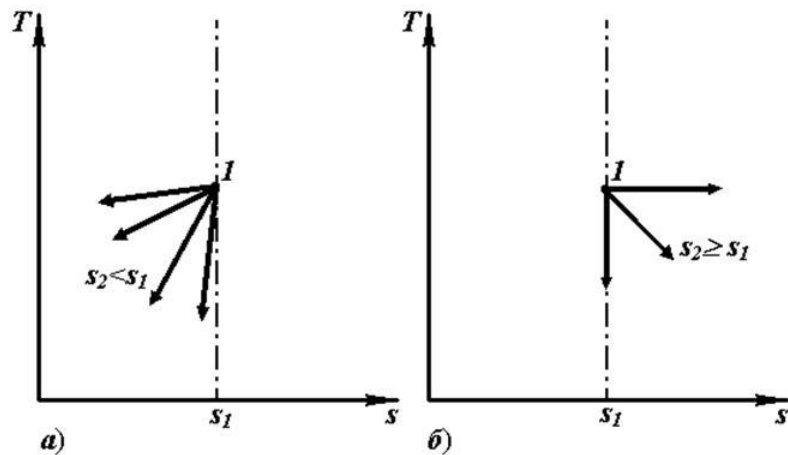


Лекция 3 Холодильные процессы

Основные процессы для получения низких температур

Процессы внешнего и внутреннего охлаждения



Направленность процессов
охлаждения
внешнего (а) $ds < 0$
и
внутреннего (б) $ds \geq 0$

Внешнее охлаждения - **при отводе от тела теплоты.**

Необходимо:

- создать внешнюю холодопроизводящую систему;
- организовать процесс теплообмена с окружающей средой.

Внутреннего охлаждения - понижение температуры тела или поддержание ее на заданном уровне **без отвода теплоты** во внешнюю среду.

Внутреннее охлаждение посредством использования сил межмолекулярного воздействия самого рабочего тела. Перераспределение энергии происходит внутри рабочего тела.

- 1. Внутреннее охлаждение посредством использования сил межмолекулярного воздействия самого рабочего тела.*
- 2. Внутреннее охлаждение посредством внешних сил.*
- 3. Внутренне охлаждение путем перераспределения внутренней энергии в потоке рабочего тела.*

1. Внутреннее охлаждение посредством использования сил межмолекулярного воздействия самого рабочего тела.

1.1. Дросселирование

$$\begin{aligned} ds &> 0 \\ dh &= 0 \\ dp &< 0 \\ dm &= 0 \end{aligned}$$

Адиабатное расширение газа в условиях стационарного течения без совершения внешней работы и приращения скорости. Процесс характеризуется условием сохранения энтальпии ($h = \text{const}$); реализуется при помощи дроссельных вентилей; не является холодопроизводящим. **Температура может понижаться или повышаться в зависимости от параметров состояния.**

1. 2. Изобарное смешение или растворение

$ds > 0$ $dh = 0$ $dp = 0$ $dm = 0$	Смешение или растворение веществ в жидком, твердом или газообразном состоянии, сопровождающиеся отрицательным тепловым эффектом растворения (температура снижается, так как теплоемкости смеси больше суммы парциальных теплоемкостей компонентов). Методом растворения жидкого ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ достигнуты температуры ≈ 2 мК. Процесс не является холодопроизводящим.
--	--

2. Внутреннее охлаждение посредством внешних сил. (Энергия рабочего тела отдается за пределы контрольного объема)

2.1. Расширение газа в детандерах

$ds \geq 0$ $dh < 0$ $dp < 0$ $dm = 0$	Адиабатическое расширение с совершением внешней работы. Идеальный процесс характеризуется условием $s = \text{const}$; является в цикле холодопроизводящим; температура всегда понижается; реализуется при помощи детандеров.
---	--

2.2. Выхлоп, выпуск газа из сосуда

$ds \geq 0$	Адиабатическое расширение с совершением внешней работы, осуществляемый в неравновесных условиях. Процесс характеризуется условием $\alpha_s = const$; является холодопроизводящим; температура всегда понижается; реализуется быстрым выпуском газа; является одним из рабочих процессов поршневых детандеров.
$dh < 0$	
$dp < 0$	
$dm < 0$	

2.3. Откачка, испарение рабочего тела при построенном отводе рабочего тела

$ds = 0$ $dp < 0$ $dh < 0$ $dm < 0$	Адиабатная откачка паров кипящей жидкости; испаряющийся пар уменьшает энергию остающейся жидкости, которая при этом охлаждается. Реализуется с помощью вакуумных насосов; для остающейся части жидкости является холодопроизводящим процессом в цикле; достигаются температуры: $T_{N_2} \approx 64K$; $T_{O_2} \approx 54K$; $T_{H_2} \approx 13,9 K$; $T_{4He} \approx 0,6 K$; $T_{3He} \approx 0,2 K$.
--	--

2.4. Десорбция

$ds > 0$ $dp < 0$ $dh < 0$ $dm < 0$	Адиабатная десорбция - откачка с поверхности адсорбента молекул адсорбата, которые, покидая поверхность, уменьшают энергию остающихся молекул и адсорбента. Процесс является холодопроизводящим.
--	--

2.5. Адиабатическое размагничивание парамагнетиков



$$\begin{aligned} ds &\geq 0 \\ dh &< 0 \\ dp &= 0 \\ dm &= 0 \end{aligned}$$

При наложении магнитного поля на парамагнитное вещество выделяется теплота. Если ее отводить, происходит изотермическое уменьшение энтропии. Затем, после снятия внешнего магнитного поля, происходит размагничивание с уменьшением температуры. Процесс холодопроизводящий используется для получения сверхнизких температур до создания рефрижераторов растворения.

