

Вакуумная техника

Полосаткин Сергей Викторович
s.v.polosatkin@inp.nsk.su

<http://www.inp.nsk.su/students/plasma/sk/tpe.ru.shtml>

Вакуумные насосы

Способы получения вакуума:

- перемещение газа за счет применения внешних сил
- связывание путем сорбции, хим.реакций или конденсации

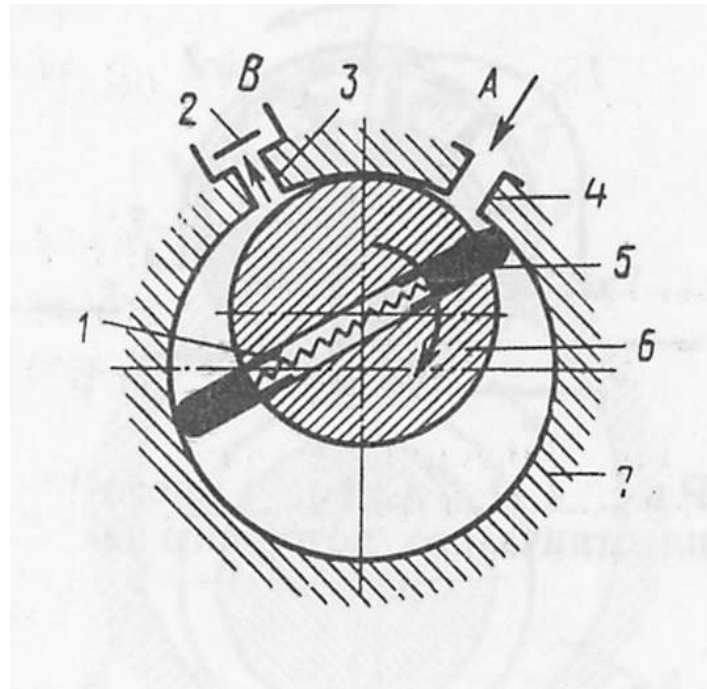
Параметры насосов:

- Наибольшее давление запуска
- Предельное остаточное давление
- Быстрота действия S_H и производительность $Q_H = p_2 S_H$

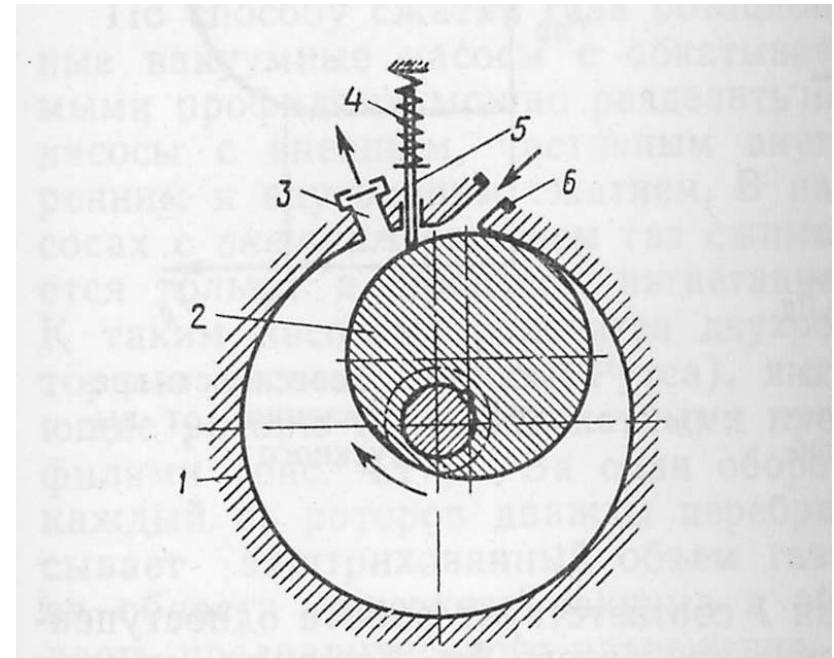
Невозможно с помощью одного типа насосов обеспечить вакуум во всем используемом диапазоне ($10^5 - 10^{-11}$ Па)

Форвакуумные насосы

Пластинчато-роторный



Пластинчато-статорный



Двухступенчатые насосы – до 0,1 Па

Как откачивать водяные пары

Пары воды не выкачиваются, т.к. при повышении давления при выталкивании вода конденсируется и, смешавшись с маслом, отправляется в вакуумный объем обратно

