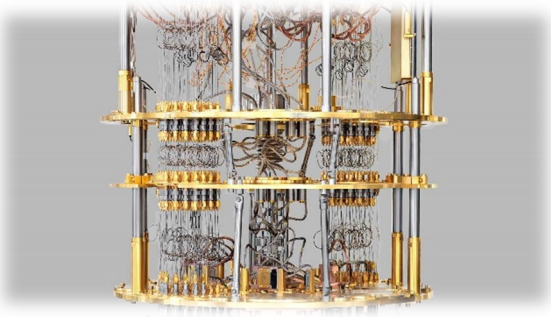
БЕЗЖИДКОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОХЛАЖДЕНИЯ



- Тепловая и холодильные машины;
- Машины Стирлинга и Гиффорда-Макмагона

Безжидкостные методы

- Охладитель на пульсирующих трубках;
- CFMS;
- Криостат растворения BlueFors;

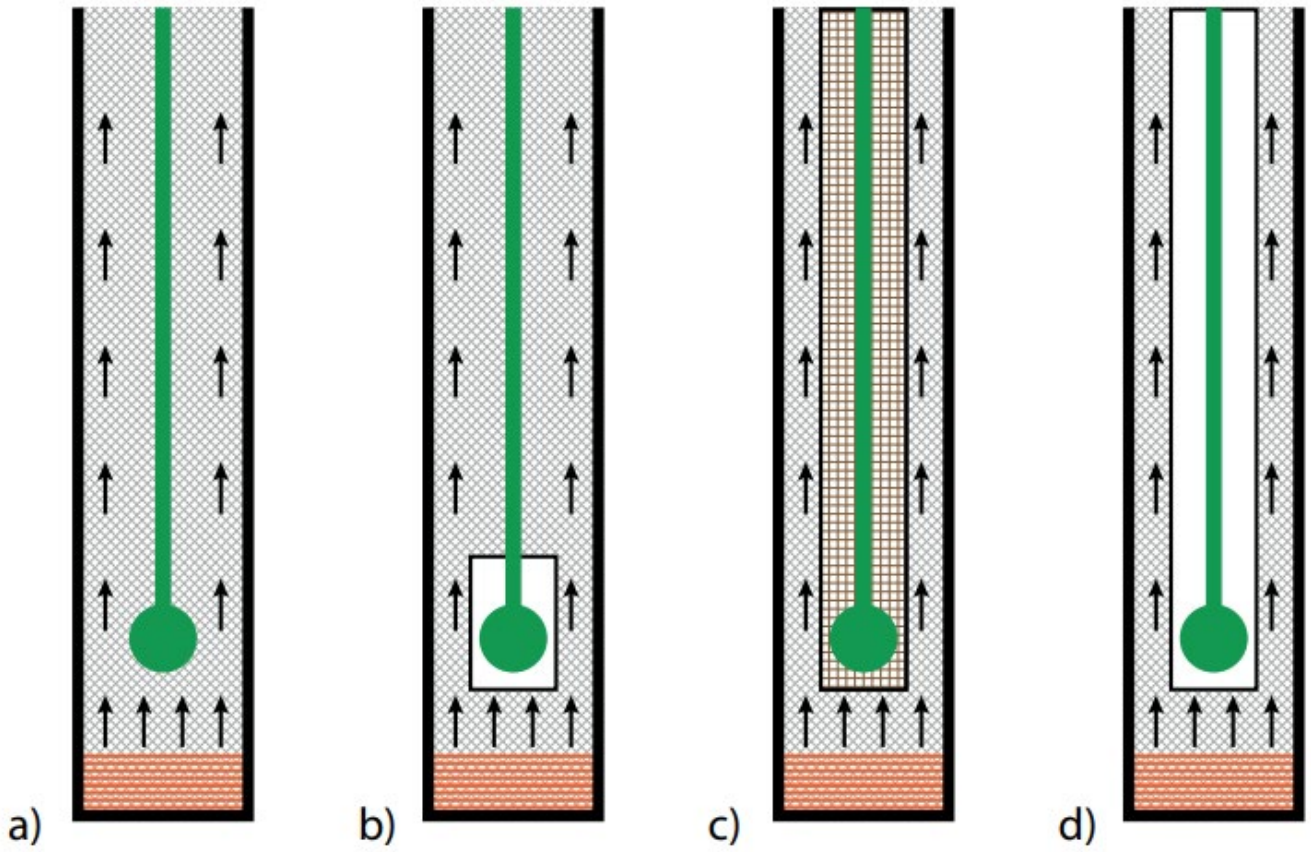
Борисов Андрей (АШ по физике ВШЭ)

Москва, 2024

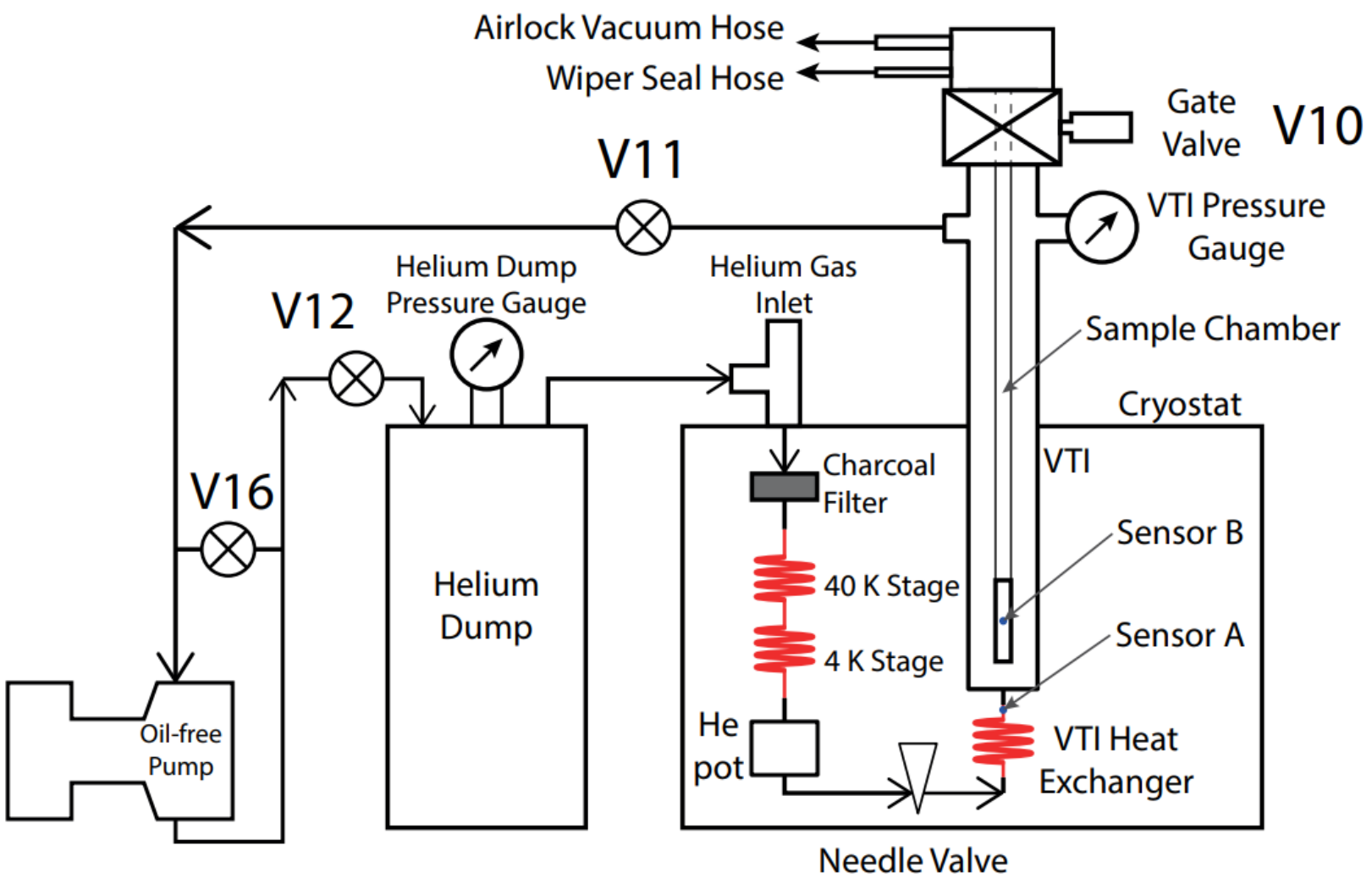
Variable Temperature Insert (VTI)

Криогенная вставка – часть криостата, предназначенная для загрузки образца из комнатных условий в низкотемпературные.