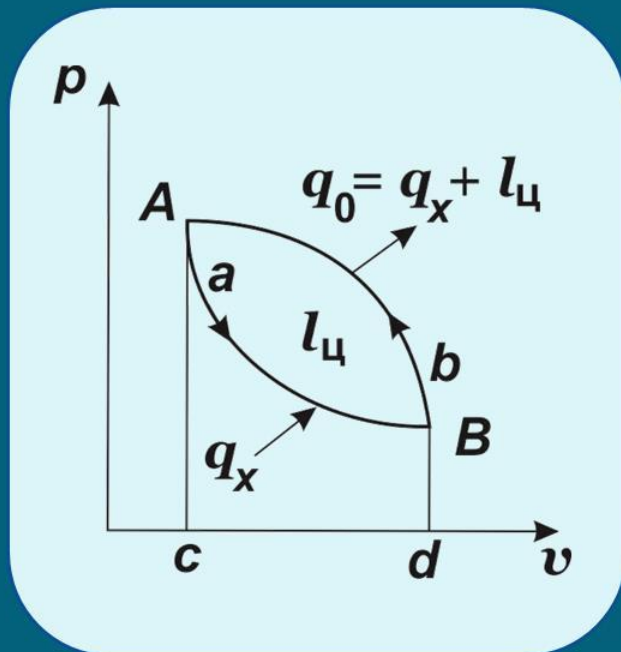


3. Внутренне охлаждение путем перераспределения внутренней энергии в потоке рабочего тела. (Эффект Ранка реализуется в вихревых трубах)

$$\begin{aligned} ds &> 0 \\ dh &< 0 \\ dm &\leq 0 \\ dp &< 0 \end{aligned}$$

Вихревое энергетическое разделение - возникновение температурного расслоения (градиента температуры) при расширении газа в условиях стационарного вихревого течения в результате энергетического взаимодействия частиц в вязком завихренном потоке. Реализуется в вихревых трубах, поток разделяется на горячий (периферийный) и холодный (центральный); для охлажденной части потока процесс является холодопроизводящим.

Принцип работы холодильных установок.



$$\varepsilon_x = \frac{q_x}{l_{ц}}$$

Идеальные холодильные циклы и установки

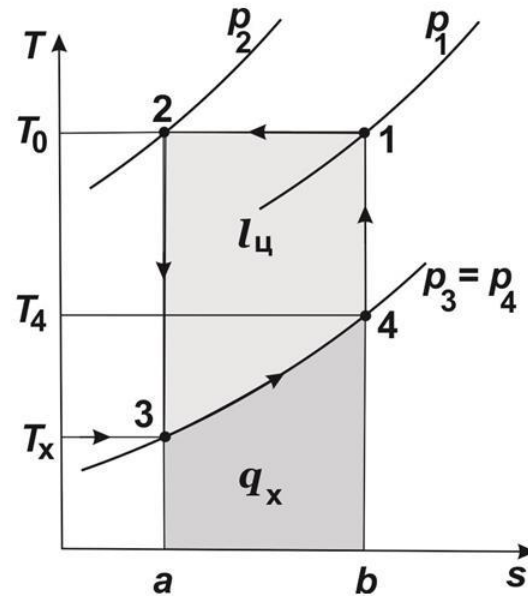
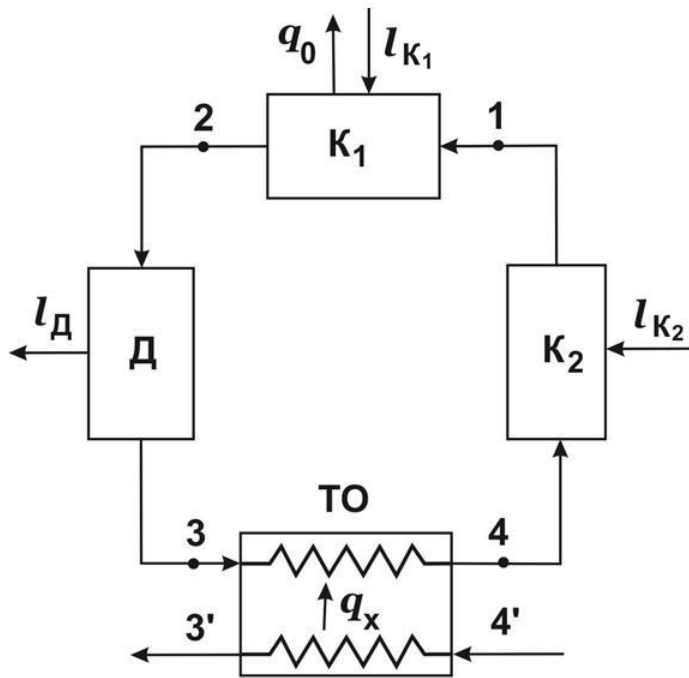
Термодинамическое совершенство реального (необратимого) цикла оценивается сравнением его параметров с параметрами идеального (обратимого) цикла.

Отношение холодильного коэффициента реального цикла к идеальному – эксергетический КПД:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\varepsilon_{\text{p}}}{\varepsilon_{\text{ид}}}$$

Известны схемы и параметры ряда идеальных циклов: **охлаждения, термостатирования, конденсации, сжижения** и др.

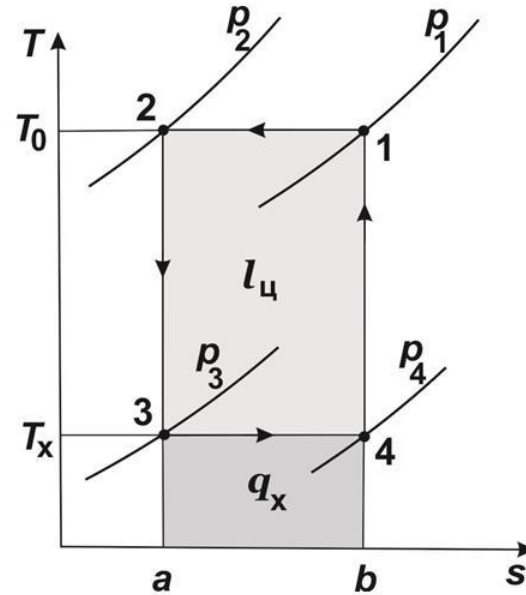
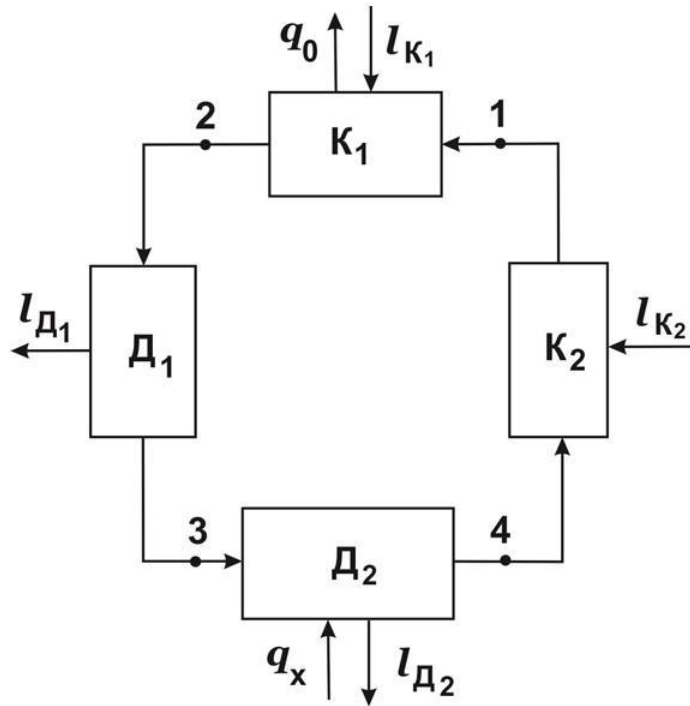
Идеальный цикл охлаждения.



