





**Холодильная техника** – это научная дисциплина и отрасль техники, охватывающая методы получения и использования низких температур (холода)



**Холодильная машина** - устройство, служащее для отвода теплоты от охлаждаемого тела при температуре более низкой, чем температура окружающей среды.



**Холодильная машина** - категория тепловых машин, которые, поглощая энергию, имеют своей целью изъятие тепла от тел с низкой температурой и передачу его телам с более высокой температурой.



**Холодильная установка** - совокупность одной или нескольких холодильных машин и всех узлов, агрегатов, элементов, трубопроводов и жидкостей, необходимых для их функционирования, а также распределения и использования холода.



Лед – твердый



Лед – при поглощении  
тепла принимает жидкую  
форму.



Вода – при поглощении  
тепла принимает  
газообразную форму.



До температуры окружающей среды (атмосферный воздух, вода естественных водоемов, грунт) любое тело можно охладить естественным путем.

Искусственный холод получают двумя способами. Первый основан на аккумуляции естественного холода и относится к области ледяного и льдосоляного охлаждения



В основе действия холодильных машин лежит второй закон (или второе начало) термодинамики, который применительно к холодильным машинам гласит: **для передачи теплоты от менее нагретого тела (холодного) к более нагретому (горячему) необходимо затратить энергию.** Иными словами, чтобы охладить какое-либо тело, необходимо отвести от него теплоту, используя для этого какое либо техническое устройство.

Диапазоны низких температур, от комнатной температуры, условно подразделяют на область умеренно низких (область умеренного холода от +20 до - 120 °С) и криогенных температур (область глубокого холода от - 120 до -273 °С).





Современная техника низких температур условно разделяется на две части, которые отличаются друг от друга только температурным диапазоном работы:

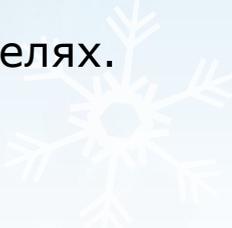
а) криогенная техника;

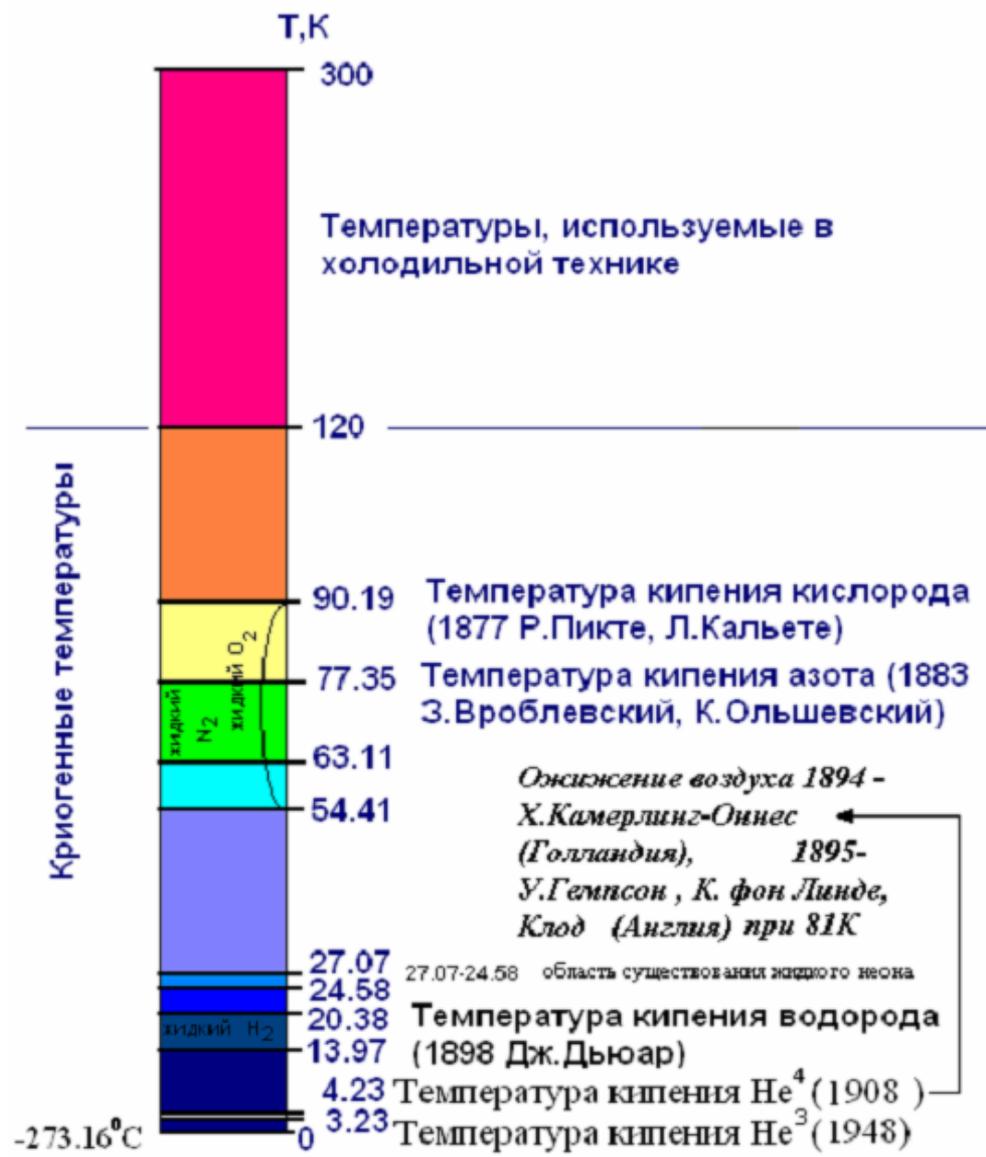
б) холодильная техника (хладотехника).

*Криогенная техника* – это область получения холода с температурой ниже 120 К (-153 °С). Эта граница обусловлена температурой сжижения природного газа (температура сжижения метана -161,30 °С, включена в область криогеники).

Основными рабочими веществами криогенной техники являются воздух и продукты его разделения: азот, кислород, аргон, водород, гелий, криптон, неон, ксенон. Используется эта техника, главным образом, для получения газов из смесей.

*Холодильная техника* используется для получения холода с температурой выше 120 К (от +7 до -153 °С). Этот холод применяется в самых различных целях.





$T < 3\text{K}$   
 глубокий холод, температуры  
 соответствуют энергии  
 реликтового радионизлучения космоса



# Методы получения низких температур

Дросселирование

Расширение с  
совершением  
внешней работы

Эффект Пельтье

Испарение  
жидкостей

Адиабатическое  
размагничивание

Криостат  
растворения





Искусственное получение низких температур основано на различных физических принципах:

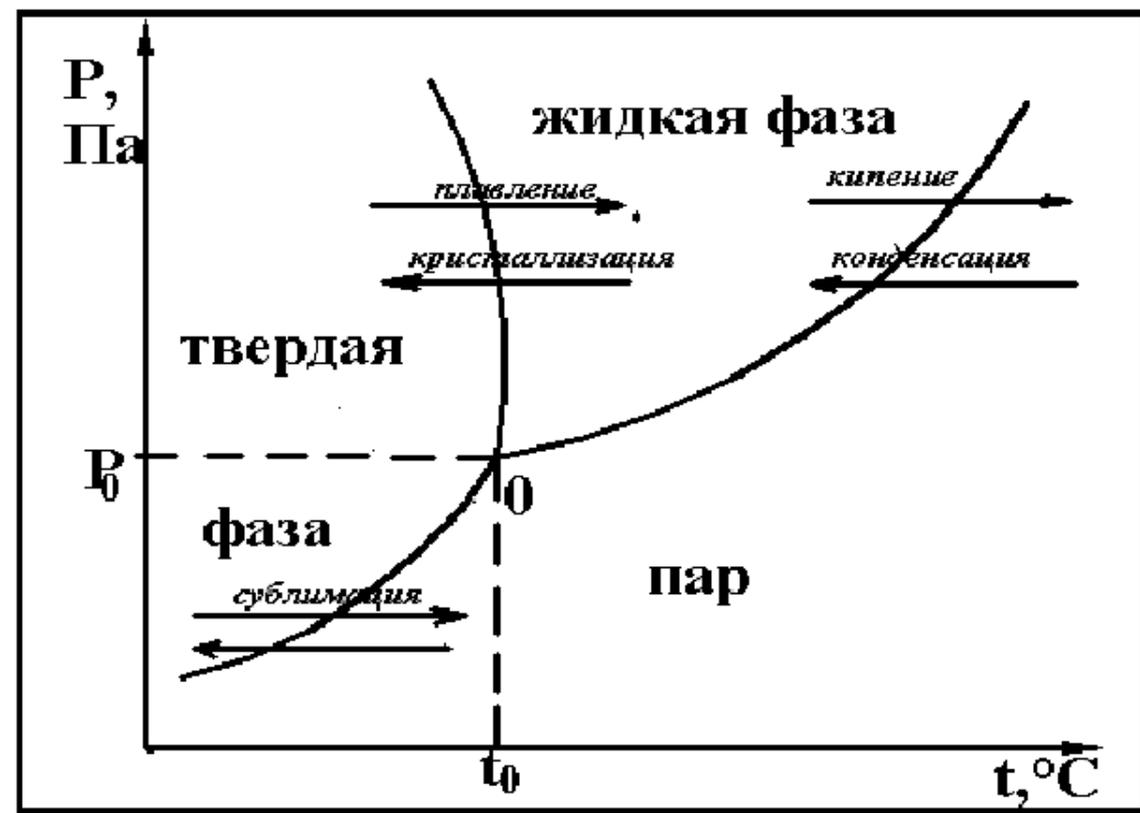
- фазовый переход вещества;
- адиабатическое дросселирование газа;
- адиабатическое расширение газа;
- вихревой эффект;
- термоэлектрический эффект



## Рис. Фазовая диаграмма

К основным физическим процессам, при котором происходит фазовый переход вещества, относят: **плавление, конденсация, испарение, сублимация, кипение.**

Именно эти процессы лежат в основе получения низких температур.