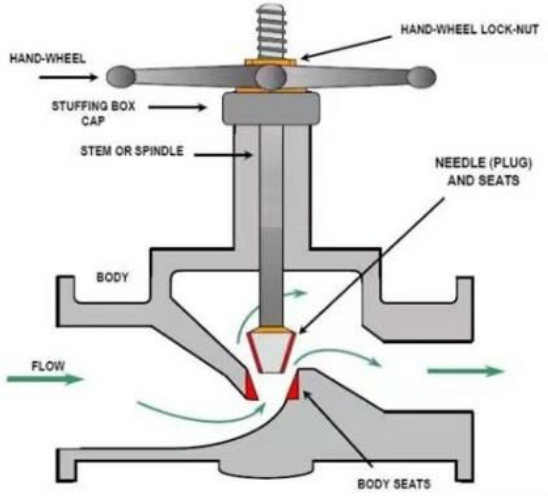
a. образец контактирует непосредственно с циркулирующим гелием;
b. образец помещён в небольшую вакуумную камеру, которая обтекается гелием;
c. образец изолирован от циркулирующего газа, термоконтакт обеспечен статическим обменным газом;
d. образец изолирован от циркулирующего газа и находится в вакууме.



Cryogen Free Magnet System (CFMS)



Cryogen Free Magnet System (CFMS)



1. газообразный гелий при комнатной температуре собирается в накопительном баллоне (dump vessel), безмасляный насос запускает циркуляцию;
2. газ поступает в сеть циркуляции VTI через входной клапан;
3. газ проходит через угольный фильтр (угольная ловушка) и очищается от всех примесей;
4. затем он проходит через теплообменник 1-й ступени ПТ, где охлаждается до 40 К;
5. гелий проходит через теплообменник 2-й ступени ПТ, достигает температуры ниже 4.2 К и конденсируется в гелиевый бак (He pot);
6. жидкий гелий пропускается через игольчатый клапан, после которого расширяется и охлаждается откачкой до ~ 1.6 К. Проходя через теплообменник VTI (где газ при необходимости подогревается);
7. гелий поднимается мимо образца вверх по VTI, покидает её и через насос возвращается в накопительный баллон.

О сверхпроводимости

Сверхпроводимость – свойство некоторых материалов обладать **строго нулевым** электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

Чем СП отличается от идеального проводника?

Эффект Мейснера – полное вытеснение магнитного поля из объёма проводника при его переходе в сверхпроводящее состояние.

Сверхпроводник I рода – СП, не допускающий наличия внутри своего объёма любого магнитного поля.

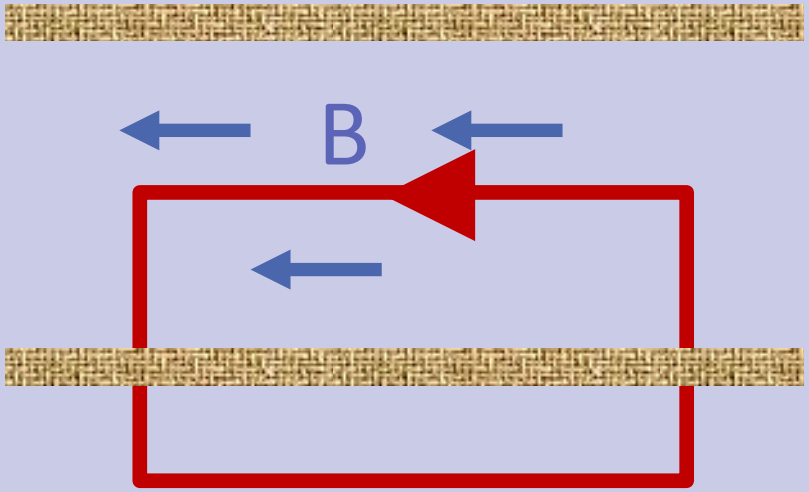
Сверхпроводник II рода – СП, который после достижения внешним полем некоторого значения, пускает внутрь себя линии в нормальном состоянии – **вихри Абрикосова –** с ненулевым полем внутри. Пток через один вихрь равен кванту потока $\Phi_0 = h/(2e) \approx 2.067833\,848\ldots \times 10^{-15}$ Вб.

Сверхпроводящий электромагнит

$\mu_0 = 1.3 \cdot 10^{-6}$ Н/А^2 – магнитная постоянная

$\oint Hdl = \frac{1}{\mu_0} \oint Bdl = I$ - теорема о циркуляции

$$\frac{1}{\mu_0} \mathrm{B} \cdot L = j \cdot L \Rightarrow j = \frac{B}{\mu_0} \approx \mathbf{10^6} \boldsymbol{A}/\text{м}$$



Оценить тепловыделение в такой ситуации, если бы использовался медный магнит.

$\mathbf{Nb_3Sn}$ – сверхпроводник 2-го рода с температурой перехода 18.5 К. Используется в качестве материала для сверхпроводящих магнитов.

Фазовые переходы II рода

Фазовые переходы разделяют на два типа: I и II рода. Формально их можно отличить по поведению не которых термодинамических характеристик материала при переходе через границу фаз. Вспомним **Термодинамический потенциал Гиббса:**

$$\Phi = U - TS + PV;$$
$$d\Phi = dU - TdS - SdT + PdV + VdP$$

Его первые производные (по температуре и давлению) **скачкообразно** меняются при обычных фазовых переходах (жидкость → газ). Все такие переходы называют переходами I рода.

Если скачкообразно меняются **вторые** производные (первые меняются непрерывно), такие переходы называют переходами II рода.

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial T^2} = -\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T}\left(\frac{T\delta Q}{\partial T}\right)_P = \frac{\boldsymbol{c_P}}{T}$$

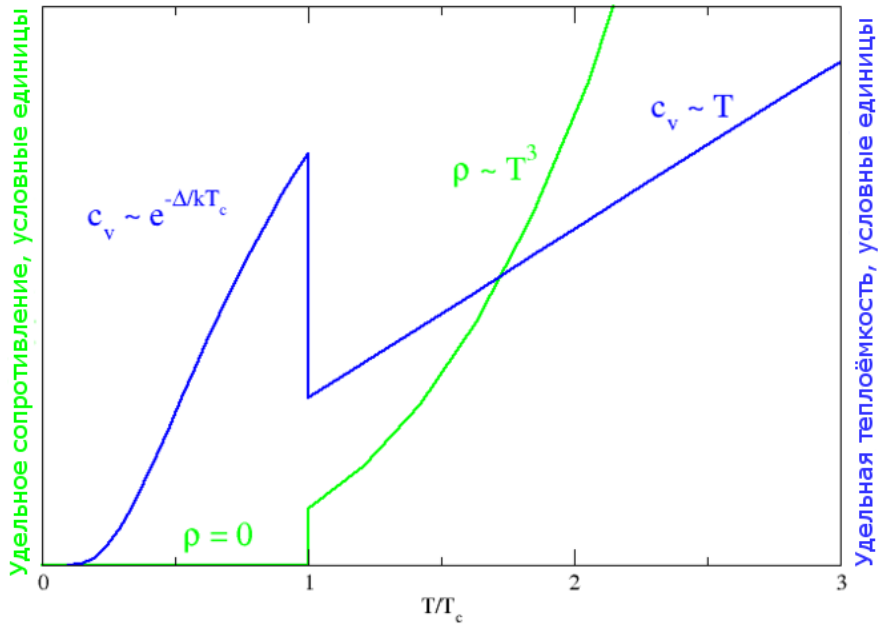
$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial T\partial P} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P; \qquad \frac{\partial^2\Phi}{\partial T^2} = \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$$

Термодинамика сверхпроводника

Сверхпроводящий переход – переход I рода, т.к. ни энтропия, ни плотность вещества не меняются. Скачкообразно у сверхпроводников меняется теплоёмкость.

Представим ситуацию, когда сверхпроводник находится в магнитном поле. Из-за **эффекта Мейснера** у поверхности сверхпроводника текут бездиссипативные токи, компенсирующие внешнее магнитное поле внутри материала.

При переходе в нормальное состояние гашение этих токов вызывает большой выброс джоулева тепла – переход I рода.