$$l_{\text{ц}} = T_0(s_1 - s_2) - \int_{T_3}^{T_4} c(p, T) dT$$

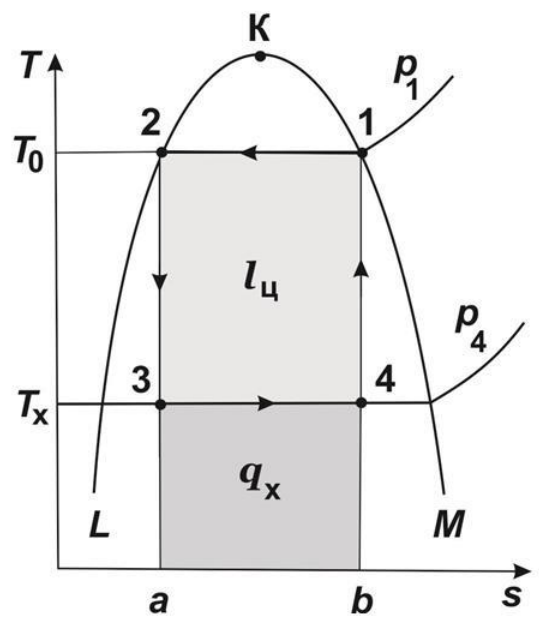
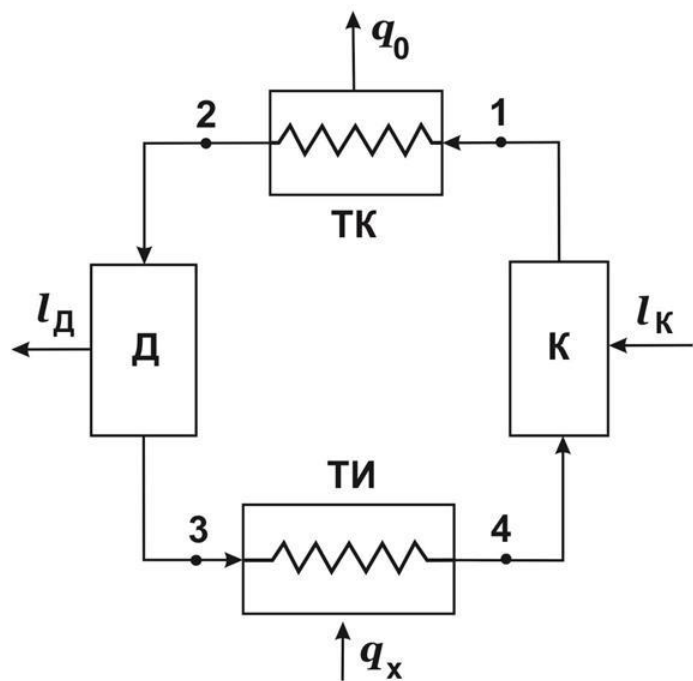
$$\varepsilon_{\text{охл}} = (h_4 - h_3) / [T_0(s_1 - s_2) - (h_4 - h_3)]$$

Идеальный цикл термостатирования



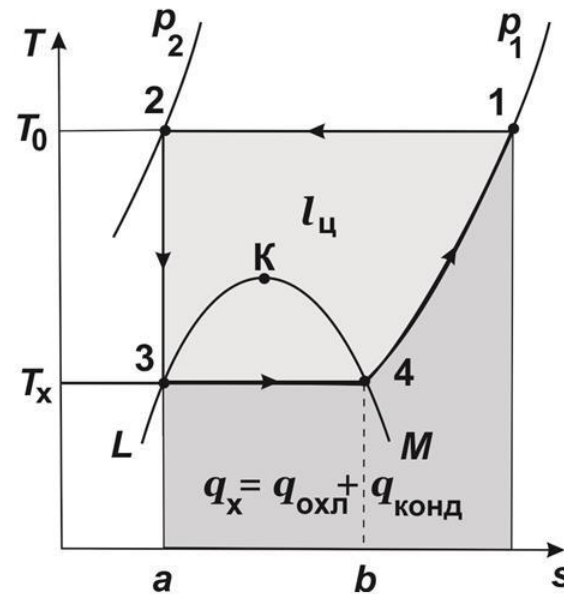
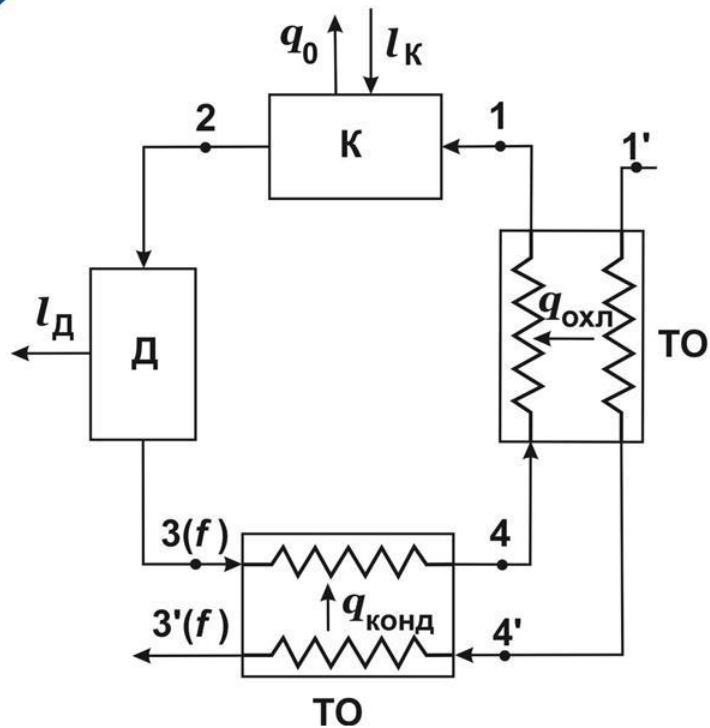
Этот цикл, часто наз. также **обратным циклом Карно**, принимается как идеальный для большинства холодильных и криогенных установок (включая газовые), а также установок кристаллизации.