Газобалластное устройство

Важно, чтобы
$$\frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{perm}}} < \frac{P_{\text{vapor},\text{sat}}}{P_{\text{exhaust}}}$$

Надо испортить промежуточный вакуум в насосе

Напускной клапан в насос увеличивает P_{perm} и уменьшает парциальную составляющую паров воды

Масло для вращательных насосов

- Низкое давление насыщенных паров $\sim 10^{-3}$ Па
- Определенная вязкость для уплотнения

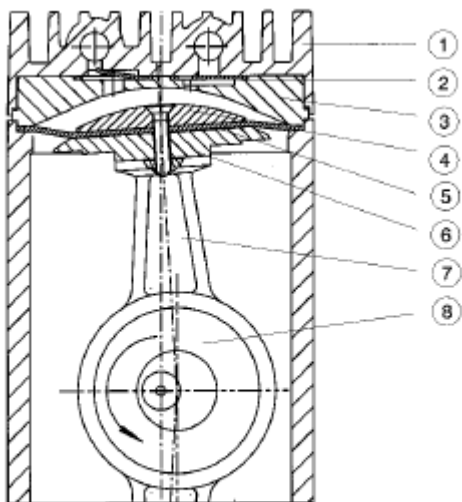
Указания к работе с форвакуумным насосом:

- контроль направления вращения
- контроль тока двигателя
- перед включением проворачивать вал рукой (если все застоялось)
- при необходимости охлаждать
- следить за уровнем масла
- не допускать попадания различных предметов
- напускать воздух в насос после остановки