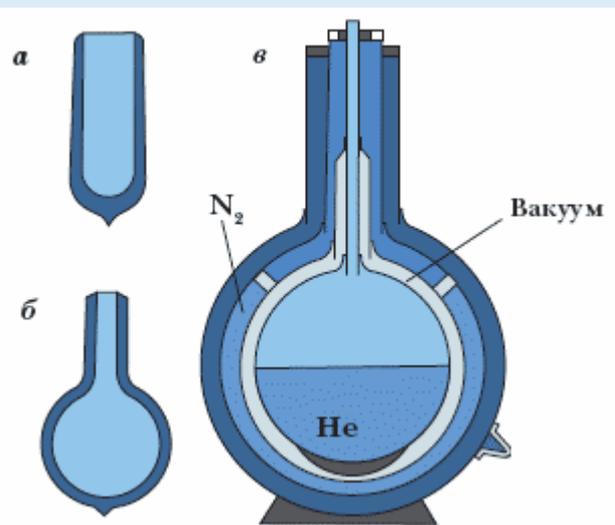
В зависимости от окружающих условий (давления и температуры), вещества могут находиться в одном из трех фазовых (агрегатных) состояний – твердом, жидком и газообразном.

Сублимация – это переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу при поглощении теплоты.

## Испарение жидкостей (Испарительное охлаждение)

Для получения и поддержания низких температур обычно используют сжиженные газы. В сосуде Дьюара, содержащем сжиженный газ, испаряющийся под атмосферным давлением, достаточно хорошо поддерживается постоянная температура нормального кипения хладагента. Наиболее часто используемые хладагенты — жидкий азот и жидкий гелий. Ранее использовавшиеся сжиженные водород и кислород сейчас используются достаточно редко из-за повышенной взрывоопасности испарений. Азот же и гелий практически инертны и опасность представляет только резкое расширение при переходе из жидкого в газообразное состояние.

Снижая давление над свободной поверхностью жидкости можно получить температуру ниже нормальной точки кипения этой жидкости. Например, откачкой паров азота можно добиться температуры до температуры тройной точки 63 К, откачкой паров водорода (над твёрдой фазой) можно добиться температуры 10 К, откачкой паров гелия можно добиться (при очень хороших условиях проведения эксперимента) температуры около 0,7 К.



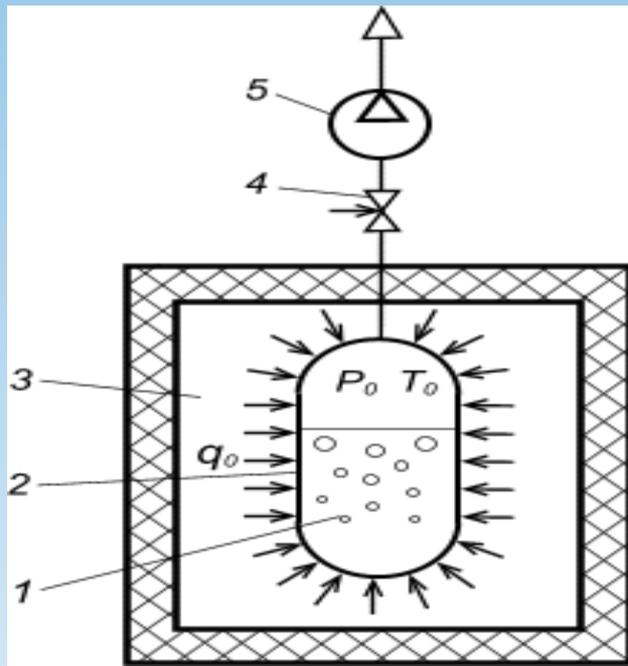


Схема прототипа простейшей холодильной машины:

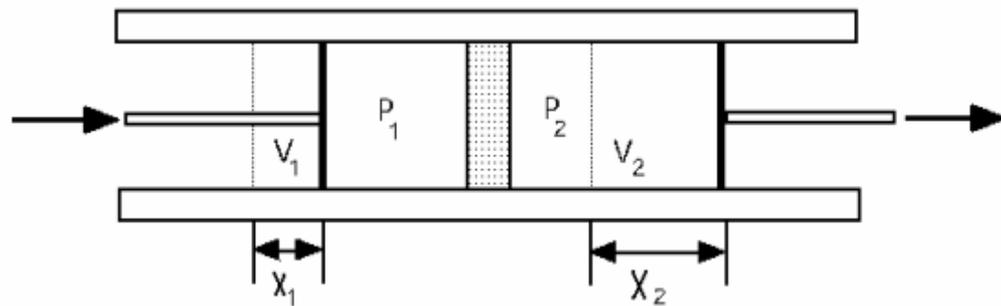
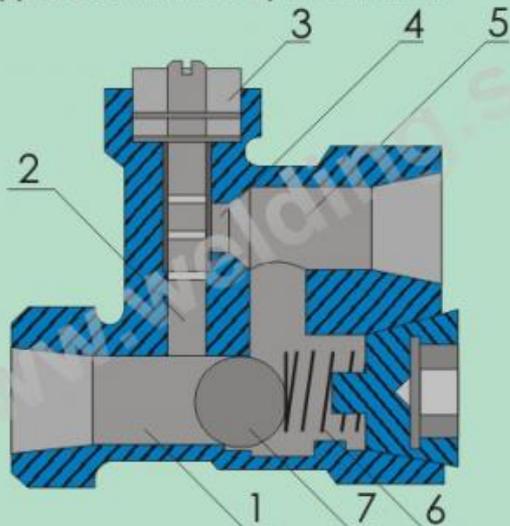
1 – кипящее рабочее тело (хладагент); 2 – испаритель; 3 – холодильная камера; 4 – регулировочный вентиль; 5 – компрессор

Охлаждение жидкости достигается уменьшением давления равновесного пара над поверхностью жидкости, то есть вакуумированием парового пространства

**Это самый простой и самый экономичный способ получения холода.**

# ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

## ДРОССЕЛИРУЮЩИЙ КЛАПАН



## Схема эффекта Джоуля-Томсона

При протекании через сужение проходного канала трубопровода — дроссель, либо через пористую перегородку происходит понижение давления газа или пара вместе с понижением его температуры. Эффект дросселирования используется главным образом для глубокого охлаждения и сжижения газов.

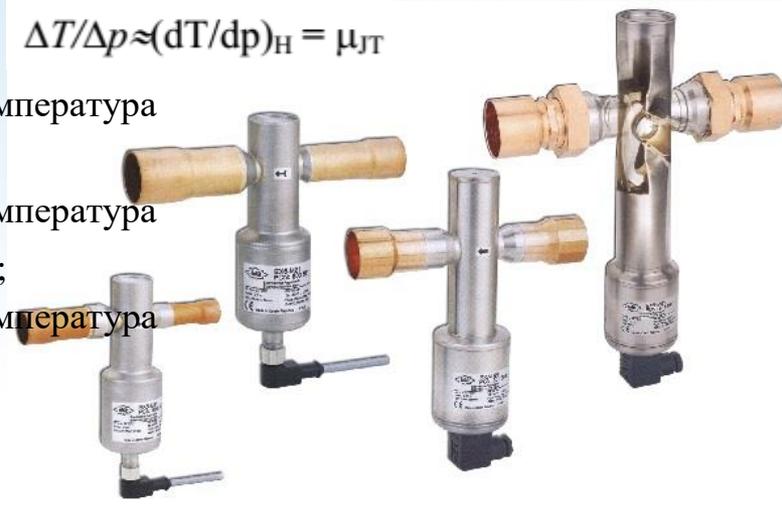
Изменение температуры при малом изменении давления в результате процесса Джоуля-Томсона определяется производной, называемой коэффициентом Джоуля-Томсона.

$$\Delta T / \Delta p \approx (dT/dp)_H = \mu_{JT}$$

1) если  $(\partial v / \partial T)_p < v/T$ , то  $\alpha_h < 0$ , и тогда при дросселировании температура рабочего вещества возрастает (отрицательный дроссельный эффект);

2) если  $(\partial v / \partial T)_p > v/T$ , то  $\alpha_h > 0$ , и тогда при дросселировании температура рабочего вещества понижается (положительный дроссельный эффект);

3) если  $(\partial v / \partial T)_p = v/T$ , то  $\alpha_h = 0$ , и тогда при дросселировании температура рабочего вещества не меняется (точка инверсии).



В устройствах, работающих лишь за счет эффекта Джоуля – Томсона, охлаждение сравнительно мало. Основным преимуществом таких устройств по сравнению с детандерами является отсутствие движущихся деталей, необходимых для совершения механической работы.

На промышленных предприятиях, а также и в лабораторных установках часто комбинируют оба метода, производя первоначальное охлаждение газа с помощью детандера, а последующее ожижение охлажденного газа – методом Джоуля – Томсона.

*Дросселирование* (эффект Джоуля – Томпсона). Заключается в падении давления и снижении температуры потока жидкости при его протекании через суженное сечение под воздействием разности давлений. Поток жидкости проходит очень быстро суженное пространство с большой скоростью, в результате чего внешняя работа не совершается, т.к. работа проталкивания переходит в теплоту трения между молекулами и не происходит теплообмена с окружающей средой. Это приводит к испарению части потока жидкости и снижению температуры всего потока. Процесс происходит в регулирующем вентиле или другом дроссельном механизме (капиллярной трубке) холодильной машины. Данный процесс используется в парокомпрессионных холодильных машинах. На рис. а) показан процесс дросселирования, где  $P_k$  - давление конденсации,  $P_n$  - давление кипения хладагента,  $P_k > P_n$ .



Расширение газа с совершением внешней работы. Если на пути потока газа,двигающегося под воздействием разности давлений, поставить специальное устройство, где поток газа будет вращать колесо (или толкать поршень), то энергия потока будет совершать внешнюю, полезную работу. После этого устройства с понижением давления температура потока газа снижается. Этот способ охлаждения применяется в воздушных и газовых холодильных машинах для получения температур от  $-50$  до  $-100$  °С. На рис. б) показан процесс расширения газа с совершением внешней работы,  $P_1 > P_2$ .