Идеальный цикл термостатирования в области влажного пара.



Неидеальность – выход из области насыщения

Идеальный цикл сжижения газов



$$q_x = q_{охл} + q_{конд} = h_1 - h_f$$

получения чистой жидкости [точка 3(f)]

$$\varepsilon_{охл} = (h_1 - h_2) / [T_0(s_1 - s_2) - (h_1 - h_f)]$$

Реальные холодильные циклы и установки

Установки для получения умеренного холода, называемые также холодильными машинами, подразделяются на: воздушные и паровые, а последние - на компрессионные, абсорбционные, адсорбционные и парожетторные. Наиболее распространены парокмпрессионные, абсорбционные и парожетторные машины.



Схема парокompрессионной машины и ее ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЦИКЛ.

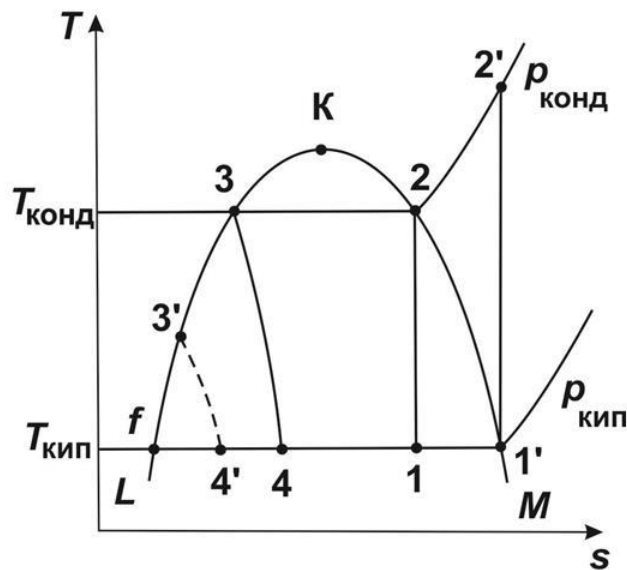
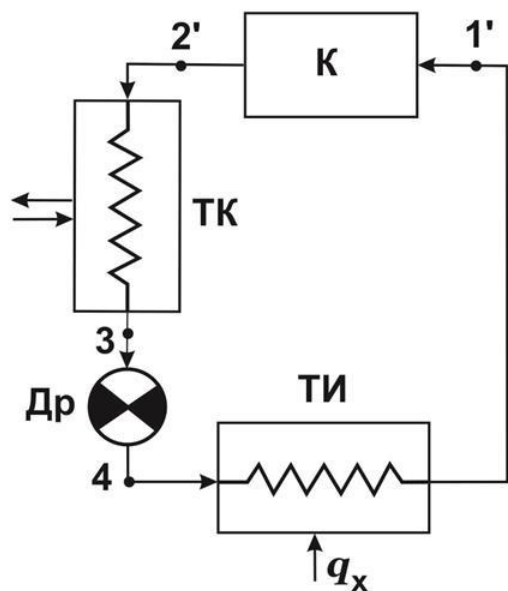


Схема абсорбционной машины.

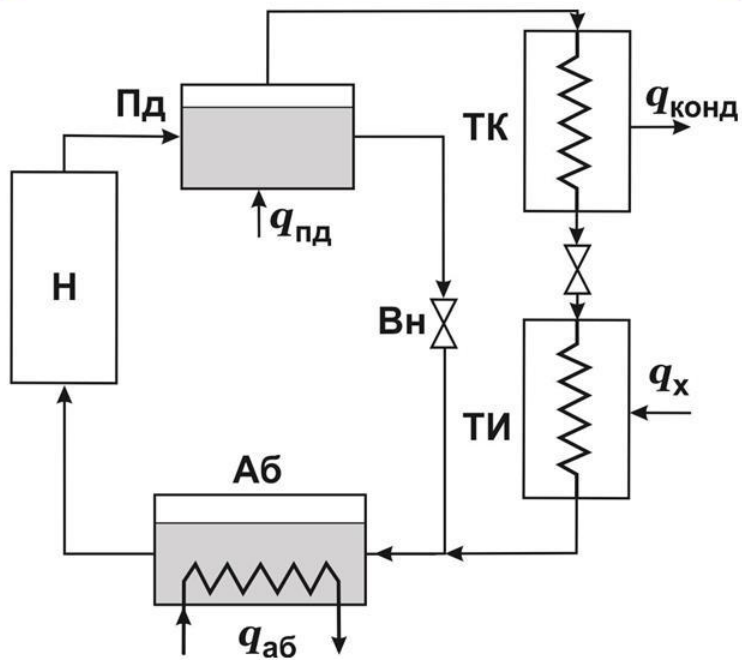
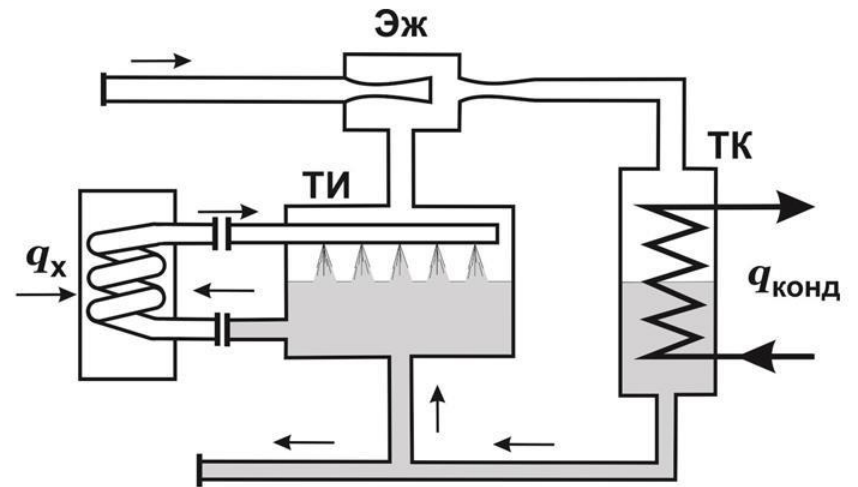