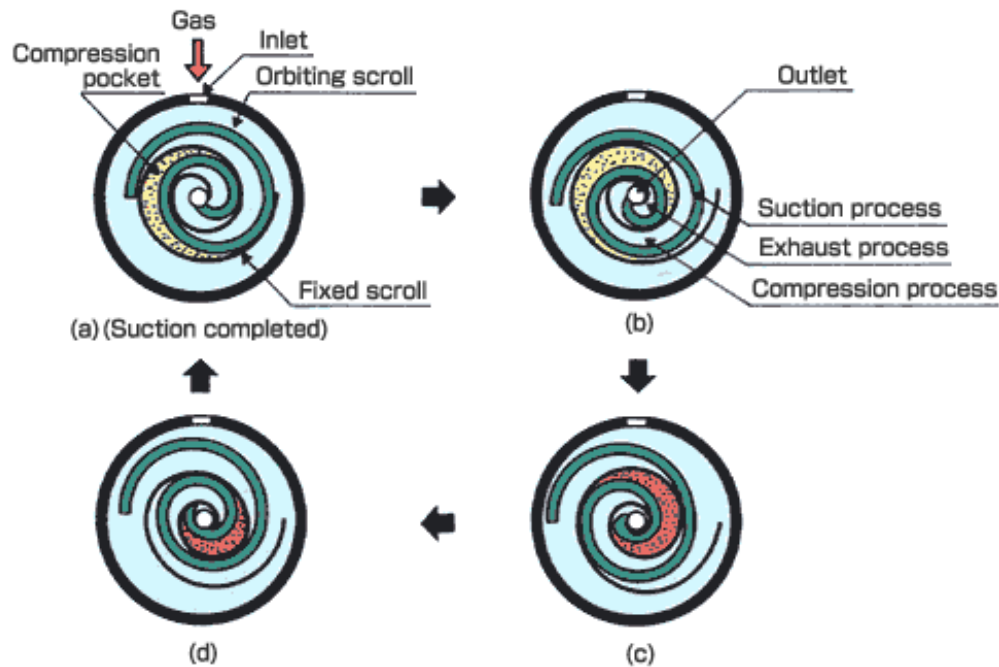
Безмасляные насосы

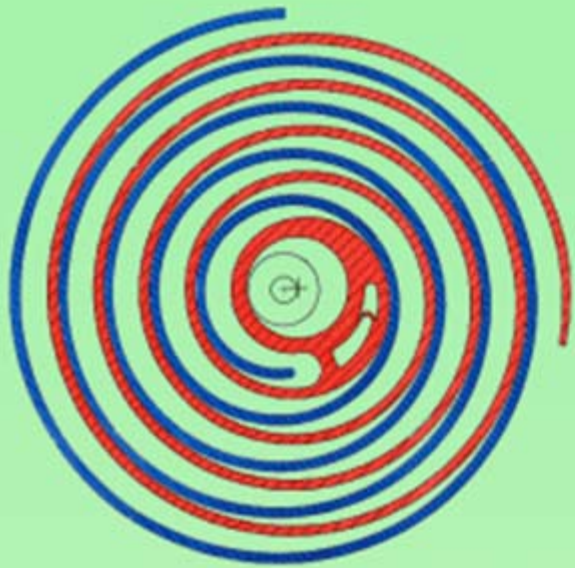
Диафрагменные – до 100 Па

Спиральные – до 1 Па

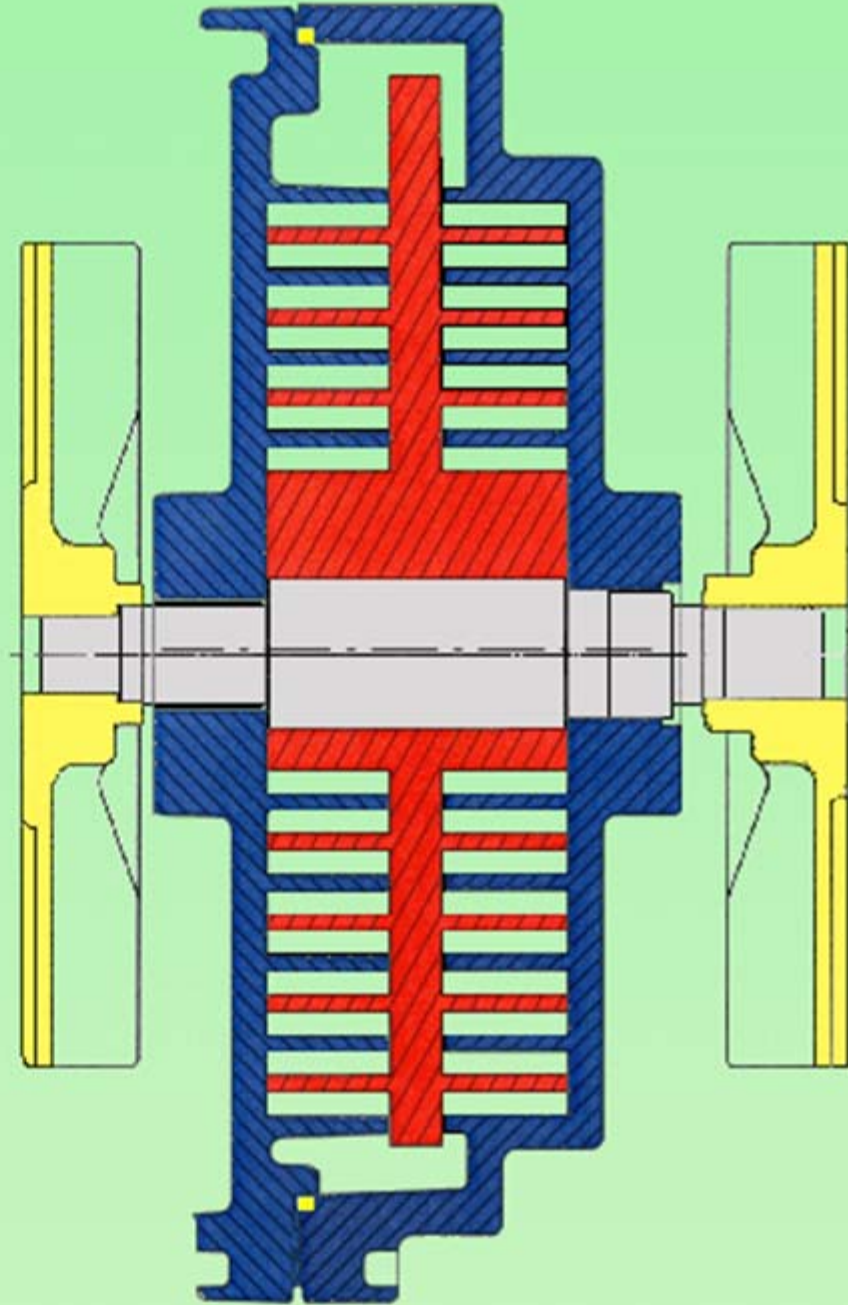


- | | |
|--------------------|----------------------------|
| (1) Casing lid | (5) Diaphragm |
| (2) Valves | (6) Diaphragm support disk |
| (3) Lid | (7) Connecting rod |
| (4) Diaphragm disk | (8) Eccentric disk |