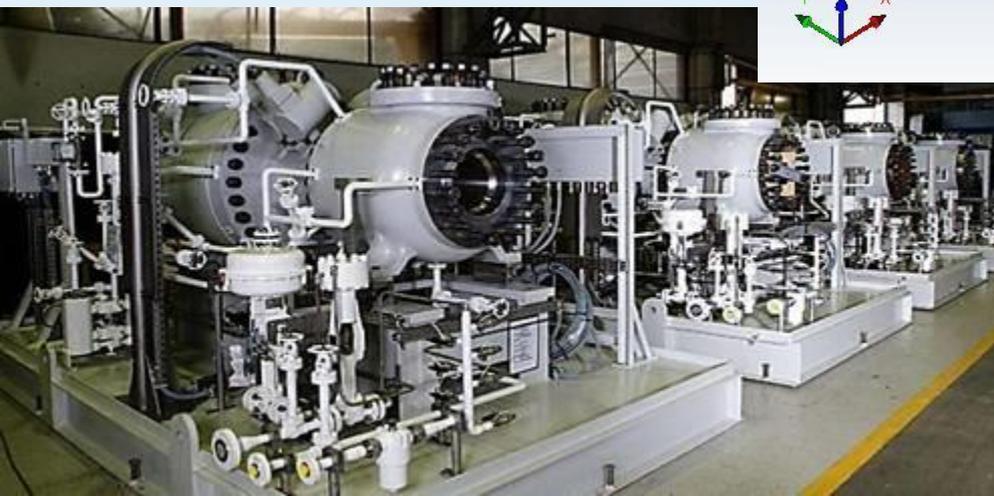
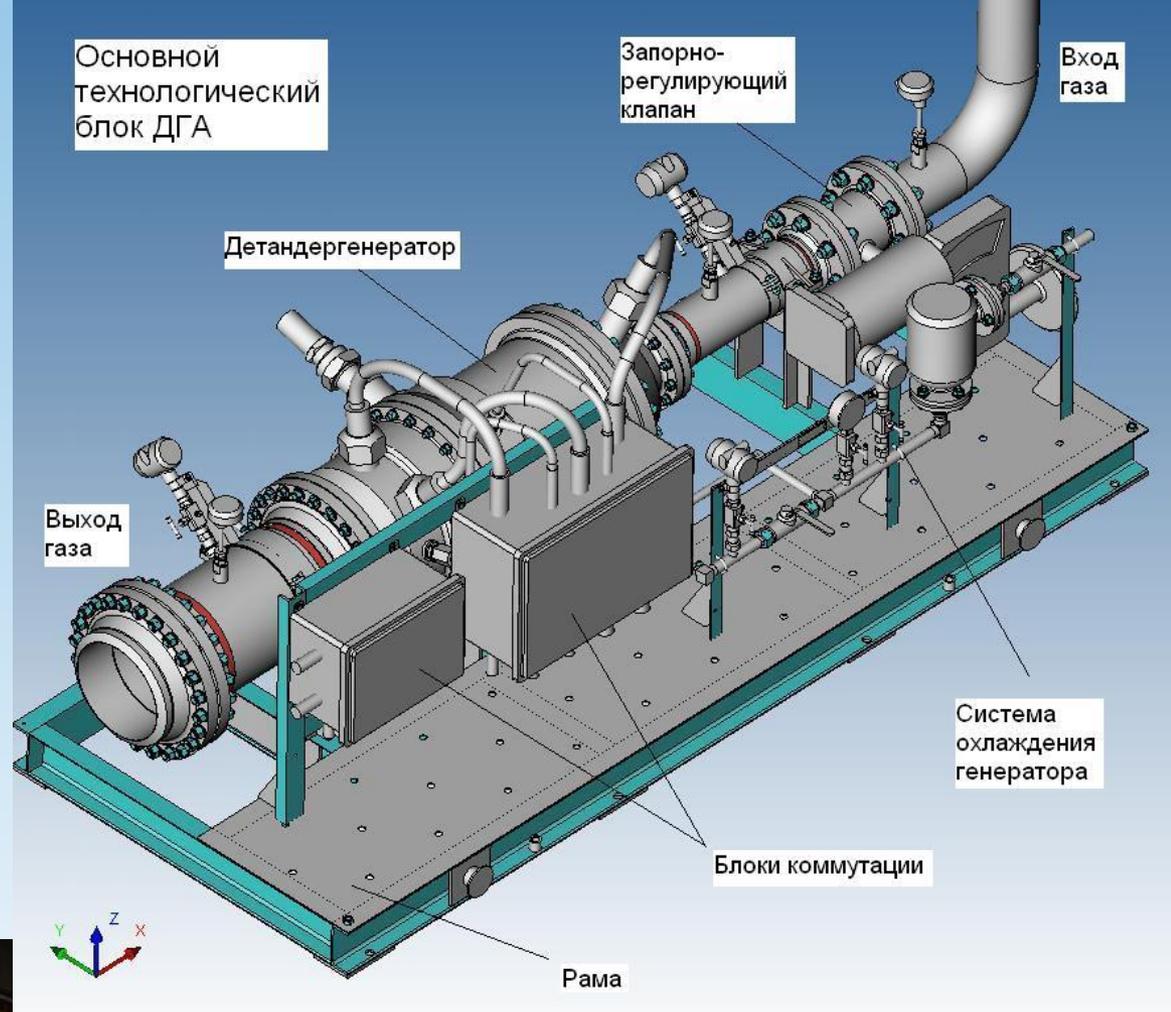


Рис. . а) процесс дросселирования; б) процесс расширения газа с совершением внешней работы

Одним из наиболее простых охлаждающих устройств является *поршневой детандер* в котором сжатый газ может адиабатически расширяться, перемещая поршень и совершая работу против внешних сил. В *турбодетандере* механическая работа затрачивается на вращение турбины. Если при расширении давление газа изменилось от  $P_1$  до  $P_2$ , а первоначальная температура была равна  $T_1$ , то температуру газа после расширения  $T_2$  можно определить из соотношения :



Турбодетандеры





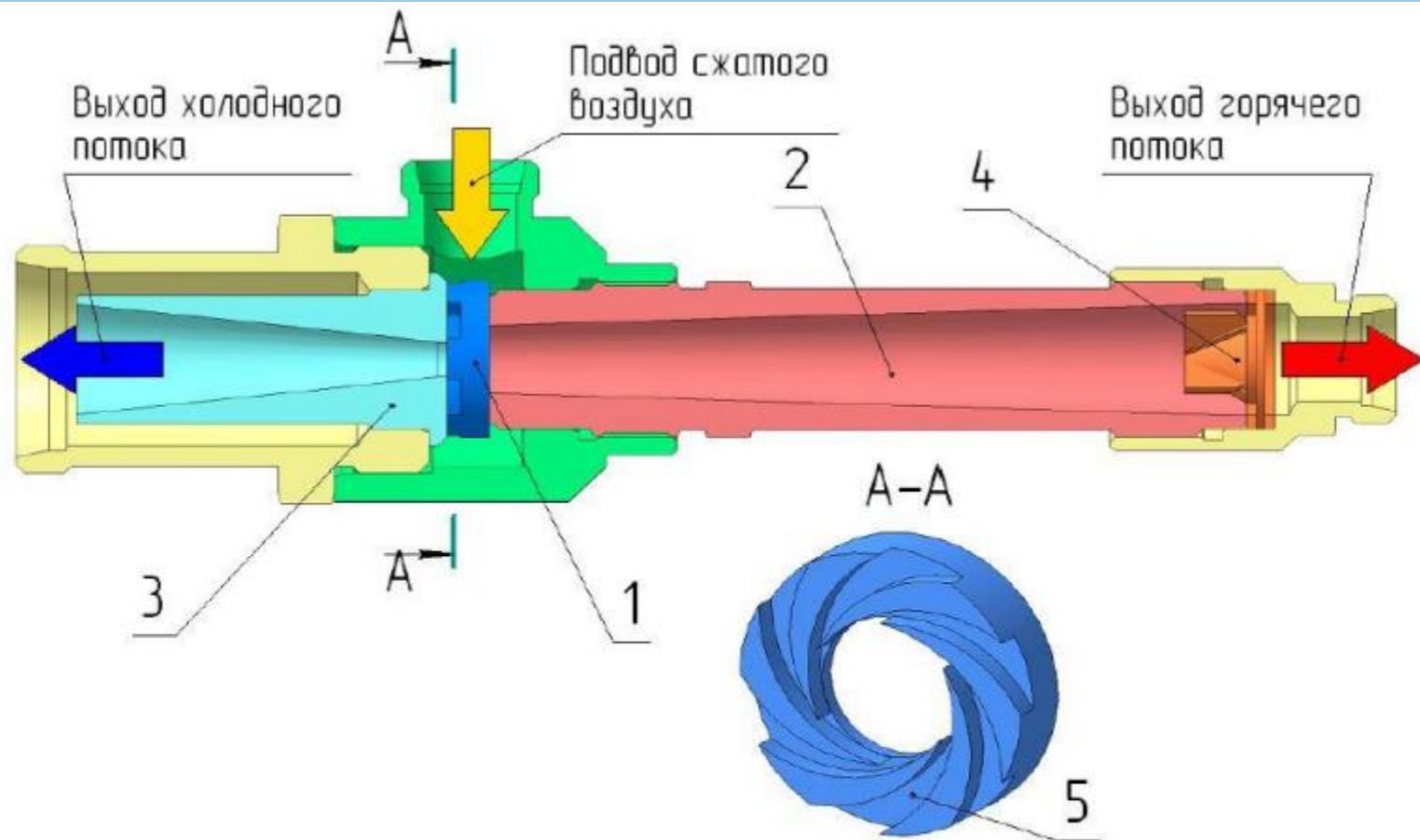
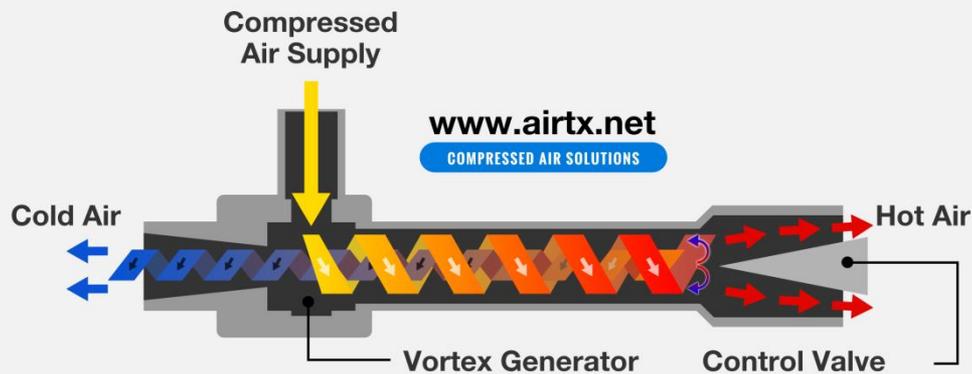


Рис. 1. Схема вихревой трубы [3]:

1 – сопловой ввод; 2 – камера энергоразделения; 3 – диффузор холодного потока; 4 – развихритель горячего потока; 5 – сопловой сужающийся канал.



