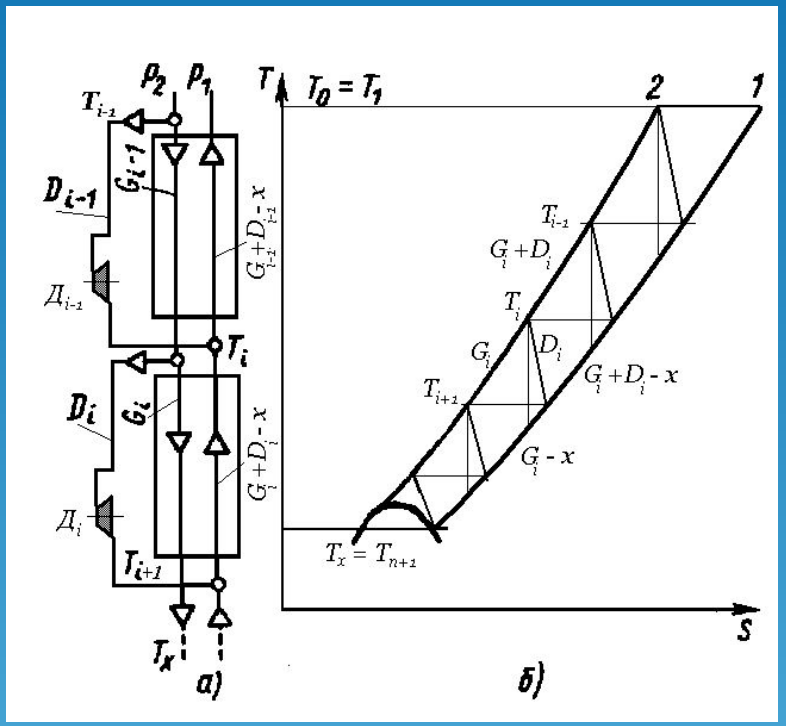
$$(1-D)(h_4 - h_5) - q_{внеш2} =$$
$$= x(h_{4'} - h_f) + (1-D)C_p(T_4 - T_{4'}),$$

для детандерной ступени

$$h_1 - h_2 + D(h_3 - h_4) - q_{внеш1} =$$
$$= (1-D)(h_4 - h_5) + (1-D-x)C_p[(T_4 - T_{4'}) + (T_1 - T_{1'})]$$

$$h_1 - h_2 + D(h_3 - h_4) - q_{внеш1} =$$
$$= (1-D)[(h_4 - h_5) + C_p(T_4 - T_{4'}) + \mathrm{C_p}(T_1 - T_{1'})] - x(h_4 - h_{4'} + h_1 - h_{1'})$$

Многоступенчатое охлаждение



Расход через компрессор

$$\sum_n D_i + x = G.$$

уравнение теплового баланса в регенераторе i-й ступени

$$C_{p2} G_i = C_{p1}(G_i + D_i - x),$$

расход газа через i-й детандер

$$D_i = G_i\left(C_{p2}/C_{p1} - 1\right) + x,$$

принимаем:

$$\frac{T_i}{T_{i+1}} = \frac{1}{1-[1-(p_1/p_2)^{\frac{k-1}{k}}]*\eta_o} = A = const,$$

тогда

$$T_2/T_x = A^n \quad и \quad T_2/T_{i+1} = A^i$$

$$T_i = \sqrt[n]{T_1^{n-i} T_x^i}$$

Работа многоступенчатого процесса

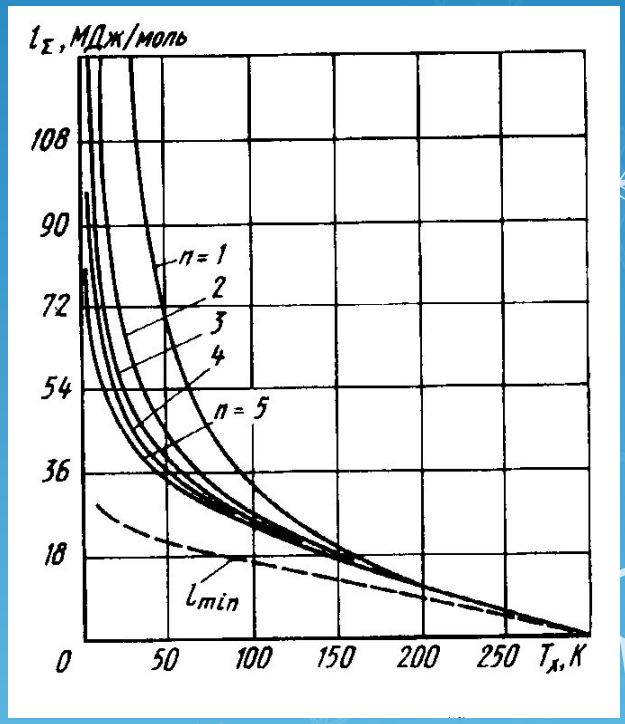
принимаем, что последняя ступень работает по циклу Карно