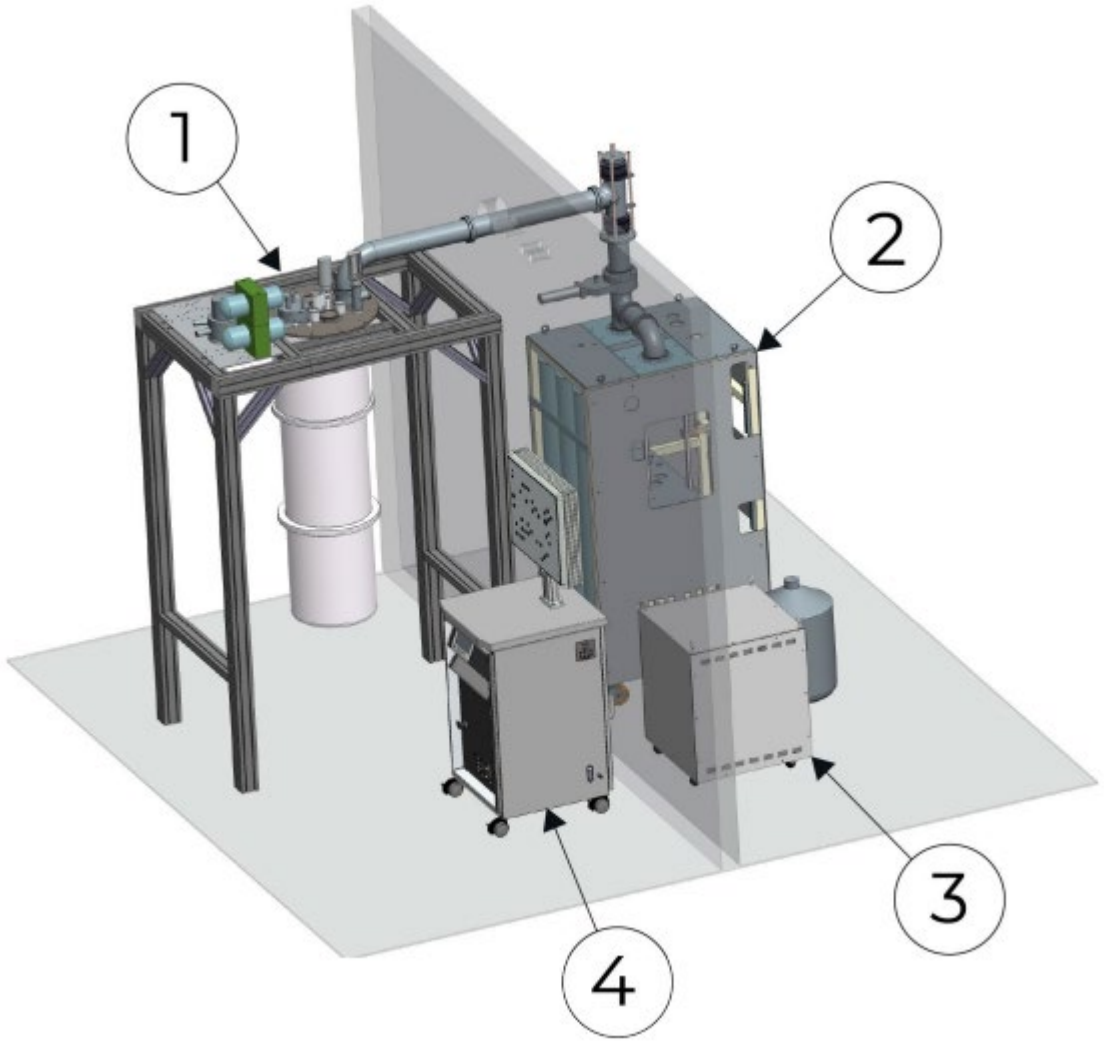


Криостат растворения BlueFors

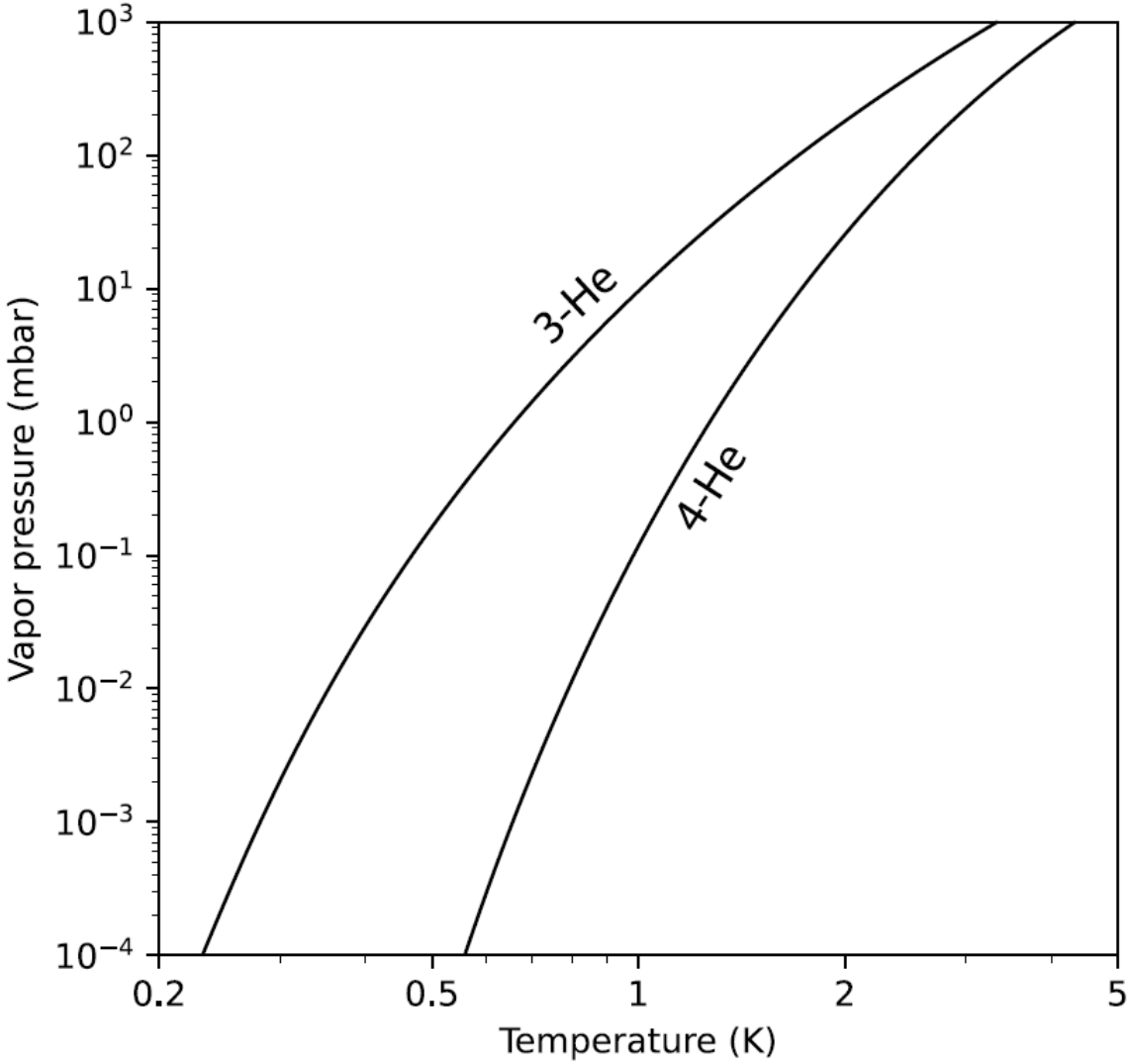
- стальная рама с закреплённым в ней криостатом, состоящим из объёма для измерений (латунного цилиндра высотой 20 см и диаметром 10 см), сети циркуляции и нескольких металлических экранов:
    1. внутренний экран находится в тепловом контакте с фланцем камеры растворения (MC – Mixing Chamber), т.е. при рабочей температуре установки;
    2. второй экран соединён с фланцем 2-й ступени ПТ-рефрижератора (quasi 4K-flange) при температуре ~ 4 К. Внутри него располагается сверхпроводящий соленоид на 1 Т;
    3. третий экран соединён с фланцем 1-й ступени ПТ-рефрижератора (50K-flange) при температуре ~ 50 К;
    4. внешняя оболочка криостата
- система управления циркуляцией (GHS – Gas Handling System) состоит из клапанов и насосов системы циркуляции гелия (находится в отдельном помещении);
- панель управления криостатом (Control Unit) обеспечивает (наряду с компьютером) управление GHS;
- компрессоры ПТ-рефрижератора