При движении потока газа или жидкости по плавно поворачивающейся поверхности трубы у её внешней стенки образуется область повышенного давления и температуры, а у внутренней (либо в центре полости, если газ закручен по поверхности цилиндрического сосуда) — область пониженной температуры и давления. Это достаточно хорошо известное явление называется эффектом Ранка по имени открывшего его в 1931 г. французского инженера Жозефа Ранка, или эффектом Ранка-Хилша (немец Robert Hilsh продолжил исследование этого эффекта во второй половине 1940-х годов и улучшил эффективность вихревой трубы Ранка). Конструкции, использующие эффект Ранка, представляют собой разновидность теплового насоса, энергия для функционирования которого берётся от нагнетателя, создающего поток рабочего тела на входе трубы.

Парадоксальность эффекта Ранка заключается в том, что центробежные силы во вращающемся потоке направлены наружу. Как известно, более тёплые слои газа или жидкости имеют меньшую плотность и должны подниматься вверх, а в случае центробежных сил — стремиться к центру, более холодные имеют большую плотность и, соответственно, должны стремиться к периферии. Между тем при большой скорости вращающегося потока всё происходит с точностью до наоборот!

Эффект Ранка проявляется как для потока газа, так и для потока жидкости, которая, как известно, является практически несжимаемой и потому фактор адиабатического сжатия / расширения к ней неприменим. Тем не менее, в случае жидкости эффект Ранка обычно выражен значительно слабее — возможно, именно по этой причине, да и очень малая длина свободного пробега частиц затрудняет его проявление. Но это верно, если оставаться в рамках традиционной молекулярно-кинетической теории, а у эффекта могут быть и совсем другие причины.

Можно выделить следующие достоинства вихревых труб по сравнению с парокompрессионными машинами:

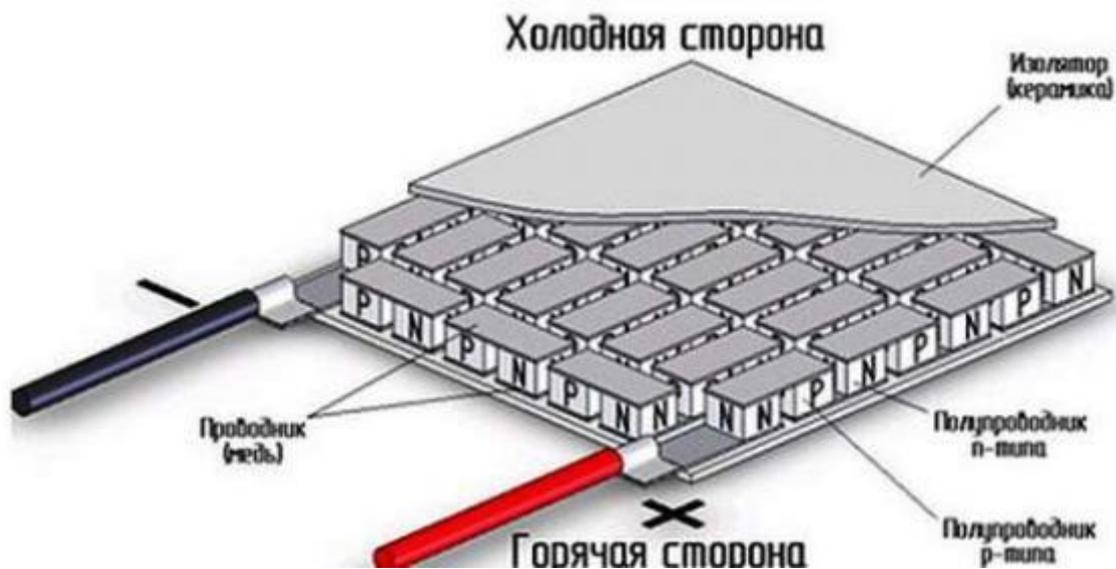
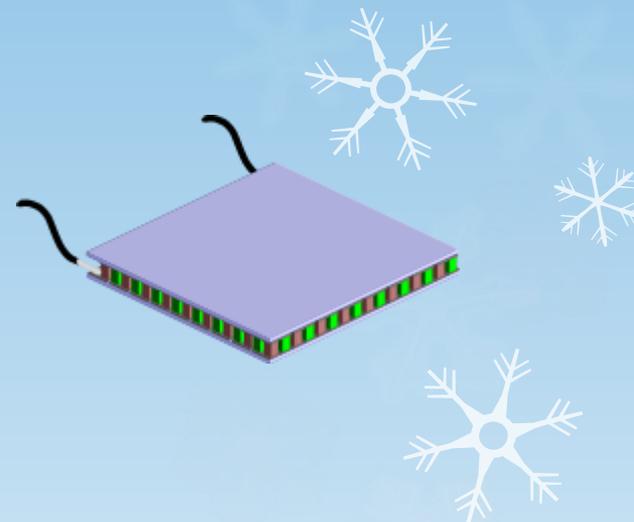
1. отсутствие необходимости в хладагентах и теплоносителях;
2. простота конструкции, компактность;
3. дешевизна изготовления, простота обслуживания и ремонта;
4. отсутствие подвижных узлов и, как следствие, высокая надежность;
5. высокая скорость выхода на рабочий режим;
6. возможность осуществления нескольких процессов одновременно (охлаждение, нагрев, фазоотделение).

К недостаткам указанного способа получения холода можно отнести:

1. относительно низкая энергетическая эффективность;
2. необходимость использования мощного компрессора для получения низких температур.

## ЖАН ШАРЛЬ АТАНАЗ ПЕЛЬТЬЕ

Жан Шарль Пельтье (фр. Jean-Charles Peltier, 22 февраля 1785, Хам (Франция) — 27 октября 1845, Париж) — французский физик. Труды по термоэлектричеству, электромагнетизму, метеорологии.



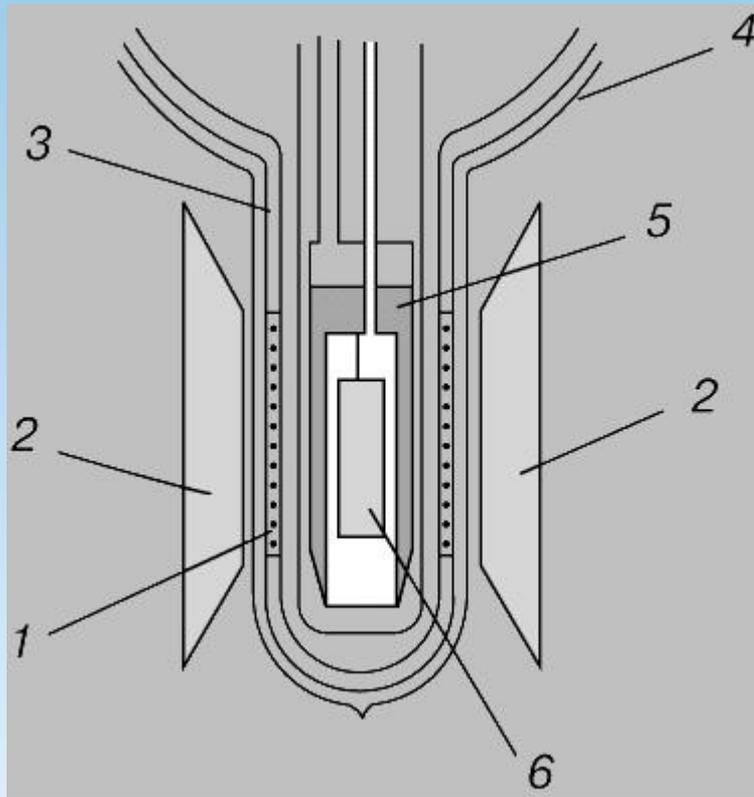
Первые холодильная машина появились в середине XIX в. Одна из старейших холодильных машин - абсорбционная. Её изобретение и конструктивное оформление связано с именами Дж. Лесли (Великобритания, 1810), Ф. Карре (Франция, 1850) и Ф. Виндхаузена (Германия, 1878). Первая парокомпрессионная машина, работавшая на эфире, построена Дж. Перкинсом (Великобритания, 1834). Позднее были созданы аналогичные машины с использованием в качестве хладагента метилового эфира и сернистого ангидрида. В 1874 К. Линде (Германия) построил аммиачную парокомпрессионную холодильную машину, которая положила начало холодильному машиностроению.