$$l_K = r\left(\frac{T_1}{T_x} - 1\right).$$

суммарная работа цикла

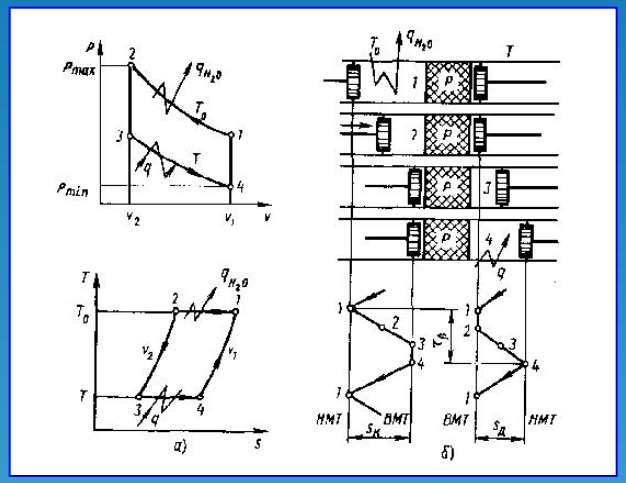
$$l_\Sigma = \frac{1}{x}\sum_{i=1}^{n} D_i\left(RT_1 \frac{\ln p_2/p_1}{\eta_{изот}} - H_{\partial i}\eta_\partial\right) + r\left(\frac{T_1}{T_x} - 1\right) =$$

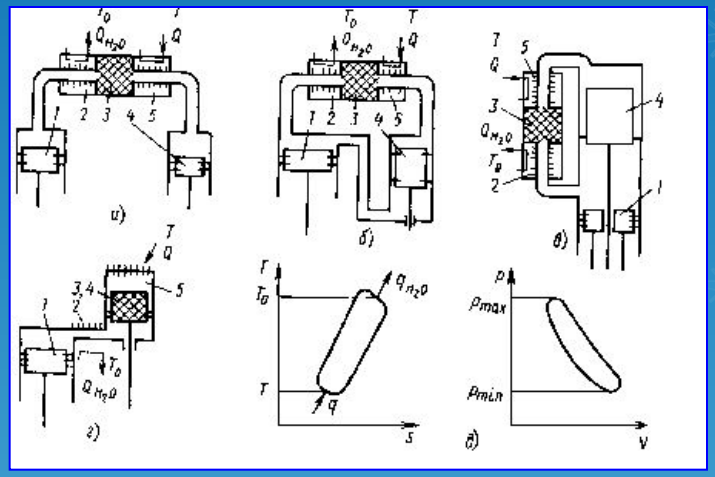
$$= \left(\frac{G}{x} - 1\right)\left(RT_1 \frac{\ln p_2/p_1}{\eta_{изот}} - H_{\partial i}\eta_\partial\right) - \frac{C_p}{x}\left(\sqrt[n]{\frac{T_1}{T_x}} - 1\right)\sum_{i=1}^{n} D_i \sqrt[n]{T_1^{n-i}T_x^i} + r\left(\frac{T_1}{T_x} - 1\right)$$



Работа по обратному циклу Стирлинга

Идеальный цикл состоит из 2-х изотерм и 2-х изохор.