Криостат растворения BlueFors

Item	Description
1	Cryostat and its support frame
2	Gas Handling System
3	Cryocooler system
4	Control Unit



Смесь He-3 и He-4

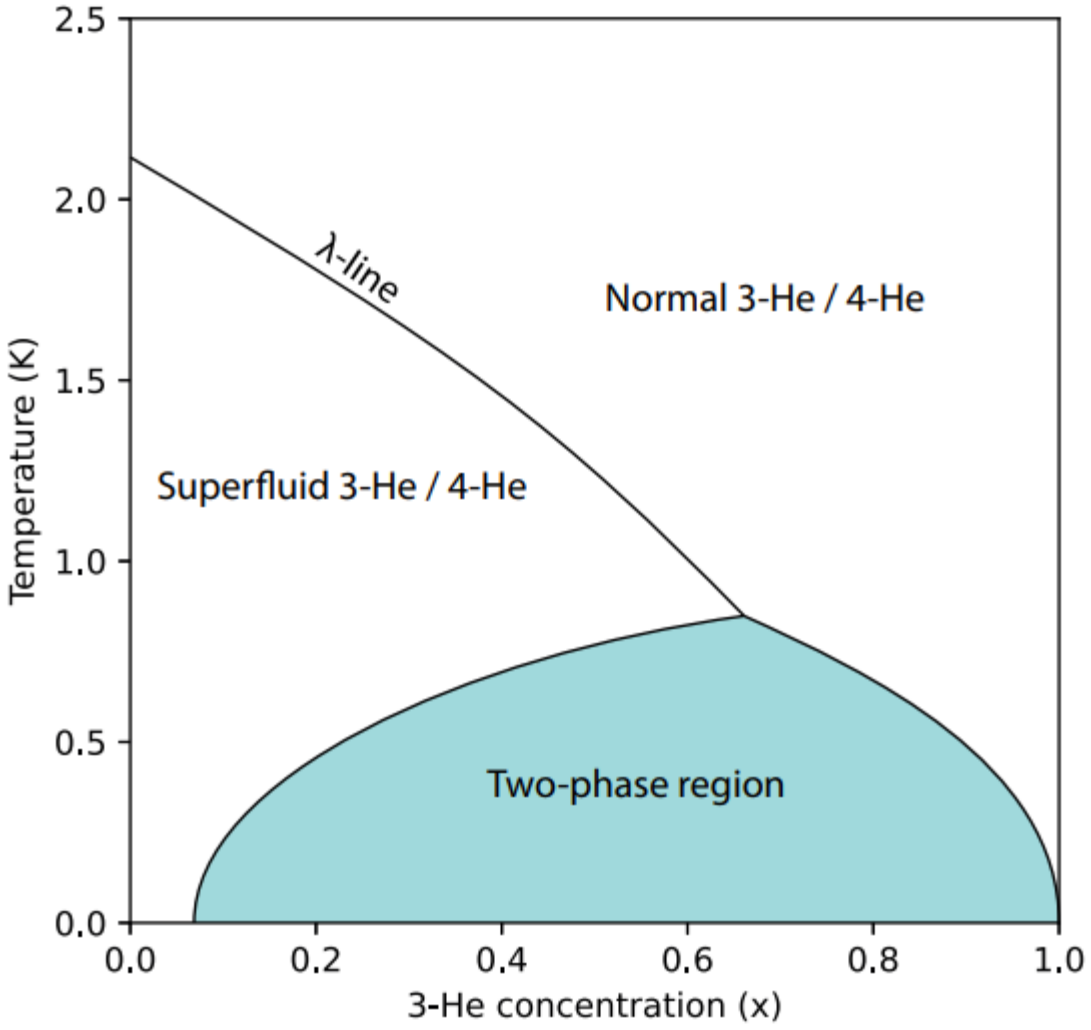


Смесь He-3 и He-4

При достижении температуры ~ 0.8 К гелиевая смесь спонтанно разделяется на 2 фазы: обеднённую и обогащённую He-3.

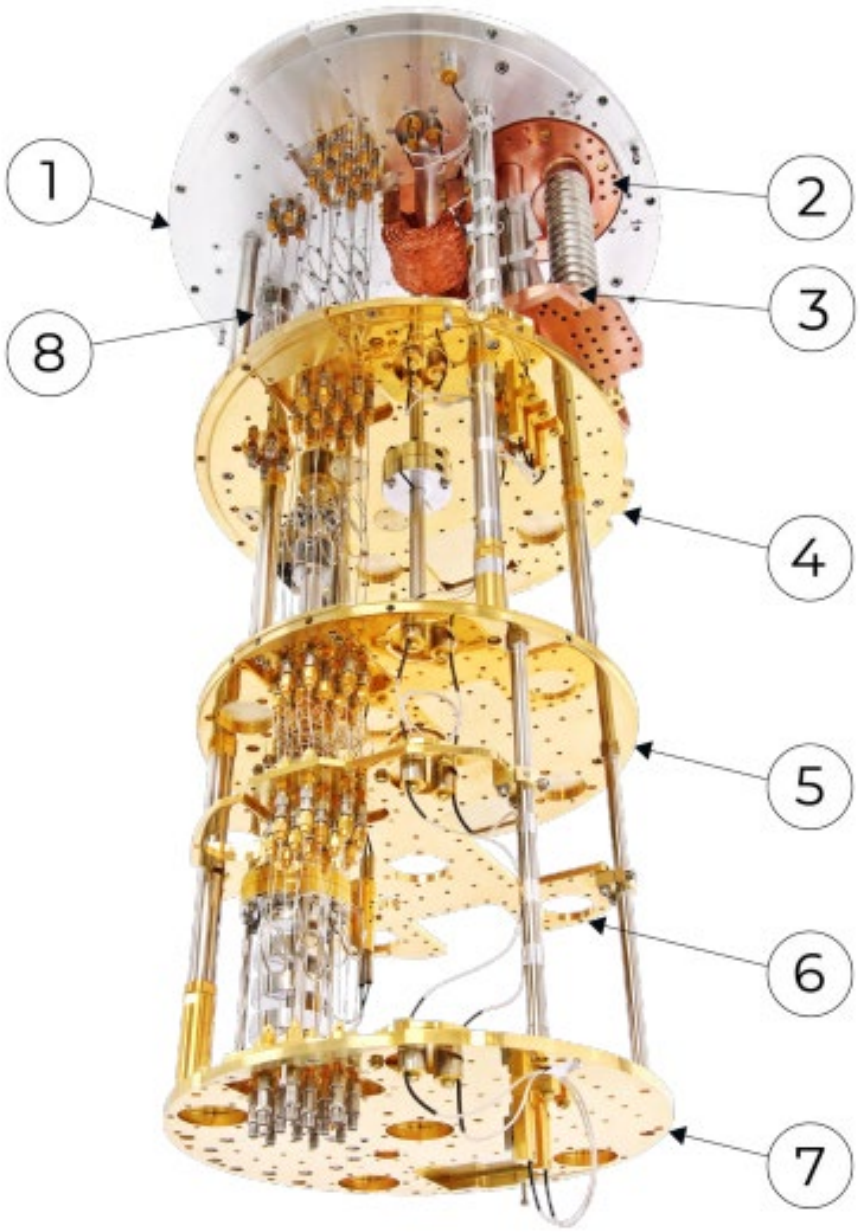
У обеднённой части есть замечательное свойство: даже при T → 0 максимальная возможная концентрация ^{3}He в ^{4}He не падает до нуля, а остается равной 6,5 %. В этом случае одна фаза – это чистый He-3.

Принципиальная особенность смеси состоит в необходимости затратить энергию на перенос He-3 из обогащённой фазы в обеднённую.