**Таблица 1 Температуры кипения жидких хладагентов  
(при нормальном давлении)**



Жидкий хладагент	Гелий He	Водород H <sub>2</sub>	Неон Ne	Азот N <sub>2</sub>	Аргон Ar	Кислород O <sub>2</sub>
<u>Температура</u> кипения, К	4,224	20,28	27,108	77.36	87,29	90,188

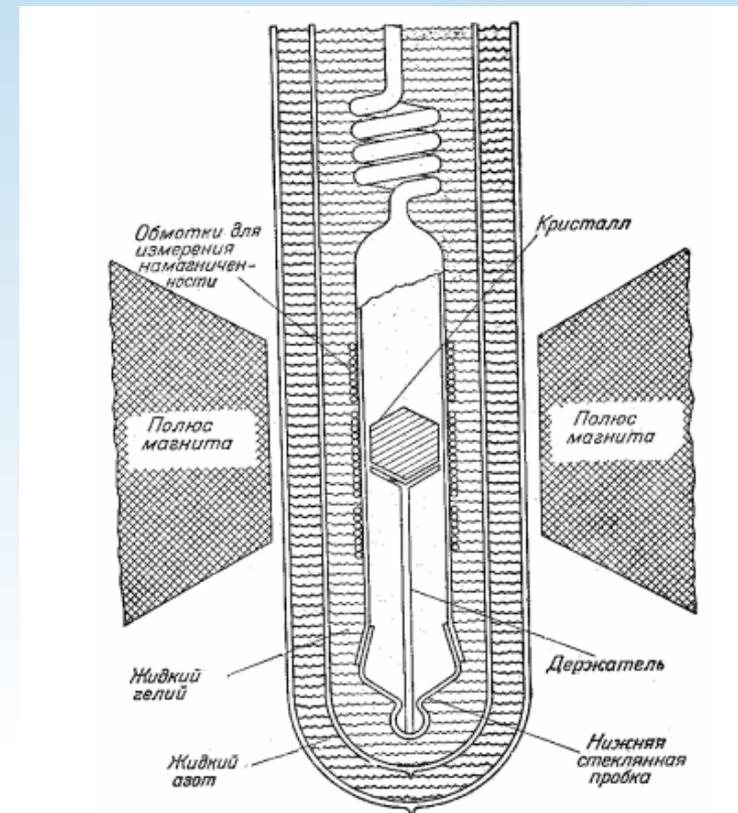


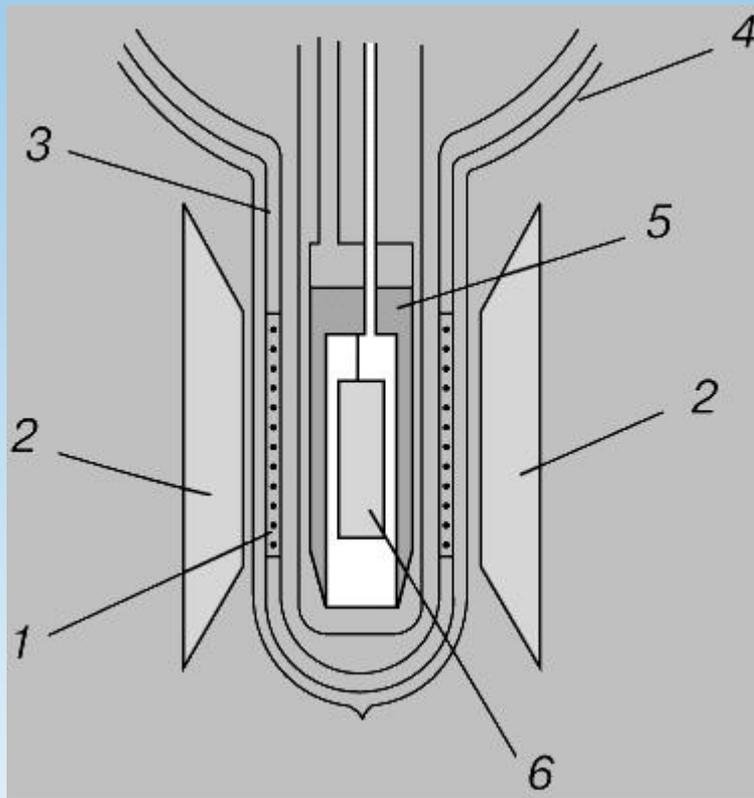


## МЕТОД МАГНИТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (Адиабатическое размагничивание)

- 1 - витки магнитного термометра;
- 2 - полюсные наконечники магнита;
- 3 - жидкий водород;
- 4 - сосуд Дьюара;
- 5 - жидкий гелий;
- 6 - парамагнитная соль.

**Адиабатическое размагничивание** — метод получения температур ниже 0,7 К.

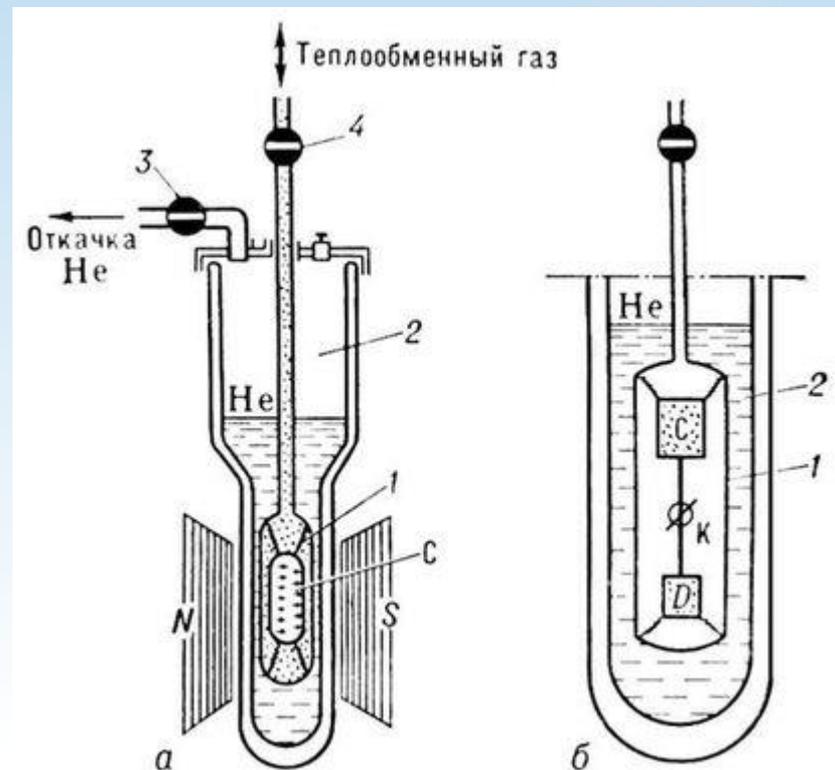


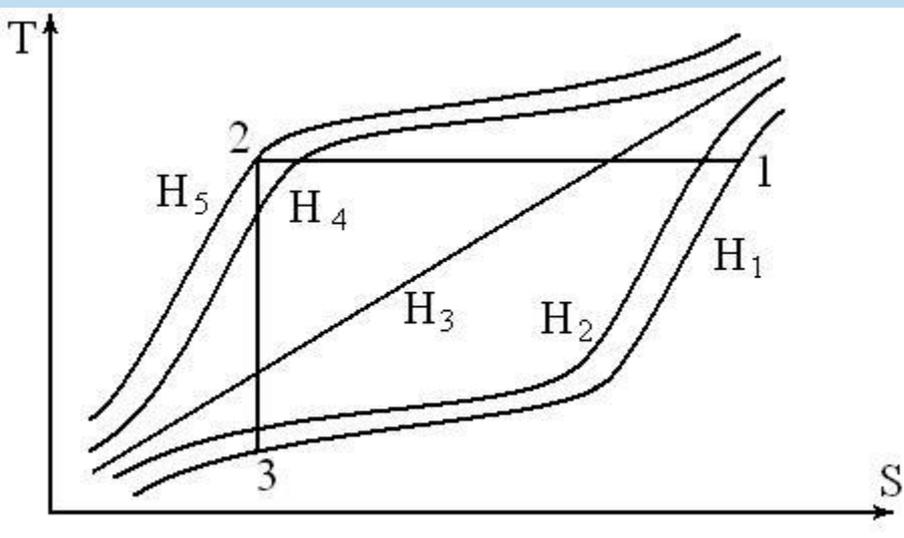
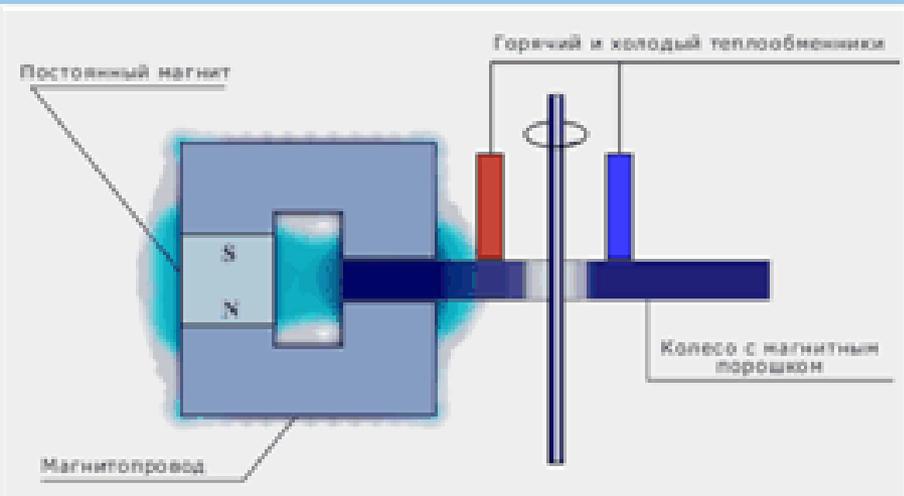


## МЕТОД МАГНИТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (Адиабатическое размагничивание)

- 1 - витки магнитного термометра;
- 2 - полюсные наконечники магнита;
- 3 - жидкий водород;
- 4 - сосуд Дьюара;
- 5 - жидкий гелий;
- 6 - парамагнитная соль.