Схема парожетекторной машины.



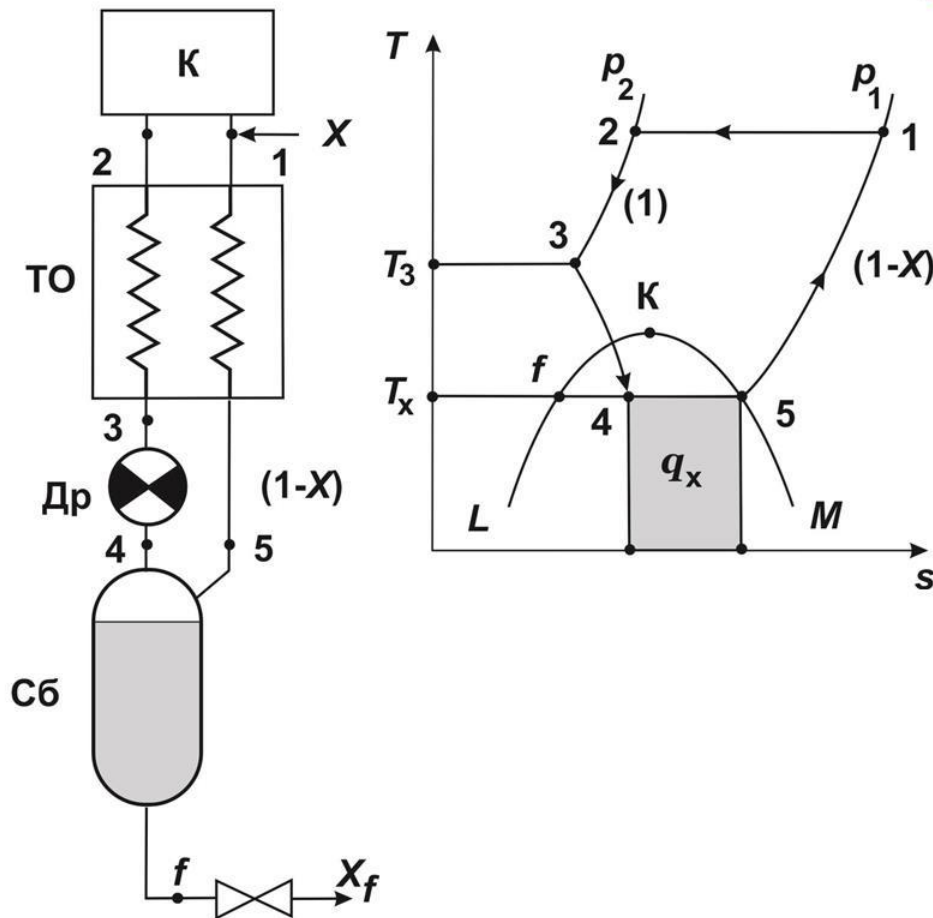
Установки для получения холода на криогенном уровне

Эти установки, наз. также просто криогенными, по назначению бывают рефрижераторные (вырабатывают низкотемпературный холод), ожижительные, газоразделительные и комбинированные. По способу получения холода различают след. циклы КУ:

- с дросселированием ($h = \text{const}$),
- расширением в детандере ($S = \text{const}$),
- дросселированием и расширением в детандере,
- криогенных газовых машин,
- с выхлопом газа из постоянного объема и др.