работа процессов сжатия и расширения

$$l_{сж} = RT_0 \ln\frac{v_1 - b}{v_2 - b} - a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right);$$

$$l_{расш} = RT \ln\frac{v_1 - b}{v_2 - b} - a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right);$$

теплота,отводимая в атмосферу

$$q_0 = RT_0 \ln\frac{v_1 - b}{v_2 - b};$$

подводимая к рабочему телу

$$q = RT \ln\frac{v_1 - b}{v_2 - b}.$$

Работа по обратному циклу Стирлинга

холодопроизводительность идеальной машины больше работы расширения

$$q - l_{\text{расш}} = a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right),$$ поскольку $$h_2 - h_3 = v_2(p_2 - p_3) \square 0,$$

для реального газа $$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dT = \frac{R}{v-b} dT$$

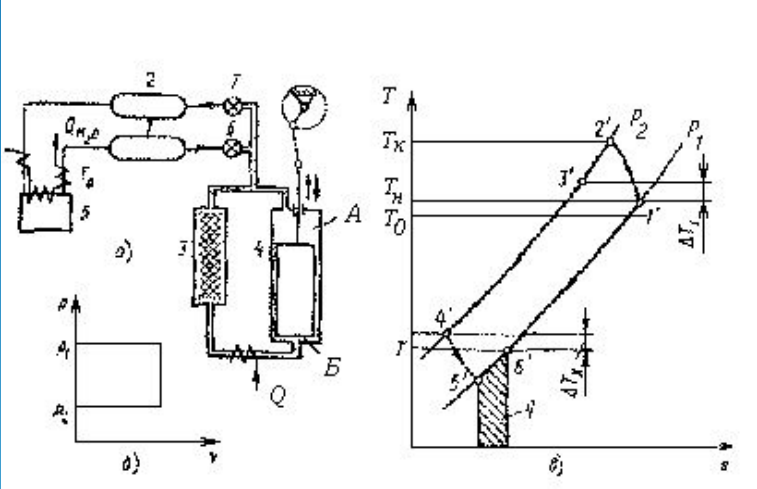
тогда $$p_2 - p_3 = \frac{R}{v_2 - b}(T_0 - T)$$ и $$p_1 - p_4 = \frac{R}{v_1 - b}(T_0 - T)$$

холодильный коэффициент идеальной машины: $$\varepsilon_K = \frac{T}{T_0 - T}$$

Одноступенчатые холодильные машины Стирлинга применяют для получения достаточно больших количеств холода на уровне температур 150-70К и до 40К при малых производительностях. Двухступенчатые машины успешно применяют для ожижения водорода (20К), а наиболее низкая температура, достигнутая с помощью трехступенчатой машины составляет около 8,5К.

Цикл Гиффорда - Мак-Магона.

холодопроизводящим процессом является процесс неравновесного расширения рабочего тела



1, 2 — ресиверы; *3* — регенератор; *4* — рабочий цилиндр с вытеснителем; *5* — компрессор; *6 и 7* — клапаны соответственно впускной и выпускной; *А* и *Б* — соответственно теплая и холодная полости цилиндра

исходное состояние: компрессор и газоохладитель *5* поддерживают в ресивере *1* давление p_2 и температуру T_0. *В полости А давление* $p_1 < p_2$, *количество газа* G_1.

период времени 1: *через вентиль 6 газ перетекает в А до выравнивания давлений (1'-2). Масса газа возросла до* G_2.

$$Q = u_2 - u_1 + L_{вн} = 0$$

$$u_1 = C_v T_0 (G_2 - G_1) + C_v T_1 G_1$$

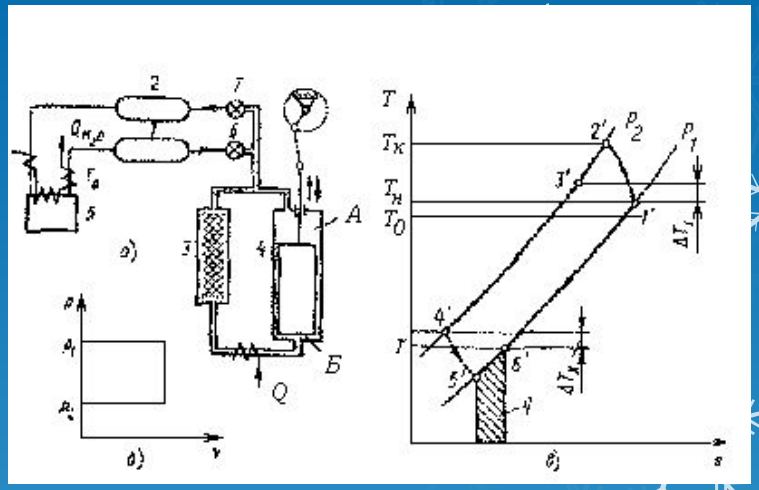
$$u_2 = G_2 C_v T_2$$

$$L_{вн} = -p_2 \Delta V = -RT_0 (G_2 - G_1).$$

$$G_1 / G_2 = \frac{T_2}{T_1} \frac{p_1}{p_2}.$$

Окончательно, конечное значение температуры

$$T_2 = \frac{kT_0}{1 + k\frac{T_0}{T_1}\frac{p_2}{p_1} - \frac{p_2}{p_1}}.$$



период времени 2:

при открытом впускном клапане поршень-вытеснитель поднимается, и газ через охлажденный за предыдущий цикл регенератор перемещается в холодную полость Б цилиндра 4, где температура близка к Т (процесс 2'-4').