**Адиабатическое размагничивание** — метод получения температур ниже 0,7 К.





Первоначально вокруг парамагнетика создаётся магнитное поле при этом парамагнетик намагничивается от первоначальной  $H_1$  до конечной  $H_5$  в ходе процесса 1-2. Для отвода теплоты намагничиваемости используется охлаждающая среда (парообразный гелий). После полной намагничиваемости магнитное поле снимается и прекращается подача охлаждающей среды. Парамагнетик начинает размагничиваться от конечной намагниченности  $H_5$  до начальной  $H_1$ , его температура резко падает в ходе процесса 2-3.

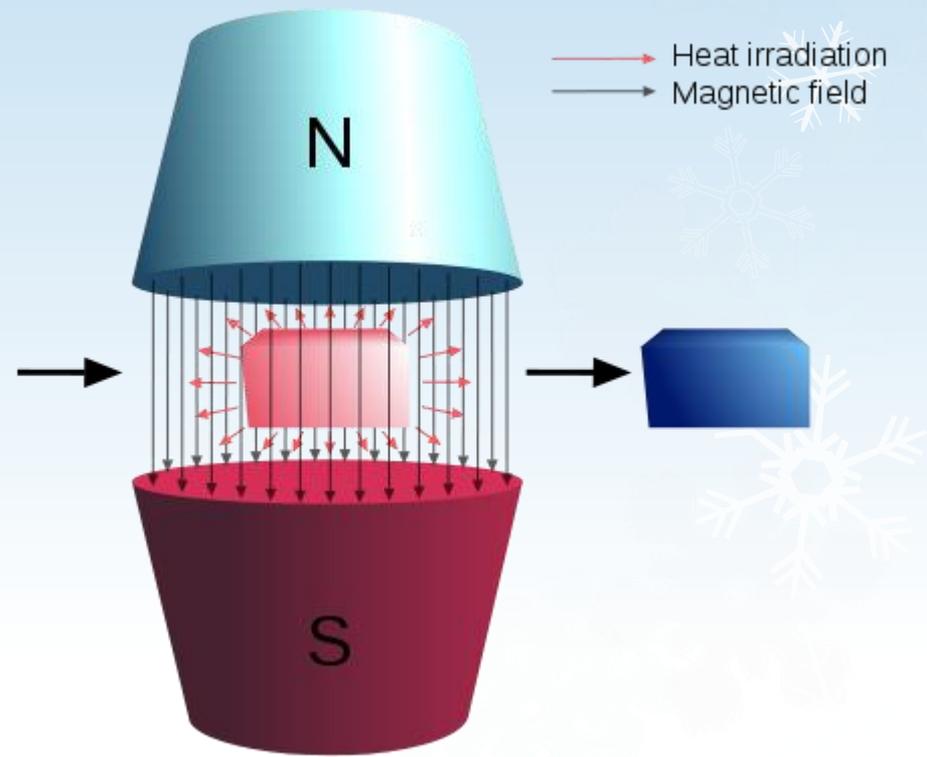
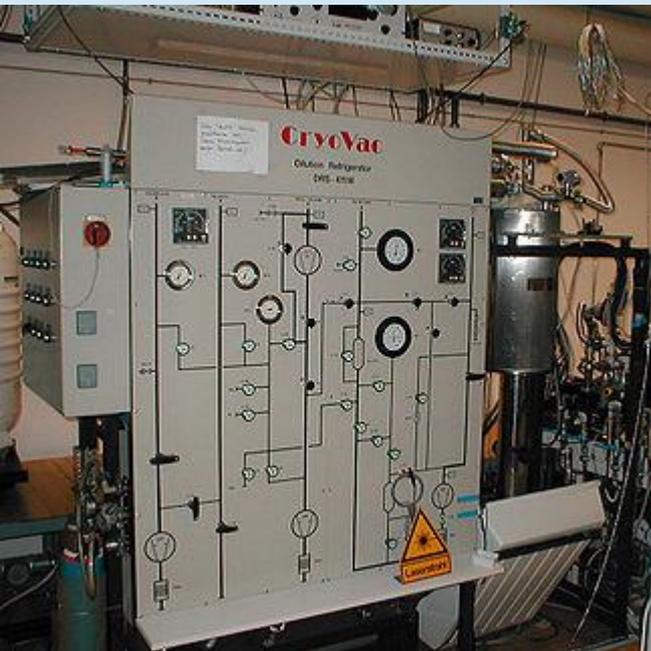


Рисунок 2.7 – Процесс адиабатного размагничивания.

# Криостат растворения (Рефрижератор растворения)

Рефрижераторы растворения с непрерывным циклом обычно используются в низкотемпературных физических экспериментах.



Рефрижератор растворения — криогенное устройство, впервые предложенное Хайнцем Лондоном. В процессе охлаждения используется смесь двух изотопов гелия: He-3 и He-4.

В 1960 было высказано предположение, что получать и сколь угодно долго поддерживать температуры порядка  $10^{-3}$  К можно путем растворения жидкого гелия-3 в жидком гелии-4.

Классификация холодильных машин (ХМ)

**Классификация ХМ производится по различным признакам.**

1. В зависимости от вида физического процесса, в результате которого получают холод, ХМ подразделяют на следующие типы:

а) холодильные машины использующие фазовый переход рабочего тела (ХА) из жидкого в парообразное состояние. К ним относятся парокompрессионные, абсорбционные, эжекторные ХМ;

б) холодильные машины использующие процессы расширения с производством внешней работы. Это воздушные детандерные машины, так называемые турбохолодильные машины (ТХМ);

в) ХМ использующие процесс расширения воздуха без производства работы (эффект Ранка-Хильша). Это воздушные вихревые холодильные машины;

г) ХМ использующие эффект Пельтье. Это термоэлектрические холодильники.

**2. В зависимости от вида используемой энергии различают холодильные машины:**

а) использующие механическую энергию (компрессионные холодильные машины с электрическим и турбинным приводами);

б) теплоиспользующие (абсорбционные и эжекторные холодильные машины);

в) с непосредственным использованием электрической энергии (термоэлектрические холодильные машины).

# Классификация ХМ производится по различным признакам.

В зависимости от вида физического процесса

В зависимости от вида используемой энергии различают холодильные машины

холодильные машины использующие фазовый переход рабочего тела (ХА) из жидкого в парообразное состояние. К ним относятся парокompрессионные, абсорбционные, эжекторные ХМ;

холодильные машины использующие процессы расширения с производством внешней работы. Это воздушные детандерные машины, так называемые турбохолодильные машины (ТХМ);

ХМ использующие процесс расширения воздуха без производства работы (эффект Ранка-Хильша). Это воздушные вихревые холодильные машины;

ХМ использующие эффект Пельтье. Это термоэлектрические холодильники. машины;

теплоиспользующие (абсорбционные и эжекторные холодильные машины);

использующие механическую энергию (компрессионные холодильные машины с электрическим и турбинным приводами);

с непосредственным использованием электрической энергии (термоэлектрические холодильные машины).

## Основные понятия и определения

Рабочее вещество посредством которого в холодильной машине осуществляется отвод теплоты от охлаждаемой среды называется *холодильным агентом (хладоагентом)*.

Количество теплоты, отводимое в единицу времени искусственным охлаждением, называется *холодопроизводительностью холодильной машины*  $Q_0$  (Вт).

Холодопроизводительность, отнесенная к единице массы хладагента, называется его *удельной массовой холодопроизводительностью*  $q_0$  (кДж/кг).

Удельная массовая холодопроизводительность, отнесенная к единице объема, называется *объемной холодопроизводительностью* хладагента  $q_v$  (кДж/м<sup>3</sup>):

$$q_v = \frac{q_0}{v},$$

где  $v$  - удельный объем сухого насыщенного или перегретого пара, м<sup>3</sup>/кг.

Исходными данными для расчёта холодильной установки является количество холода, которое она должна выработать. Оно зависит от режима работы установки, который определяется четырьмя основными температурами.

Температура испарения холодильного агента  $t_0$ , которая для обеспечения теплопередачи в испарителе принимается на 4...6°C ниже средней температуры охлаждаемого воздуха или промежуточного холодоносителя (воды, рассола). Температура испарения обусловлена заданным процессом термовлажностной обработки воздуха в кондиционере и определяется по формуле

$$t_0 = \frac{t_{w_k} + t_{w_H}}{2} - (4 \div 6),$$

где  $t_{w_H}$  и  $t_{w_k}$  – температура воды соответственно на входе и на выходе из испарителя, °C.

Температура всасывания паров хладагента в цилиндр компрессора (температура перегрева)  $t_{вс}$ . Для обеспечения «сухого хода» компрессора она принимается для хладоновых машин на 15...30°C, а для аммиака на 5...10°C выше температуры испарения в зависимости от режима работы, т.е.

$$t_{вс} = t_0 + (15 \div 30) \text{ или } t_{вс} = t_0 + (5 \div 10)$$

Температура конденсации хладагента  $t_k$ , которая для обеспечения теплопередачи в конденсаторе должна быть на  $3...5^\circ\text{C}$  выше средней температуры среды, охлаждающей конденсатор. В большинстве случаев для охлаждения конденсаторов проектируют системы оборотного водоснабжения с вентиляторными градирнями либо брызгальными бассейнами. Воздушное охлаждение конденсаторов применяется только для машин с небольшой холодопроизводительностью. Подогрев охлаждающей воды в конденсаторе обычно принимают в пределах  $3...5^\circ\text{C}$ . Температуру конденсации паров холодильного агента в конденсаторе определяют по формуле

$$t_k = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} + (3 \div 5),$$

где  $t_{w1}$  и  $t_{w2}$  – температура среды соответственно на входе и на выходе из конденсатора,  $^\circ\text{C}$ .