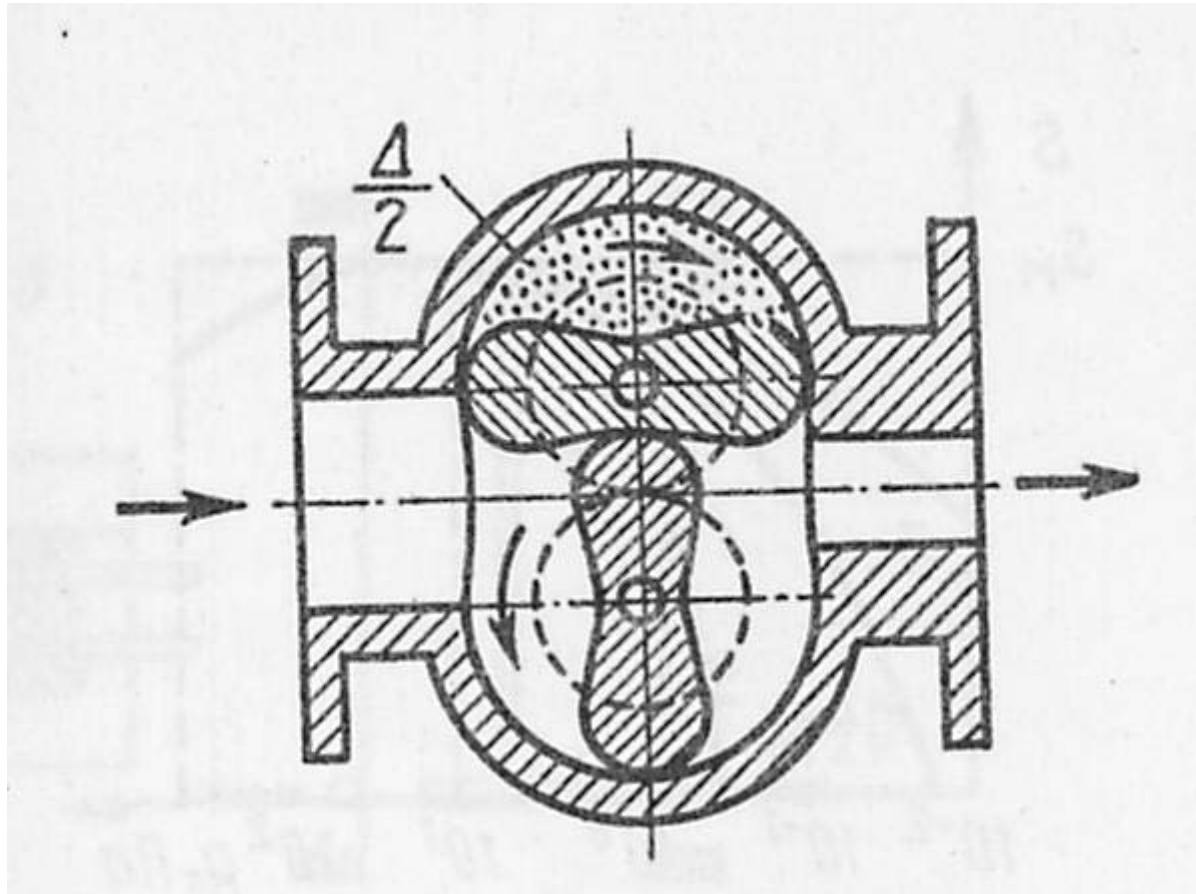




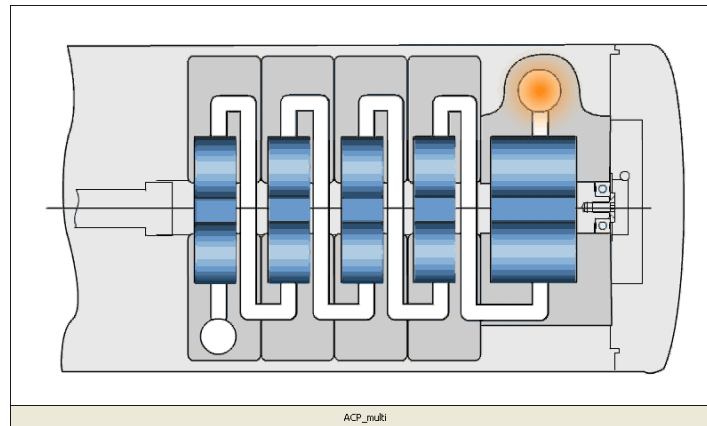
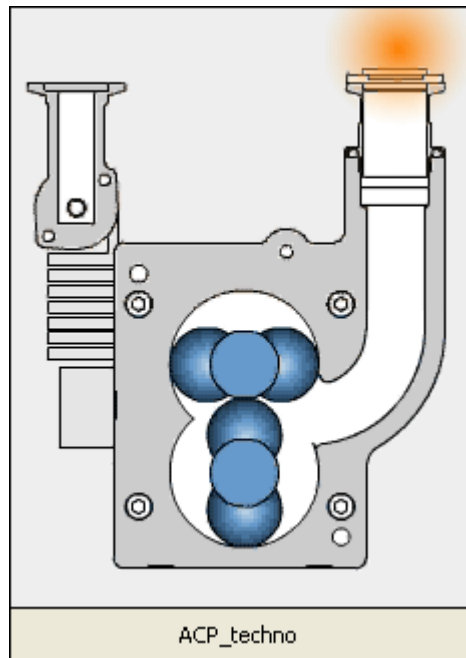
ISP Structure