При этом в регенератор поступает дополнительное количество газа :

$$\Delta G \approx \frac{V_{цил} p_2}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_2}\right).$$

Вследствие чего температура смеси 2-х порций газа снижается (процесс 2'-3').

период времени 3:

впускной клапан закрывается, и открывается выпускной клапан 7. Происходит выхлоп — очень быстрое расширение газа в процессе свободного выпуска из цилиндра в ресивер 2, находящийся под давлением p_1, и температура газа падает (процесс 4'-5').

период времени 4:

при открытом выпускном клапане поршень-вытеснитель опускается, и газ из холодной полости цилиндра проталкивается через регенератор (процесс 6'-1'). К холодной полости цилиндра или регенератора подводится теплота q (полезная холодопроизводительность). Выходя на теплой стороне из регенератора, газ частично направляется в компрессор и там сжимается; другая часть газа заполняет теплую полость А цилиндра 4. Когда поршень-вытеснитель достигает нижней мертвой точки, выпускной клапан 7 закрывается .

- *В момент открытия клапана 7 в цилиндре находится 1=G2+ΔG кг газа при давлении p2 и температуре T≈T4.*
- *За время выхлопа вытекло баллон 2: 1-G1, осталось в цилиндре G1 при давлении p1 и температуре T1.*
- *Холодопроизводительность*

$$q = \frac{RT}{p_2}(p_2 - p_1) = RT\left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)$$

Удельная работа $$l = (1 - G_1)RT_0 \ln {p_2}/{p_1}$$

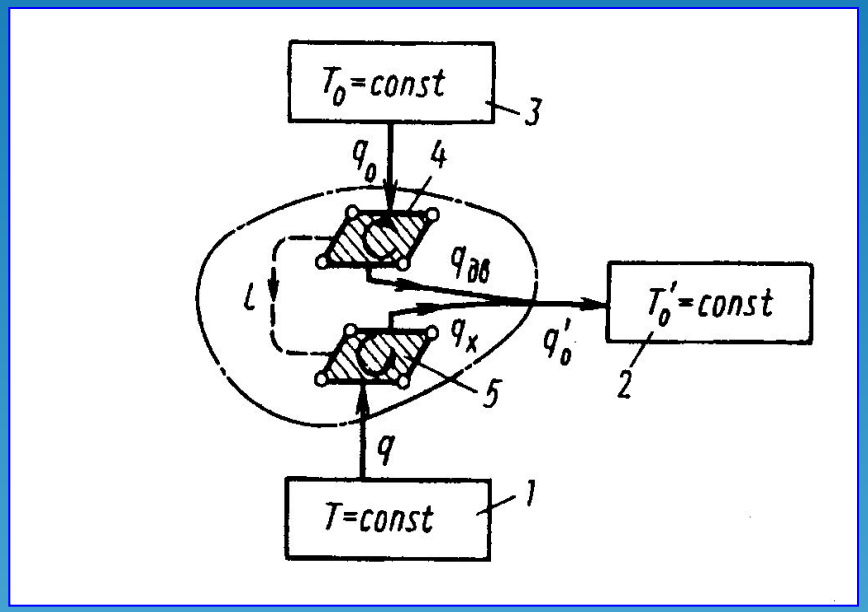
Величину G_1 можно определить из равенства $V_{цил} = 1\frac{RT}{p_2} = G_1\frac{RT_1}{p_1}$, *откуда:* $G_1 = \frac{T}{T_1}\frac{p_1}{p_2}$

Тогда при $T_0 \approx T_1$ $$l = R\left(T_0 - T\,{p_1}/{p_2}\right)\ln {p_2}/{p_1}$$ *и* $$\varepsilon = \frac{T\left(1 - {p_1}/{p_2}\right)}{\left(T_0 - T\,{p_1}/{p_2}\right)\ln {p_2}/{p_1}}.$$