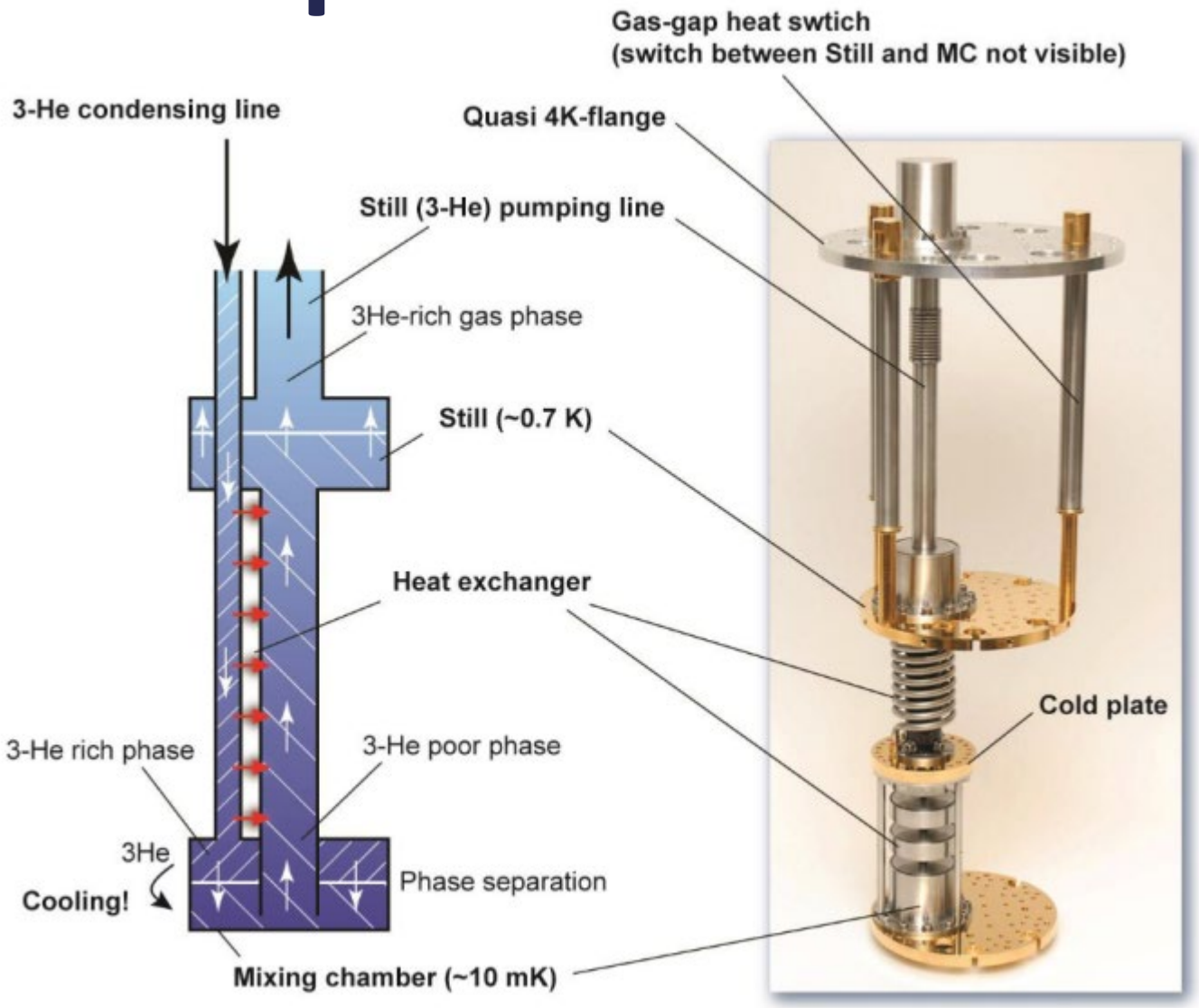
Конструкция КР

Item	Description
1	50K Flange
2	Pulse Tube 1st stage Cold Head
3	Pulse Tube 2nd stage Cold Head
4	4K Flange
5	Still Flange
6	Cold Plate
7	MXC Flange



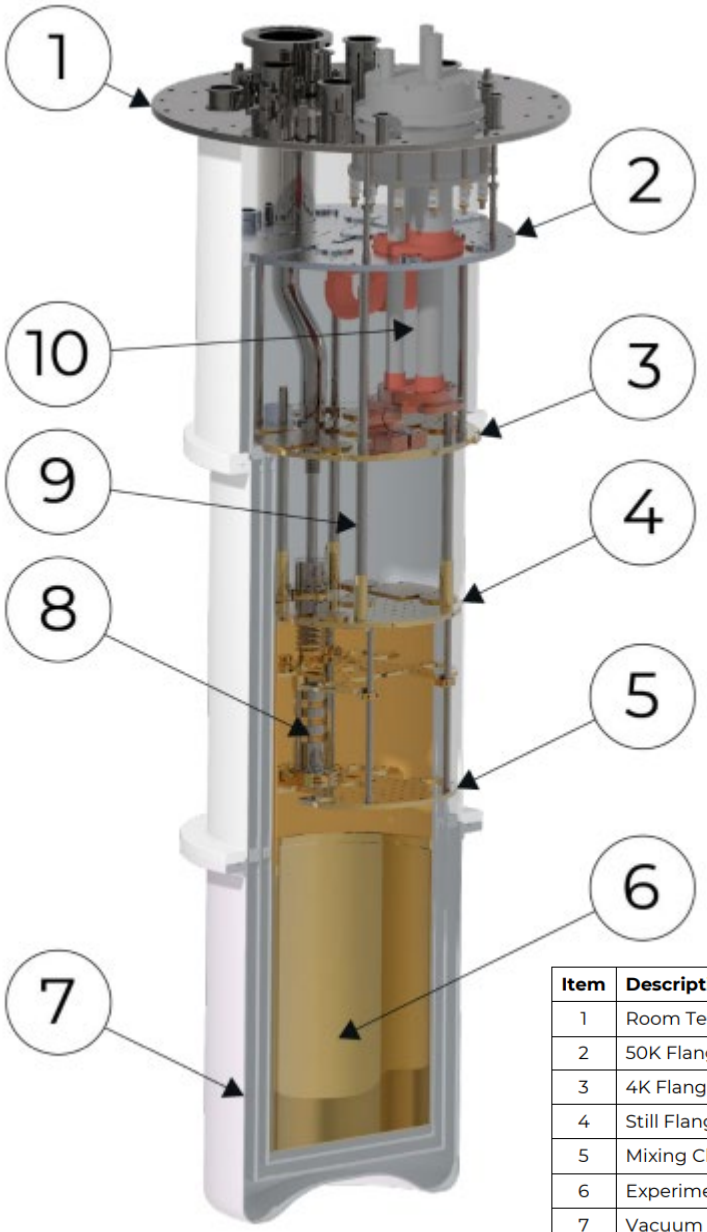
Смесительная камера

1. После разделения смеси на фазы более тяжёлая обеднённая He-3 фаза опускается в низ, заполняя выходной канал криогенной части цикла, в т.ч. Испарительную камеру.
2. Поскольку ниже 0.8 К давление паров He-3 значительно превышает таковое для He-4 откачивается из испарительной камеры в основном He-3.
3. В смесительной камере атомы He-3 вынужденно переходят из обогащённой фазы в обеднённую (для поддержания концентрации) затрачивая на это энергию – охлаждая смесь.