Двухроторные (Рутса) – до 10^{-3} Па



Двухроторные (Рутса) – до 10^{-3} Па

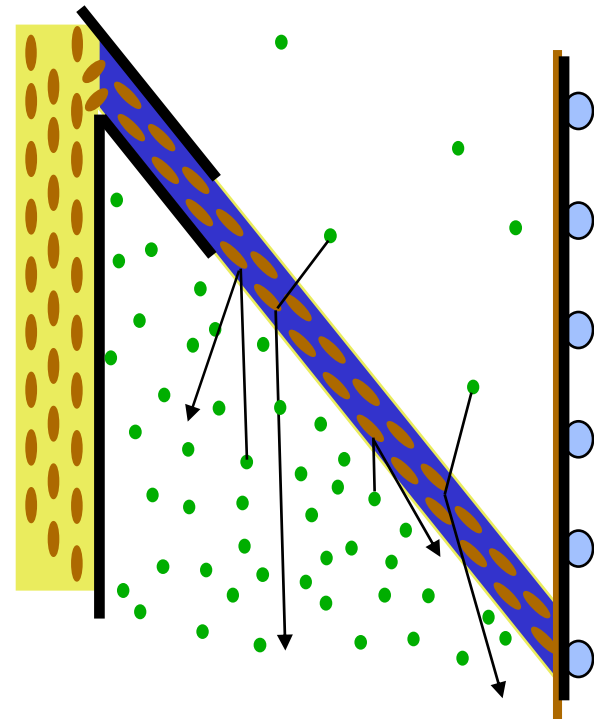
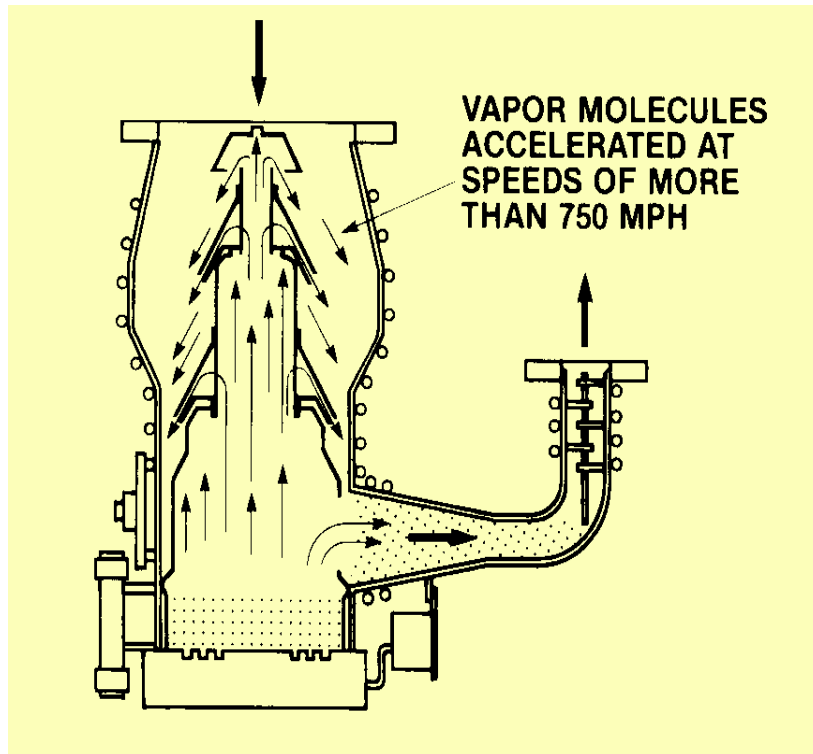