$$T_m = \sqrt[n]{T_0^{n-m} T_x^m}$$

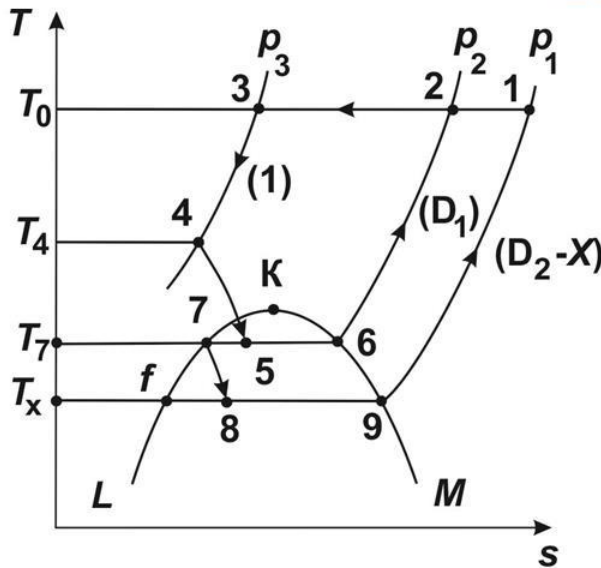
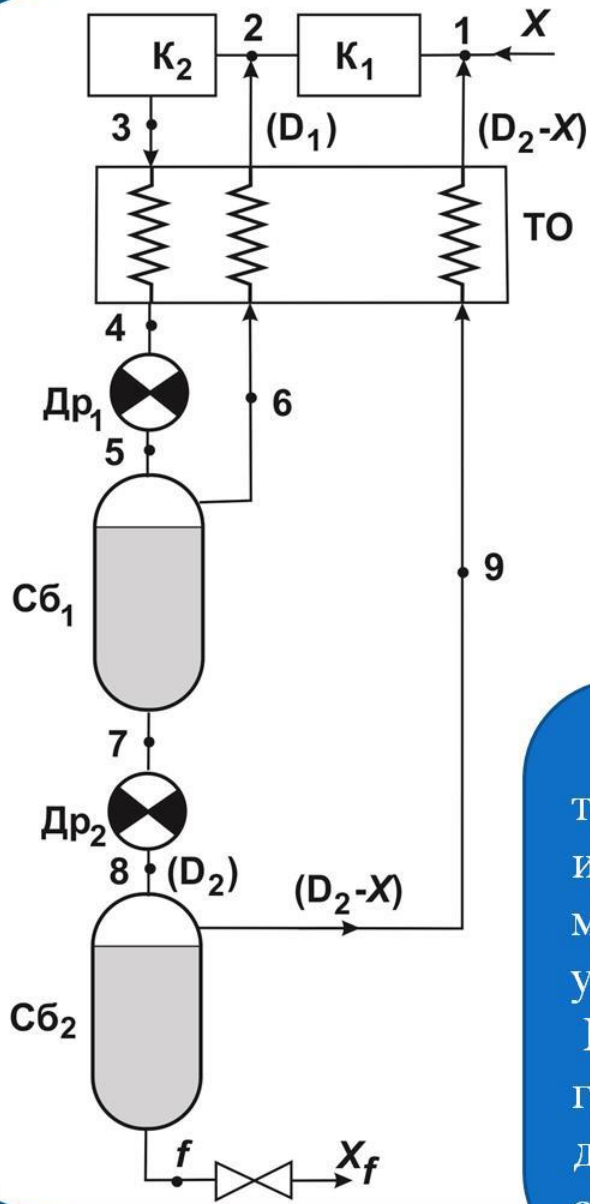
Схема криогенной установки с однократным дросселированием (идеальный цикл).



В циклах КУ особенно важен способ отвода теплоты от охлаждаемого тела, которое при охлаждении "приобретает" все температуры от T_0 до T_x .

Идеальным для данного случая является процесс 4-5 или процесс 1-2, т. е. непрерывный отвод теплоты на каждом температурном уровне в интервале $T_0 - T_x$.

Схема криогенной установки с двойным дросселированием.



В первом приближении холодопроизводительность такого цикла пропорциональна разности конечного (p_K) и начального (p_H) давлений хладагента: $q_x \sim (p_K - p_H)$, а мех. работа $l_K \sim \ln(p_K/p_H)$. Поэтому хол.коэф. при увеличении p_H существенно возрастает.

При одинаковых давлениях p_1 и p_3 доля сжиженного газа X по сравнению с долей газа при простом дросселировании уменьшается примерно на 15%, однако снижается на 40% мех. работа компрессора

Схема криогенной установки, работающей на смеси хладагентов.

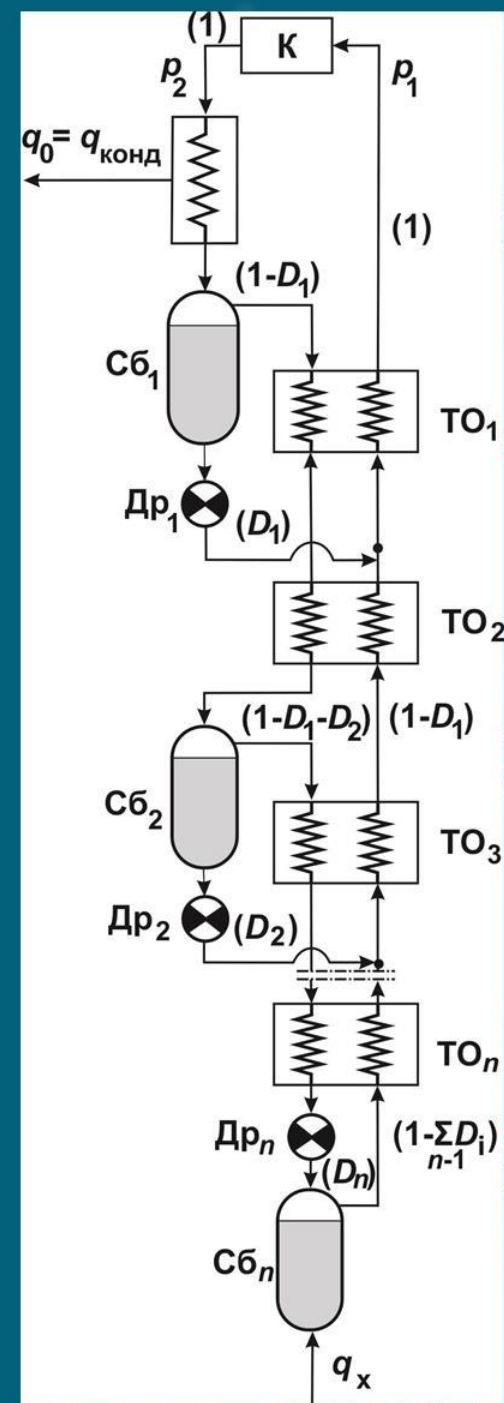
Совершенствование циклов с дросселированием достигается применением в качестве рабочей среды смеси хладагентов с различными температурами конденсации в интервале $T_0 - T_x$.

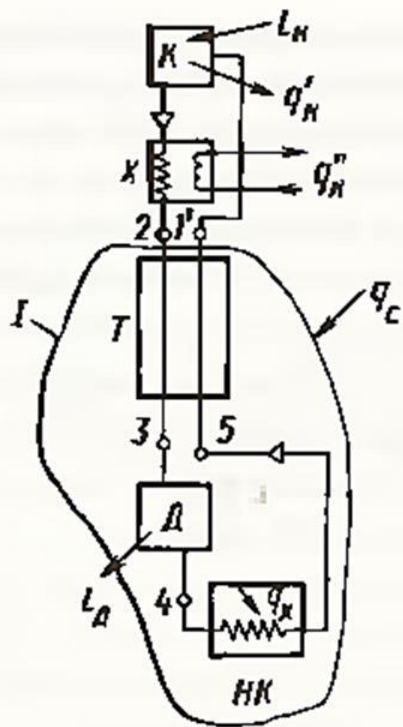
Такая смесь сжимается в компрессоре К, при этом на уровне T_0 ($p = p_2$) конденсируется часть потока компонент с самой высокой температурой конденсации.