Тепловые ключи

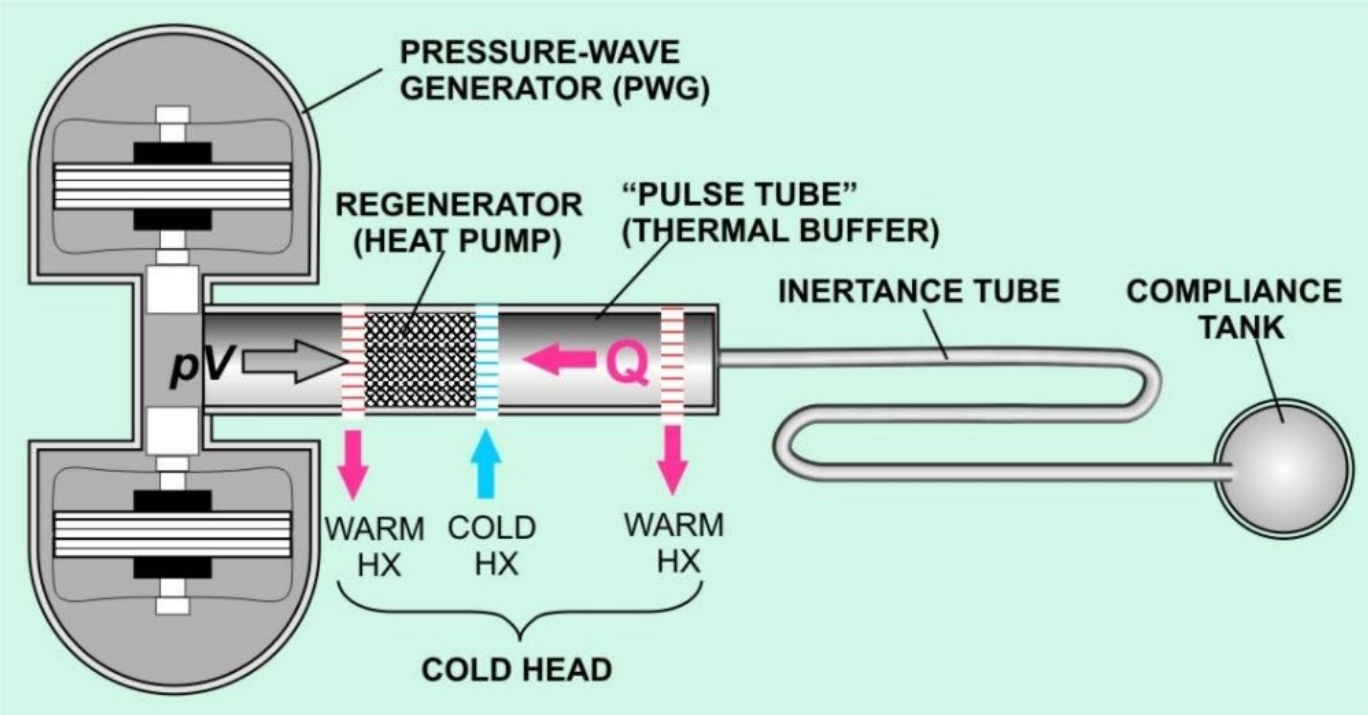
The Heat Switches consist of two copper heat exchanger parts, one on the high and on one the low temperature side, that are separated by a stainless steel tube which is designed to minimize heat transfer due to poor thermal conductivity. The Heat Switches are filled with helium gas that conducts the heat between the two copper heat exchanger parts. On the top of each Heat Switch is an outlet that connects to an active carbon pump. When the active carbon gets cold enough, approximately < 10 kelvin, it absorbs all the helium gas inside the switch. At this point the Heat Switch is closed because it can only conduct heat to the stainless-steel body. To switch the Heat Switches to the open position, small heaters are used to release the gas from the active carbon pumps



Item	Description
1	Room Temperature Flange
2	50K Flange
3	4K Flange
4	Still Flange
5	Mixing Chamber Flange (MXC Flange)
6	Experimental space
7	Vacuum enclosure and radiation shields
8	Dilution refrigerator
9	Heat Switch
10	Two-stage pulse tube

Охладитель на пульсирующих трубках

- **Криостат на пульсирующих трубках;**
- Тепловая и холодильные машины;
- Машина Стирлинга;
- Машина Гиффорда-Макмагона;
- Пульсирующая трубка;



Тепловой двигатель

1. **Тепловой двигатель** – устройство, совершающее механическую работу за счёт тепла, получаемого от внешнего источника (сгорания топлива);

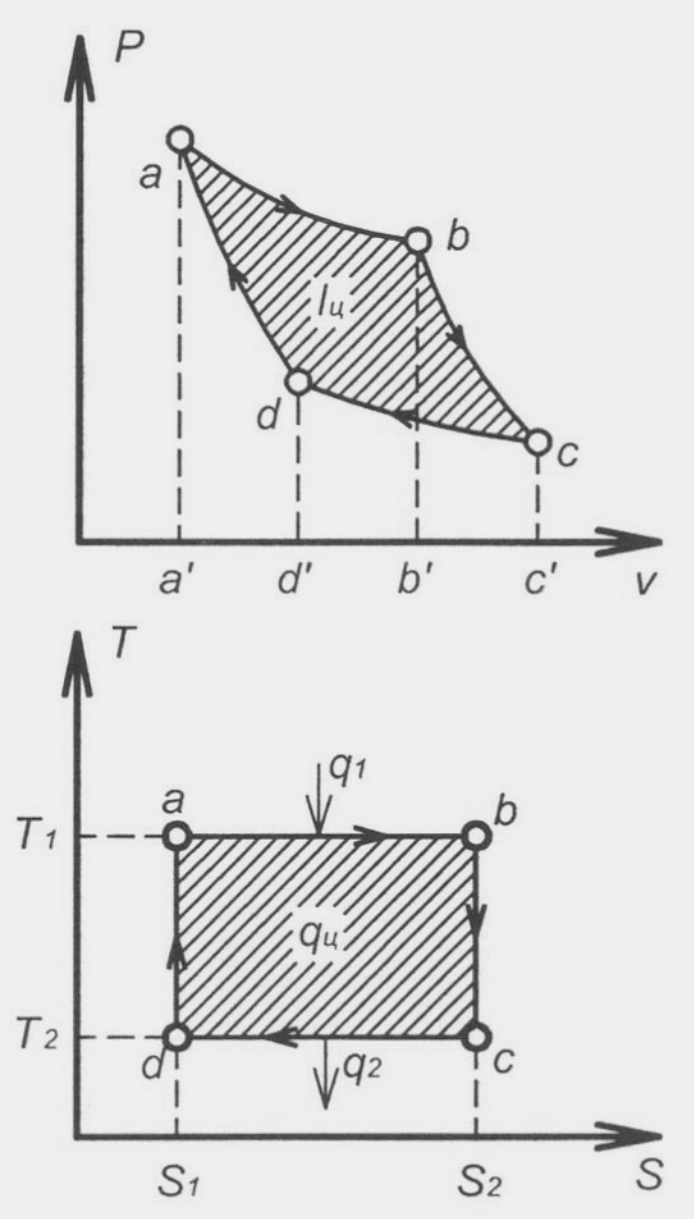
2. КПД теплового двигателя внешнего сгорания:

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H};$$

3. Максимальный КПД достигается в цикле Карно (при заданных температурах T_H и T_C):

$$\eta_K = 1 - \frac{T_C}{T_H};$$

4. Работа за цикл равна площади фигуры, образованной графиком процесса в координатах P-V.



Холодильная машина

1. **Холодильная машина** – устройство, совершающее перенос тепла от холодного объекта к горячему за счёт совершаемой над рабочим телом работы. Обратный тепловой двигатель;

2. Эффективность холодильной машины:
$$\xi = \frac{Q_C}{A} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} - 1 = \frac{1}{\eta} - 1;$$

3. Заметим, что при понижении температуры холодного объекта КПД тепловой машины будет расти. Следовательно, эффективность соответствующей холодильной машины будет падать;