Высоковакуумные насосы

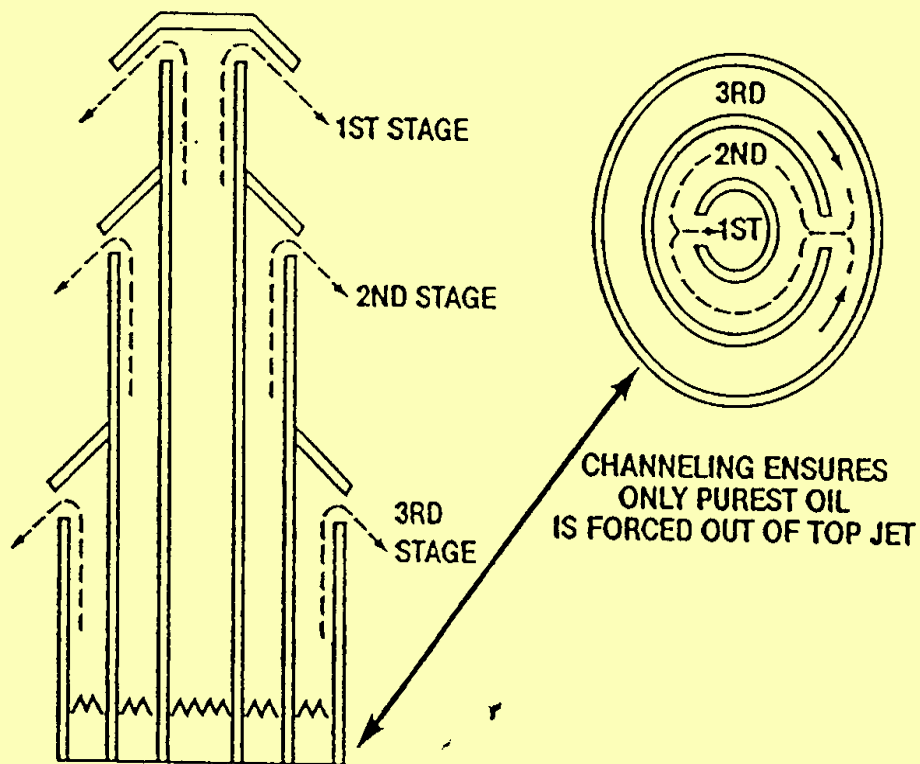
Пароструйные – до 10^{-6} Па

Ртуть – не смачивает стенки, химически не активна, не разлагается
высокое давление насыщенных паров (10^{-1} Па), яд

Масло – низкое давление насыщенных паров (10^{-6} – 10^{-7} Па), безопасно
разлагается при высокой температуре



Многоступенчатые с разделением фракций –
Разные фракции на разных ступенях



Порядок включения:

Форвакуумная откачка

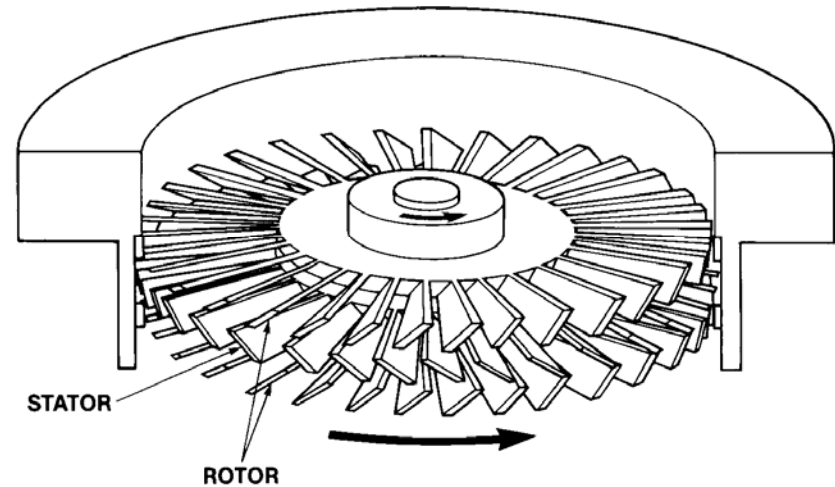
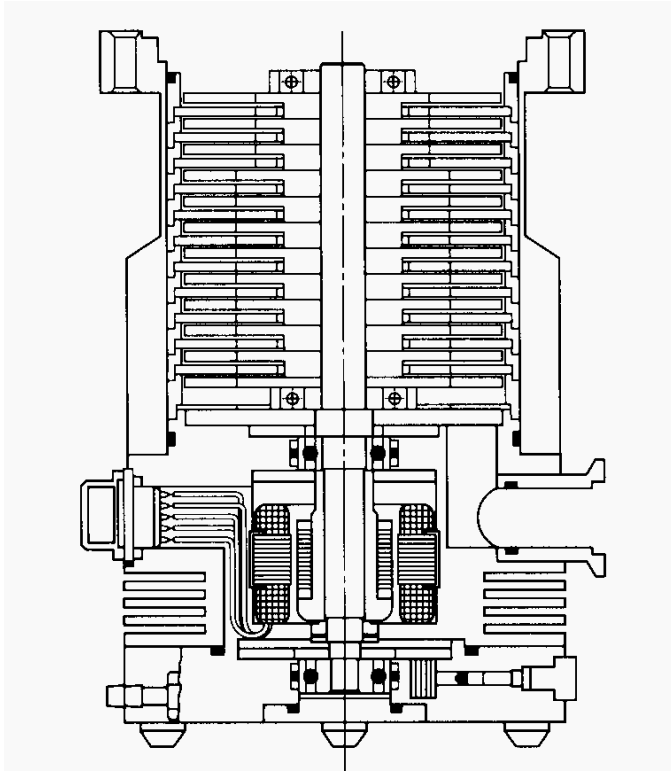
Включение нагрева и охлаждающей воды

Через 30-60 мин после запуска включить азотную ловушку

Открыть затвор для откачки

Турбомолекулярные насосы

Молекулам придается касательный импульс от лопаток
Стартовое давление 1-10 Па, предельное давление 10^{-9} Па
Скорость откачки 50 – 4000 л/с
Могут быть безмасляные
Легкие газы откачиваются плохо



N_2 — (black line)
 He — (blue line)
 H_2 — (red line)
 Ar — (green line)

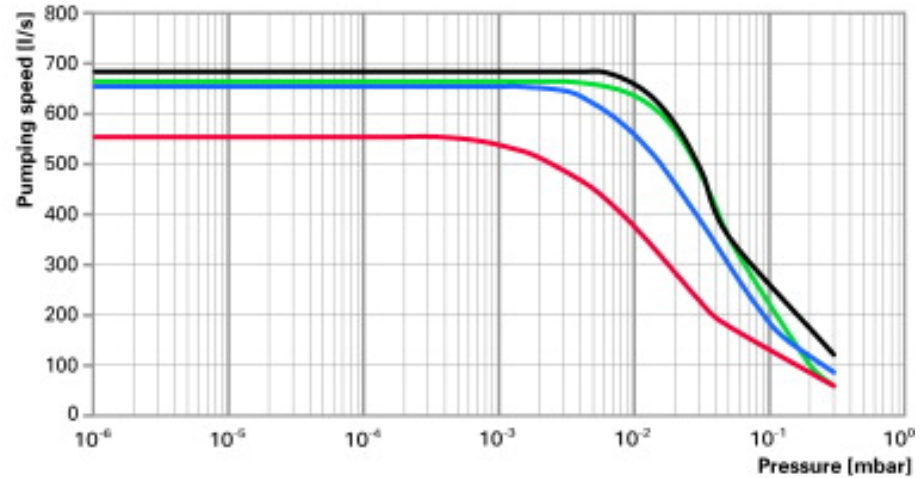
Параметры:

Входное отверстие DN 25 – DN 600

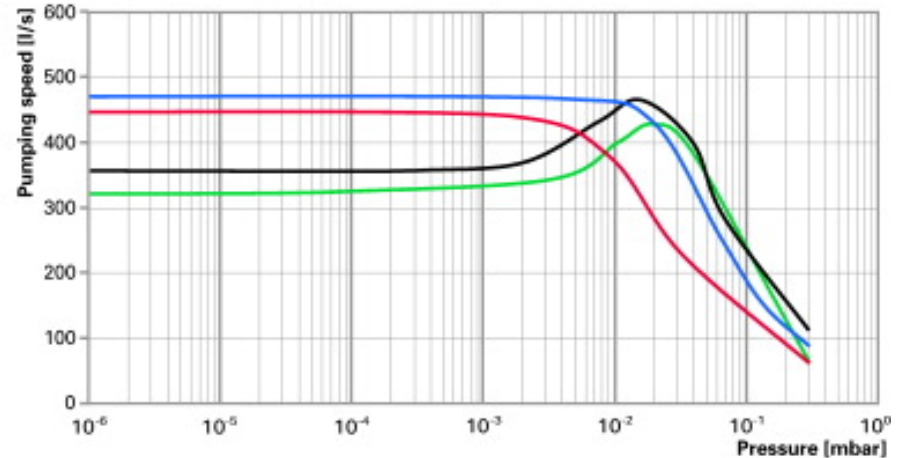
Производительность 10 – 4000 л/с
 (~1/5 от предельной по входному отверстию)