В сборнике Сб1 происходит разделение фаз: пар направляется в теплообменник ТО1, а жидкость в кол-ве D_1 дросселируется через вентиль Др1 в обратный поток.

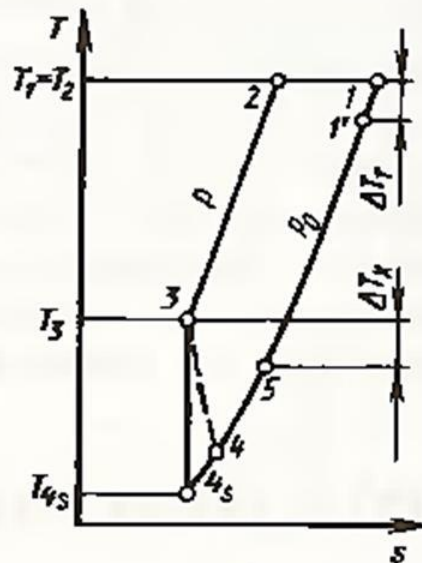
После охлаждения в ТО2 часть прямого потока снова конденсируется и т.д. Процесс продолжается до достижения наинизшей температуры T_x - температуры конденсации прследнего компонента смеси при давлении p_1 .

Криогенные установки и методы расчета состава смесей хладагентов достаточно сложны, но получаемый в результате эффект весьма значителен.

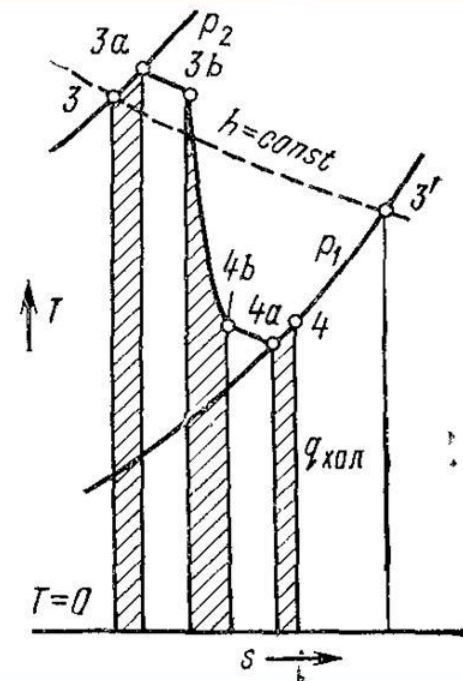




а)



б)



Штриховая – приток
 3а-3б – дросселирование
 при впускном клапане
 4а-4б- дросселирование
 при выпускном клапане

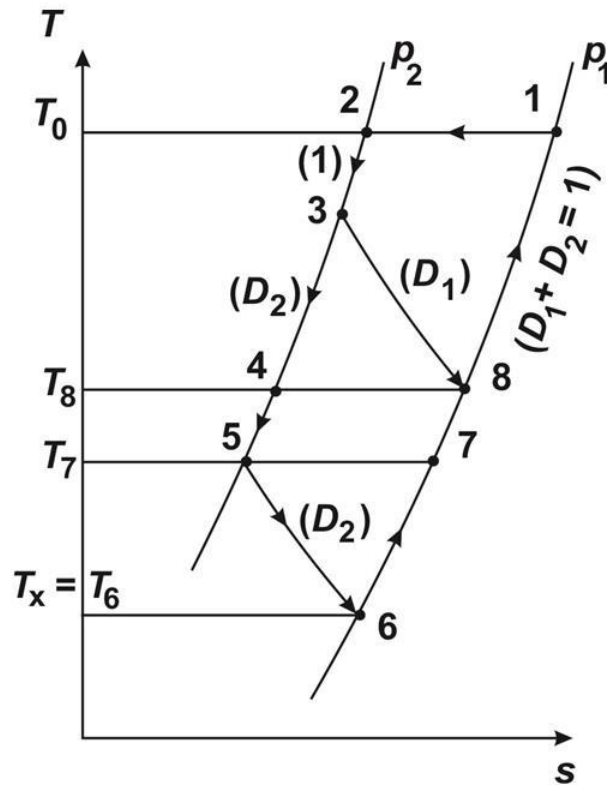
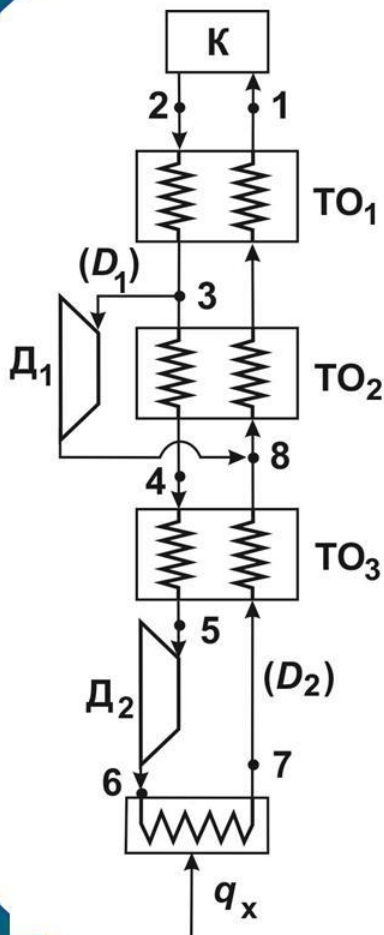
$$q_x = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_{4s}) - (q_c + c_p \Delta T_T)$$

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{к}} - l_{\text{д}} \eta_{\text{мех}} = (RT_1 / \eta_{\text{из}}) \ln \pi_{\text{к}} - h_s \eta_s \eta_{\text{мех}}$$

$$\pi_{\text{к}} = J \pi_{\text{д}}; J = \frac{1 + \Delta p / p}{1 + \Delta p_0 / p_0}; p = p_3; p = p_4; T_5 = T_x - T_{\text{HK}}$$

теоретически можно допустить T_{HK}

Схема криогенной рефрижераторной установки с двумя детандерами



$$q_x = D_1 \Delta h_1 + D_2 \Delta h_2 + (h_1 - h_2)$$

Схема криогенной установки, работающей по циклу высокого давления.