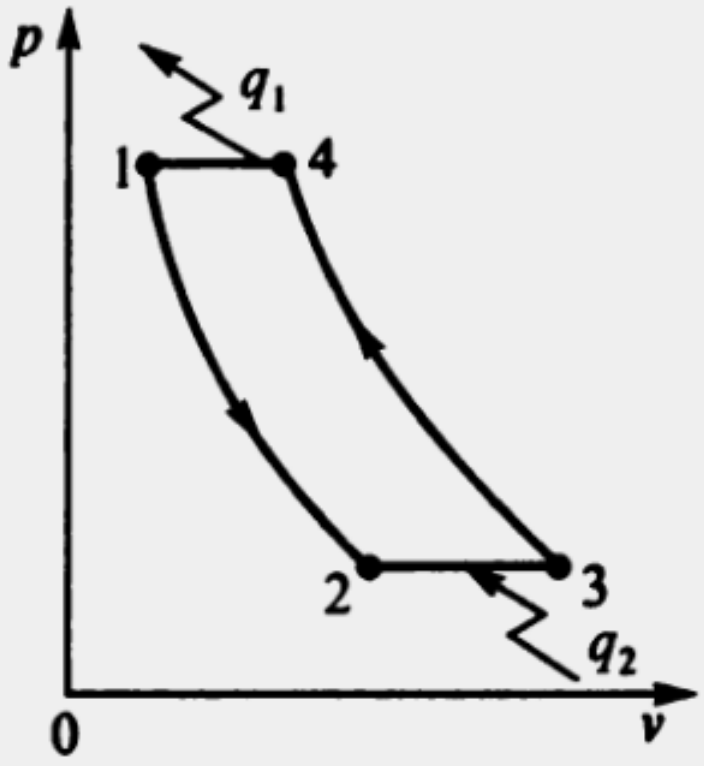
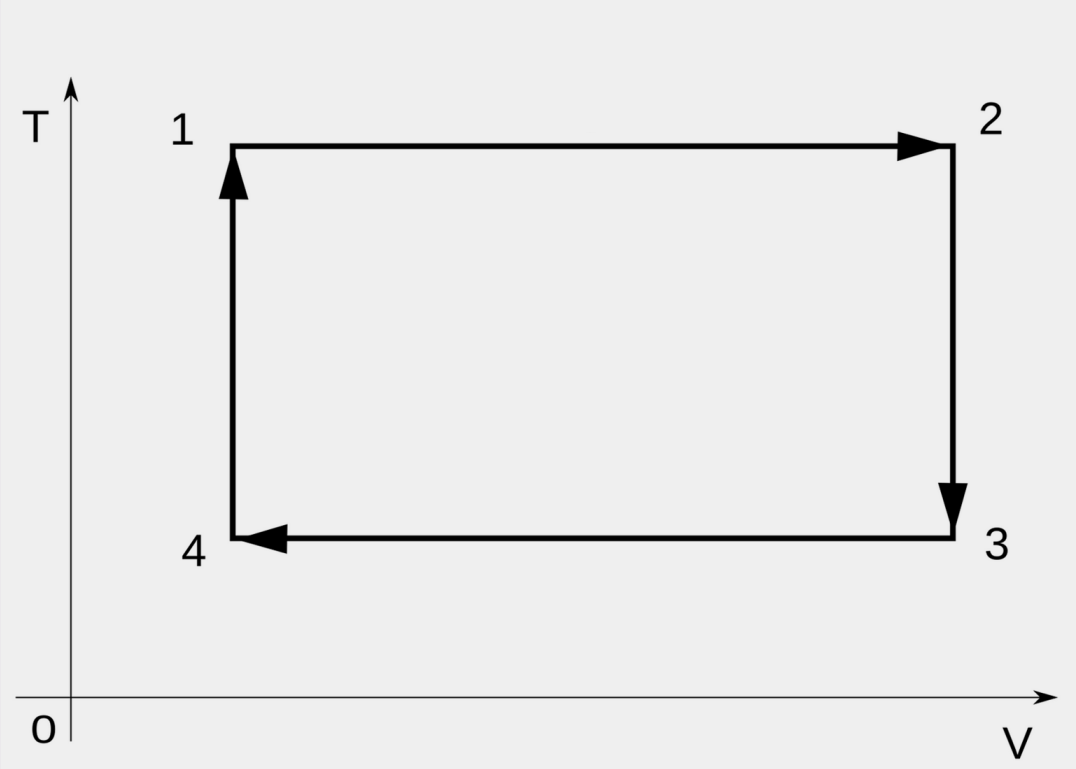
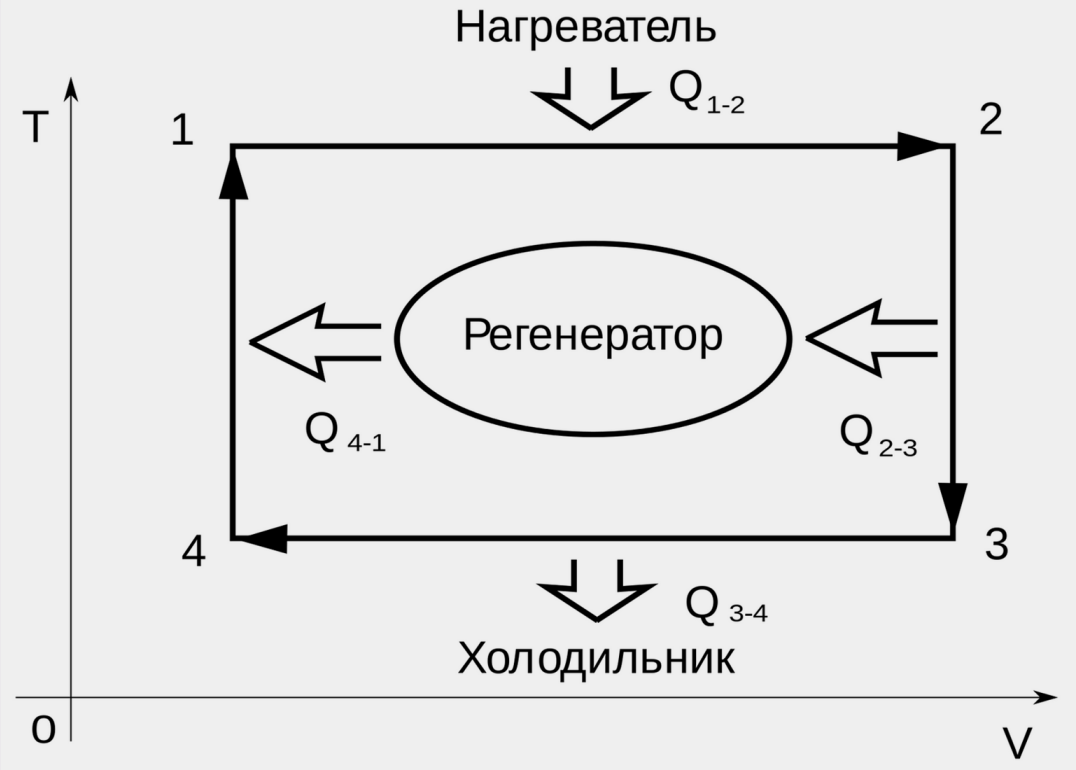


Рис. 9.2. Цикл воздушной холодильной установки в координатах «v—p»

Машина Стирлинга. Регенератор

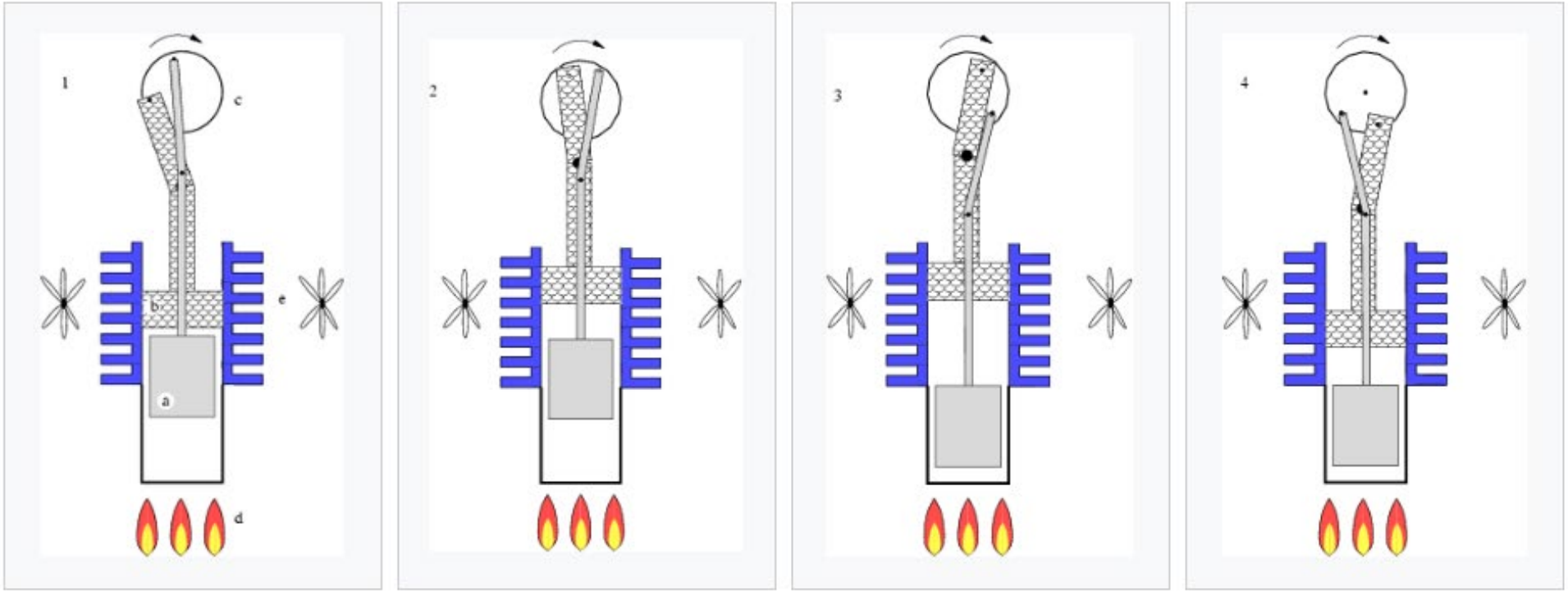
Регенератор – теплообменник, в котором передача теплоты осуществляется поочередным соприкосновением горячего и холодного теплоносителей с одними и теми же поверхностями аппарата. Служат для утилизации теплоты отходящих газов теплотехнических устройств.