Пример: при *T= 100 K* и T_0 *= 300 K*

p2/p1	1,2	2	3	4	5	8	10	50
ε	0,418	0,288	0,227	0,196	0,177	0,147	0,134	0,0836

Машина по схеме Вюлемье-Такониса



работа двигателя

$$l = q_0 - q_{дв} = q_0 \frac{T_0 - T_0'}{T_0},$$

холодопроизводительность

$$q = q_x - l = l \frac{T}{T_0' - T},$$

баланс тепловых потоков

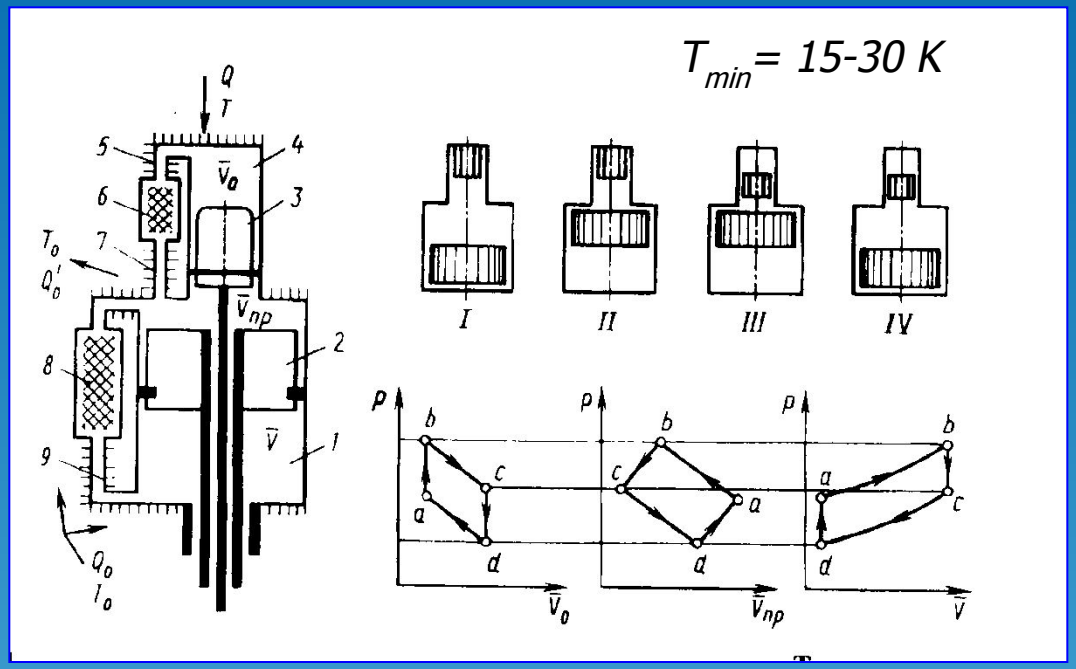
$$q_0' = q_{дв} + q_x = q_0 + q.$$

соотношение тепловых потоков

$$\left(\frac{q}{q_0}\right)_{\max} = \frac{T(T_0 - T_0')}{T_0(T_0' - T)},$$

$$\left(\frac{q}{q_0'}\right)_{\max} = \frac{T(T_0 - T_0')}{T_0'(T_0 - T)},$$

$$\left(\frac{q_0'}{q_0}\right)_{\min} = \frac{T_0'(T_0 - T)}{T_0(T_0' - T)}.$$



В фазе /-// при неподвижном холодном вытеснителе рабочее тело проталкивается через регенератор из промежуточного объема $\square V_{пр}$ в теплый объем $\square V$ (линия *ав*).

В фазе *II-III* при неподвижном теплом вытеснителе рабочее тело проталкивается через регенератор холодного цилиндра из объема $\square V$ в холодный объем $\square V_0$.

Одновременно сообщается теплота Q (полезная нагрузка), однако суммарный эффект от подвода теплоты Q и отвода теплоты $Q_{рег}$ в регенераторе приводит к уменьшению давления (линия *bc*).

В фазе *III-IV* происходит аналогичный процесс переталкивания рабочего тела из теплого объема $\square V$ в промежуточный $\square V_{пр}$ при неподвижном холодном вытеснителе, сопровождающийся уменьшением давления (линия *cd*).

В фазе *IV-I* рабочее тело из холодного объема $\square V_0$ переталкивается в полость $\square V_{пр}$ при некотором повышении давления (линия *da*).