Температура переохлаждения жидкого хладагента перед регулирующим вентилем  $t_{n.охл}$ , которая принимается на  $3...5^\circ\text{C}$  ниже температуры конденсации

$$t_{n.охл} = t_k - (3 \div 5).$$

# Тепловые диаграммы

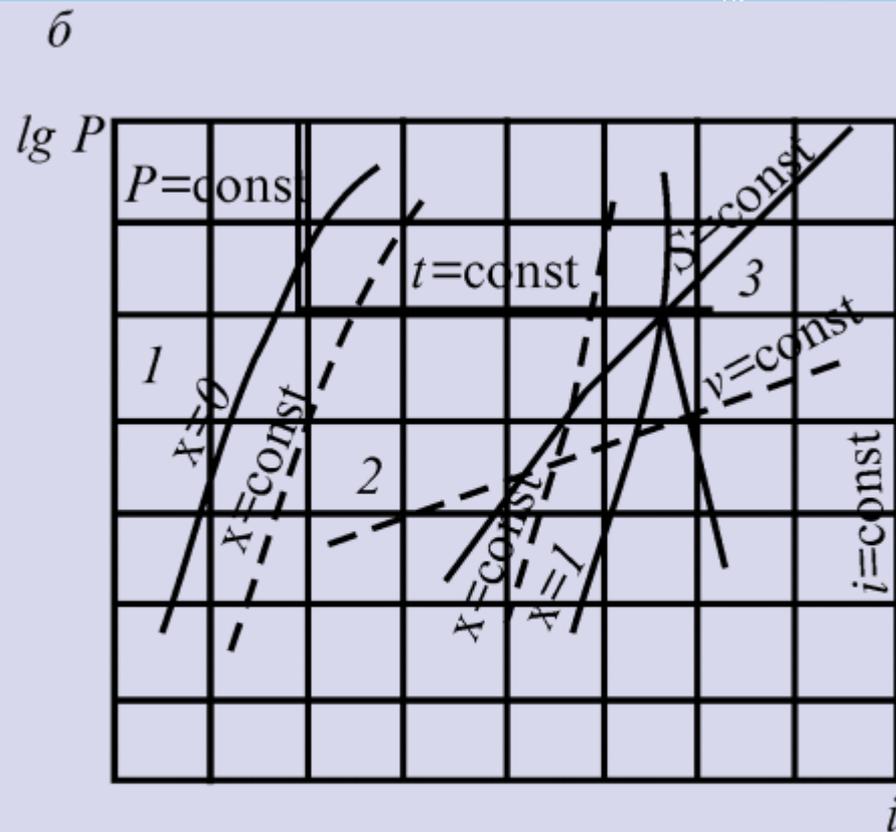
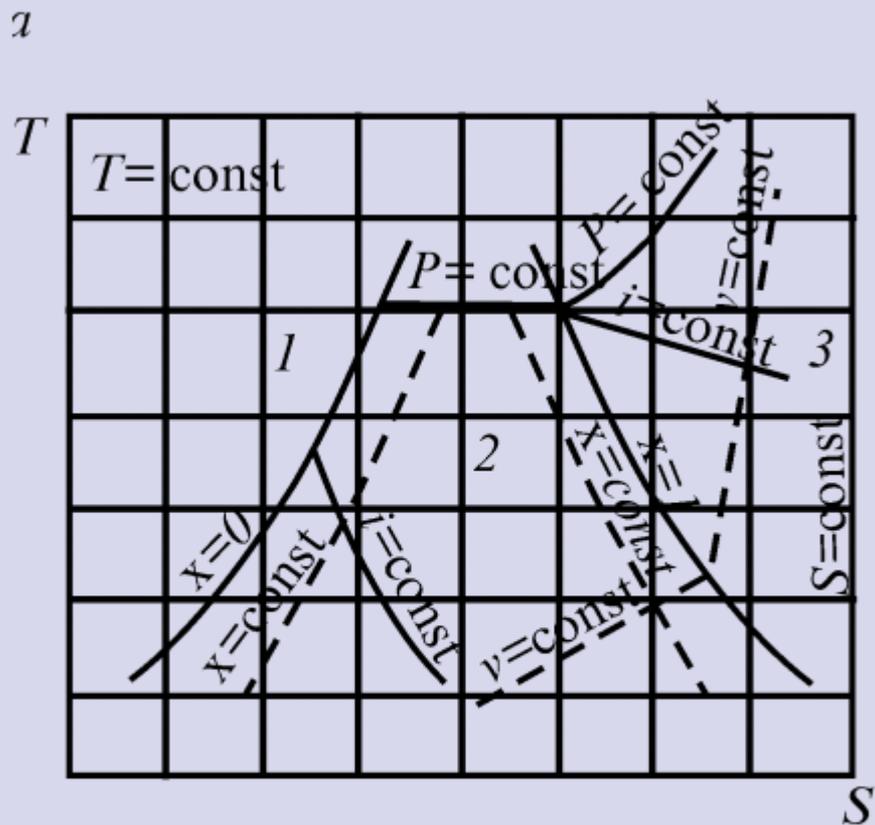
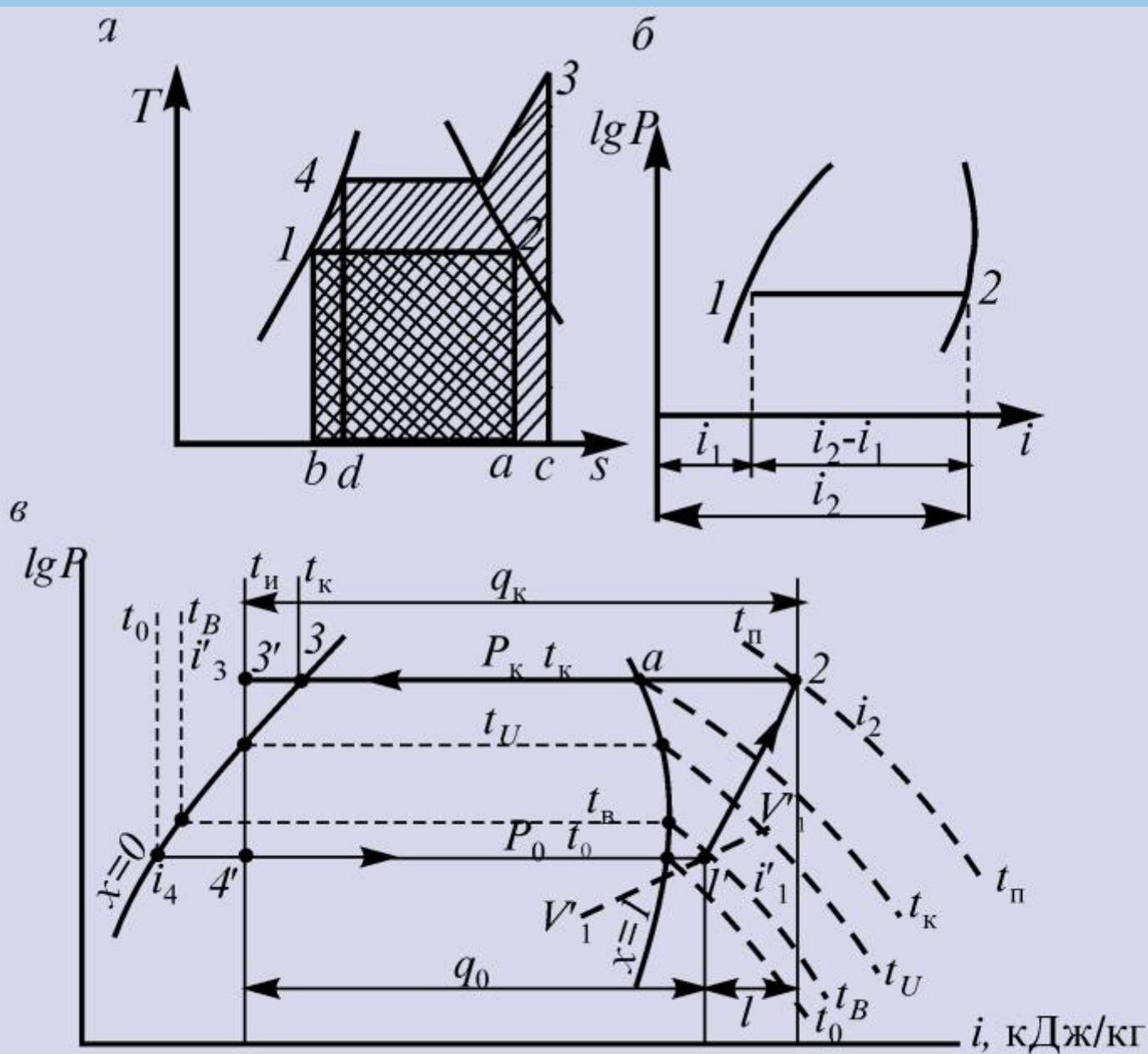