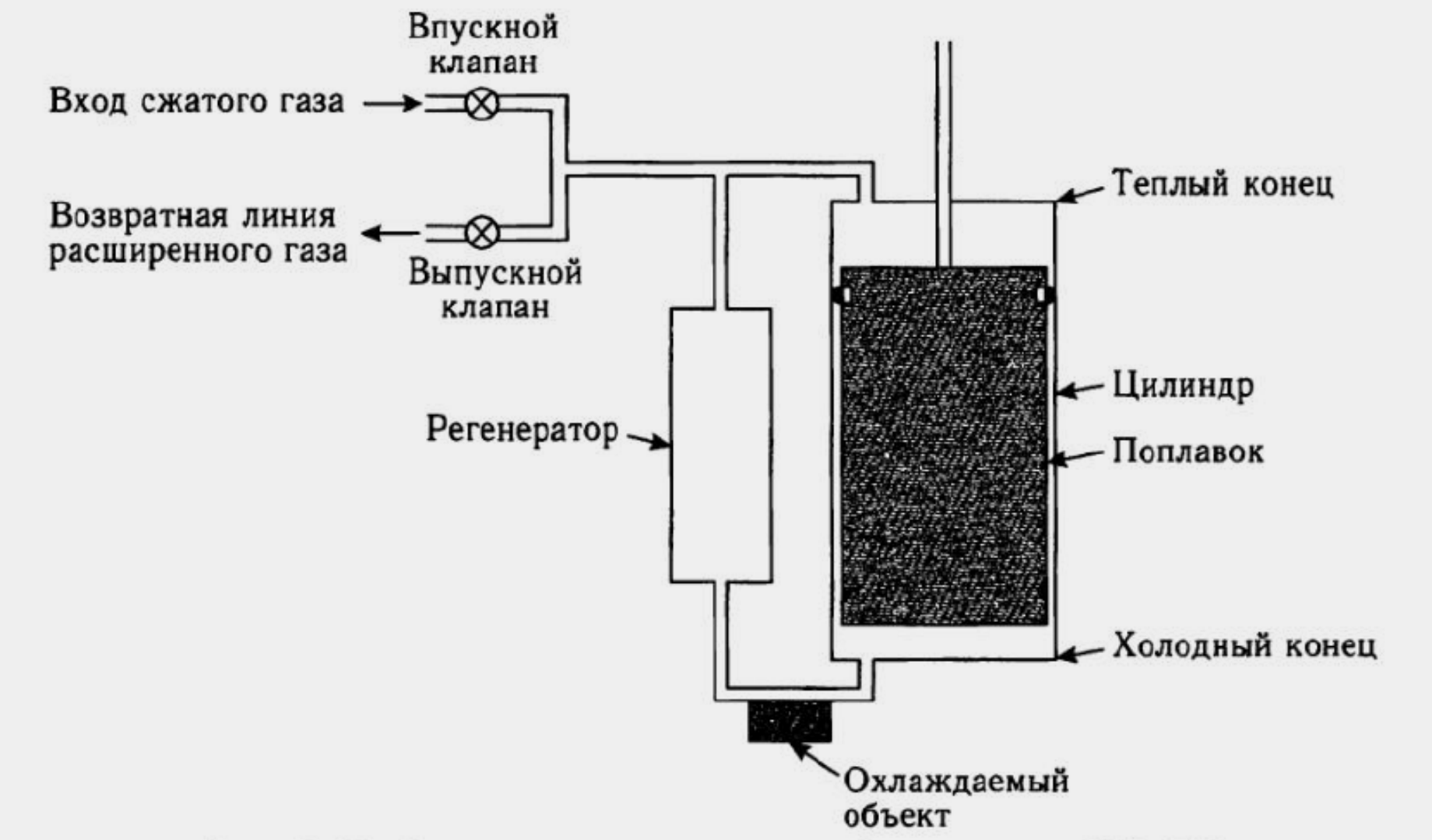


Двигатель Стирлинга

1. Внешний источник тепла нагревает газ в нижней части теплообменного цилиндра. Создаваемое давление толкает рабочий поршень вверх (вытеснительный поршень неплотно прилегает к стенкам).
2. Маховик толкает вытеснительный поршень вниз, тем самым перемещая разогретый воздух из нижней части в охлаждающую камеру.
3. Воздух остывает и сжимается, рабочий поршень опускается вниз.
4. Вытеснительный поршень поднимается вверх, тем самым перемещая охлаждённый воздух в нижнюю часть. И цикл повторяется.

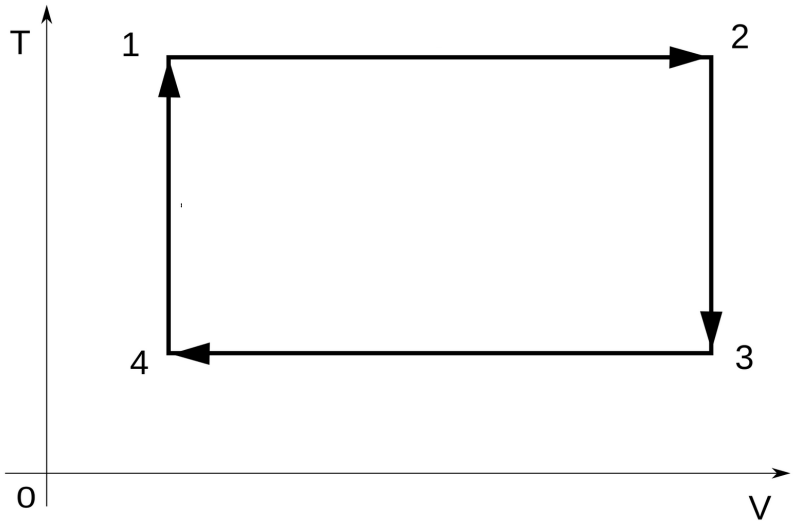


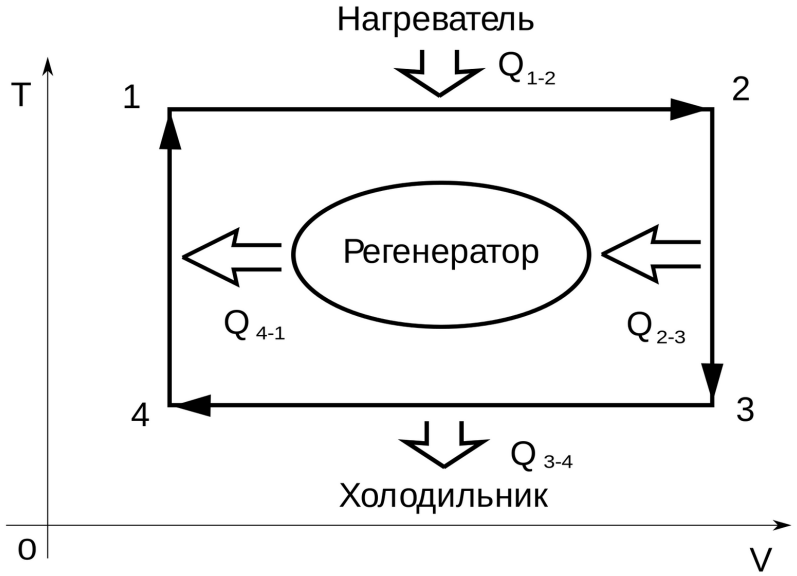
Машина Гиффорда-Макмагона



На дом

Задача 5: По-честному рассчитать КПД обоих тепловых циклов, изображённых на картинке.





Задача 6: Оценить тепловыделение в медном магните, генерирующем в центре поле в 21 Тл. Принять геометрические размеры магнита такими, чтобы в него помещался цилиндр диаметром 50 см и высотой 10 см.