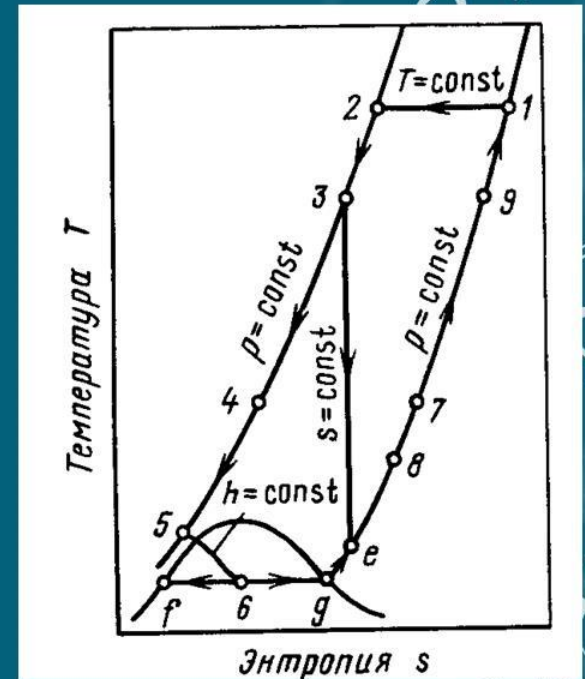
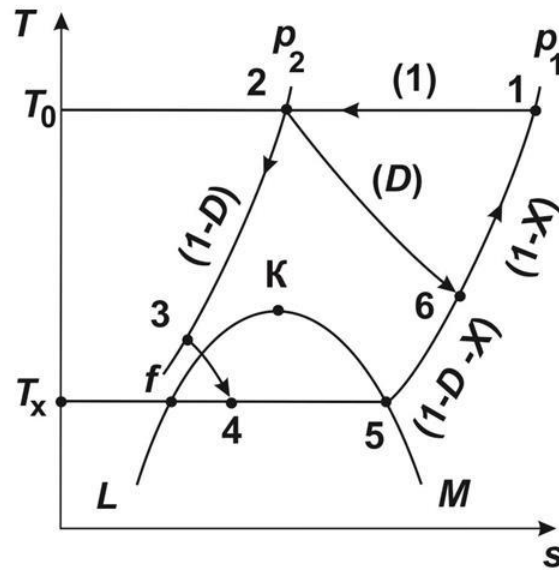
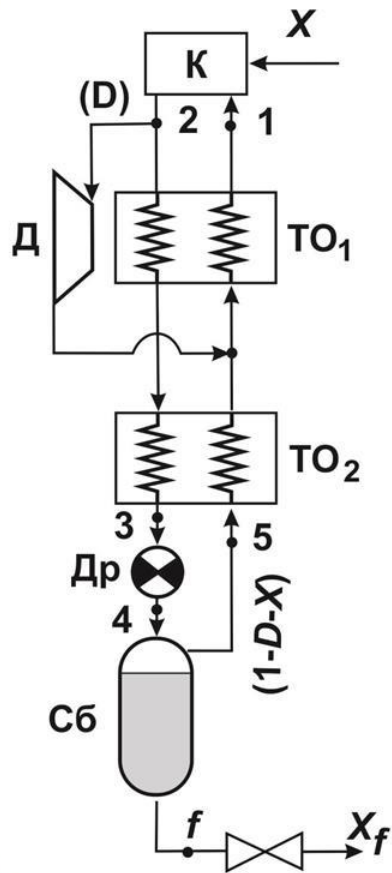


Схема криогенной установки, работающей по циклу низкого давления

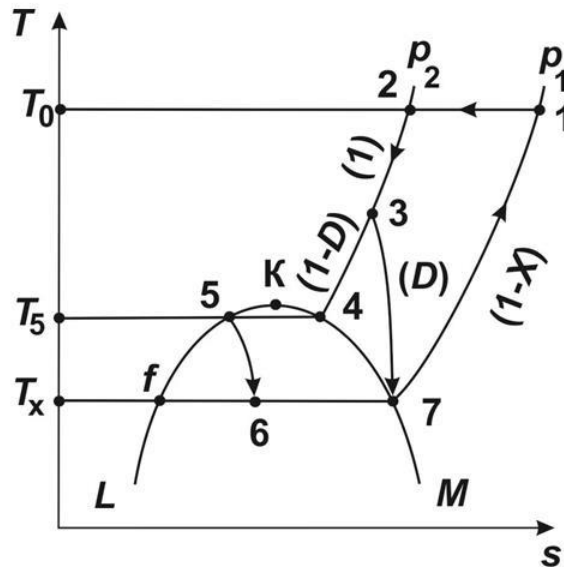
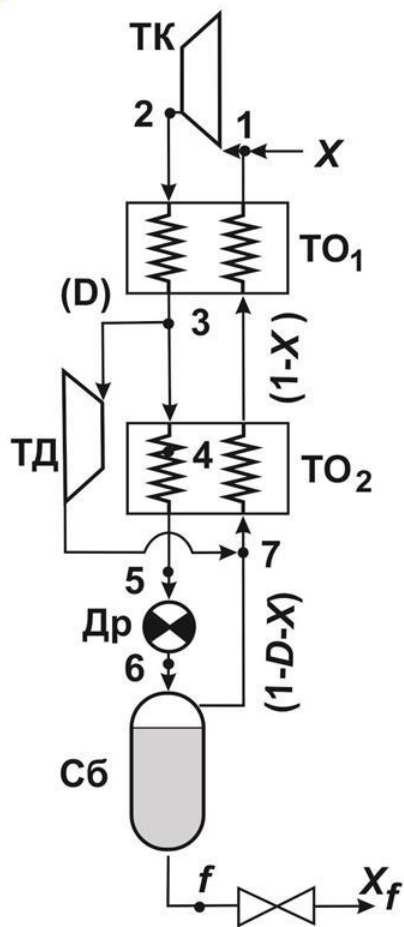


Схема криогенной газовой машины, работающей по циклу Стирлинга