Рис. 1.7. Тепловые диаграммы: *a*— $S$ — $T$ ; *б*— $i$ — $\lg p$

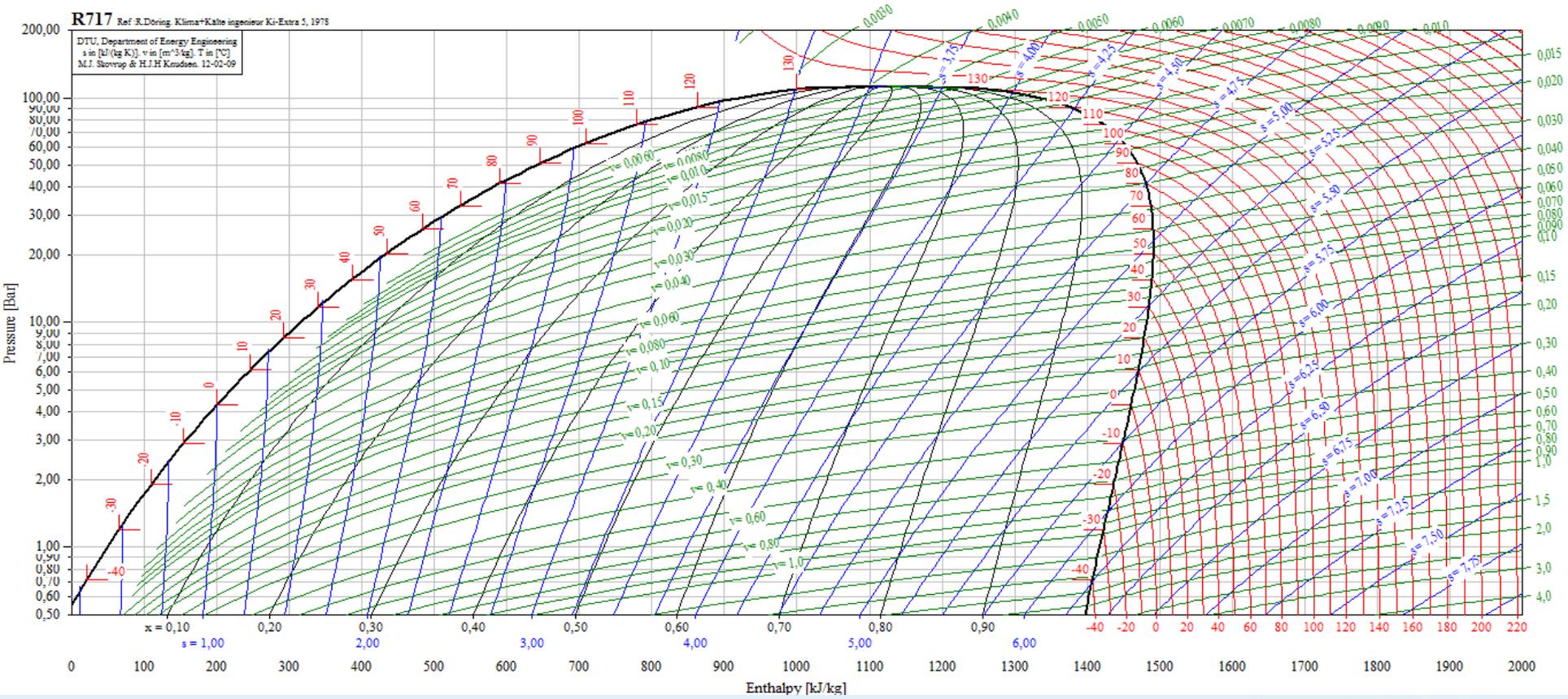




Изображение количества теплоты в диаграммах:  $S-T$  (а);  $i-\lg P$  (б)

# R717 Ref. R.Döring, Klima+Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1973

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 12-02-09





По температурному уровню, с которого производят отвод теплоты, холодильные машины всех типов подразделяют на:

- высокотемпературные (диапазон охлаждения от  $-10$  до  $+20$  °С);
- среднетемпературные (от  $-30$  до  $-10$  °С);
- низкотемпературные (ниже  $-30$  °С).

По тепловой мощности — холодопроизводительности для холодильных машин принята условная градация: малая до 15 кВт, средняя 15—120 кВт и большая свыше 120 кВт.

Сравнение паровых холодильных машин по этому показателю проводят по значению стандартной холодопроизводительности, которое соответствует стандартным температурам кипения и конденсации рабочего тела  $-15$  и  $+30$  °С.



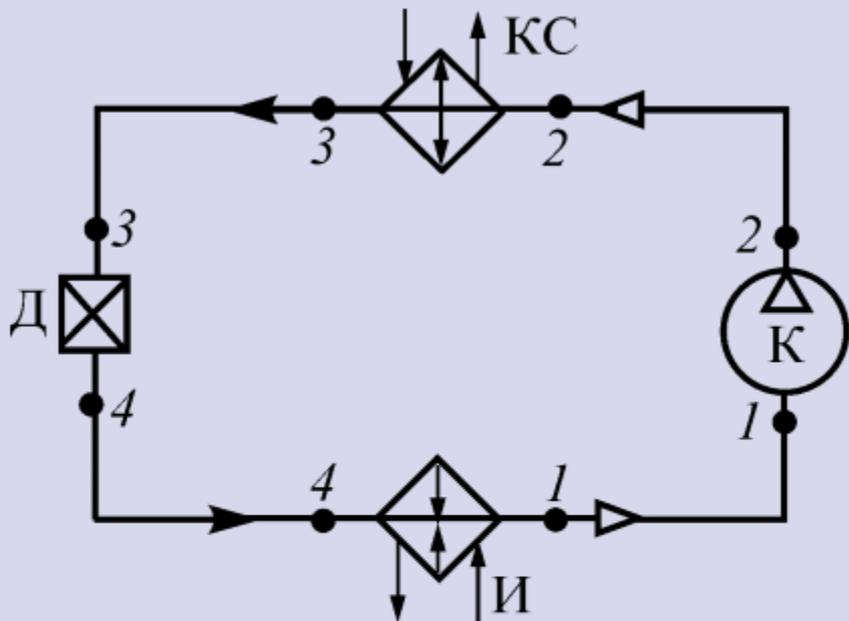


Рис. 1.9. Принципиальная схема паровой компрессорной холодильной машины



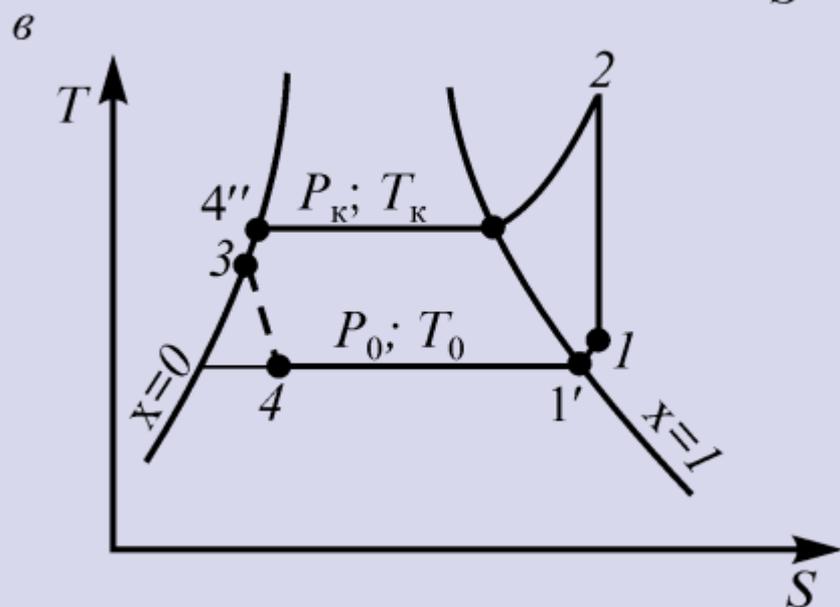
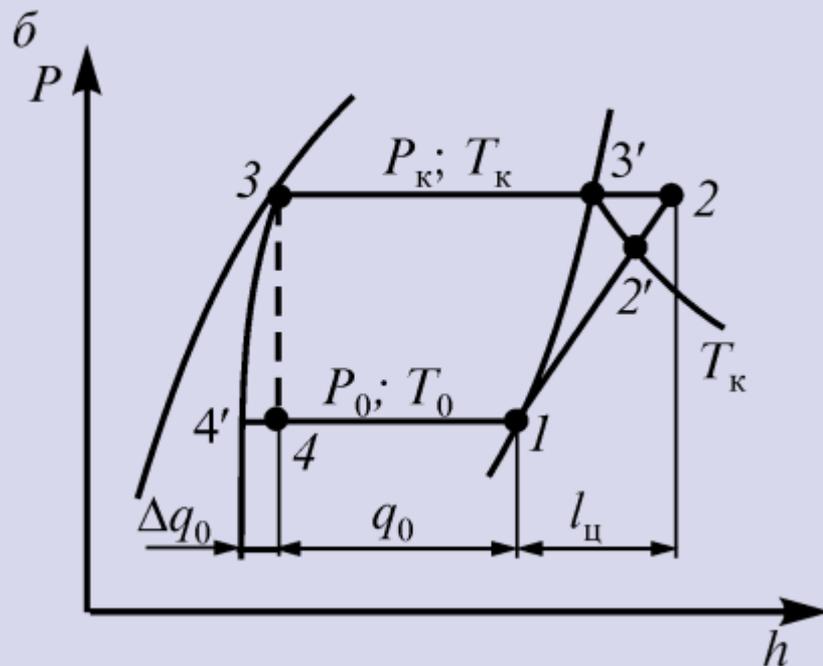
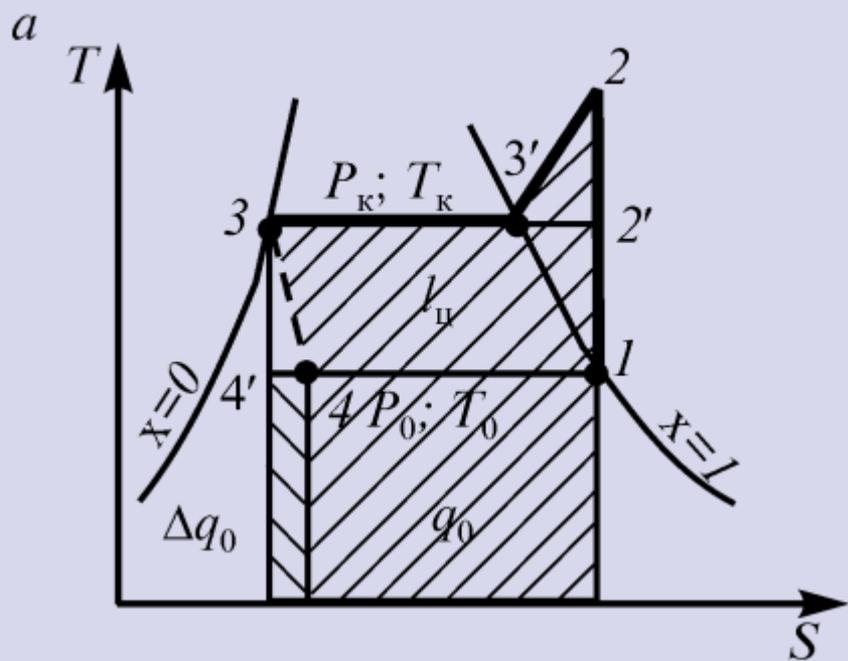


Рис. 1.10. Термодинамический цикл паровой компрессорной холодильной машины