Предельное давление 10^{-9} – 10^{-11} Па

Степень сжатия 10^2 - 10^5 (H_2) 10^{11} (N_2)

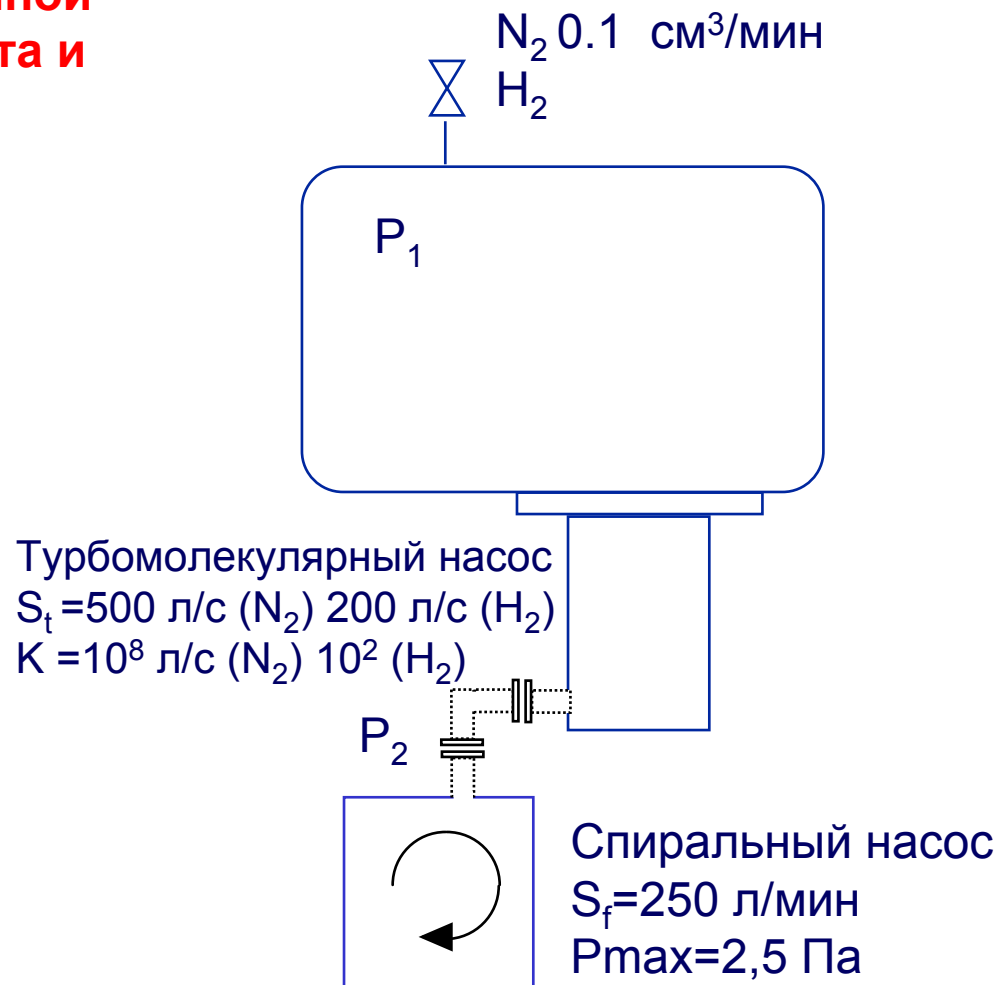


N_2 — (black line)
 He — (blue line)
 H_2 — (red line)
 Ar — (green line)



Предельный вакуум при большой газовой нагрузке

Определить рабочее давление P_1 в представленной на рисунке вакуумной схеме при постоянном напуске азота и водорода с потоком $0.1 \text{ см}^3/\text{мин}$

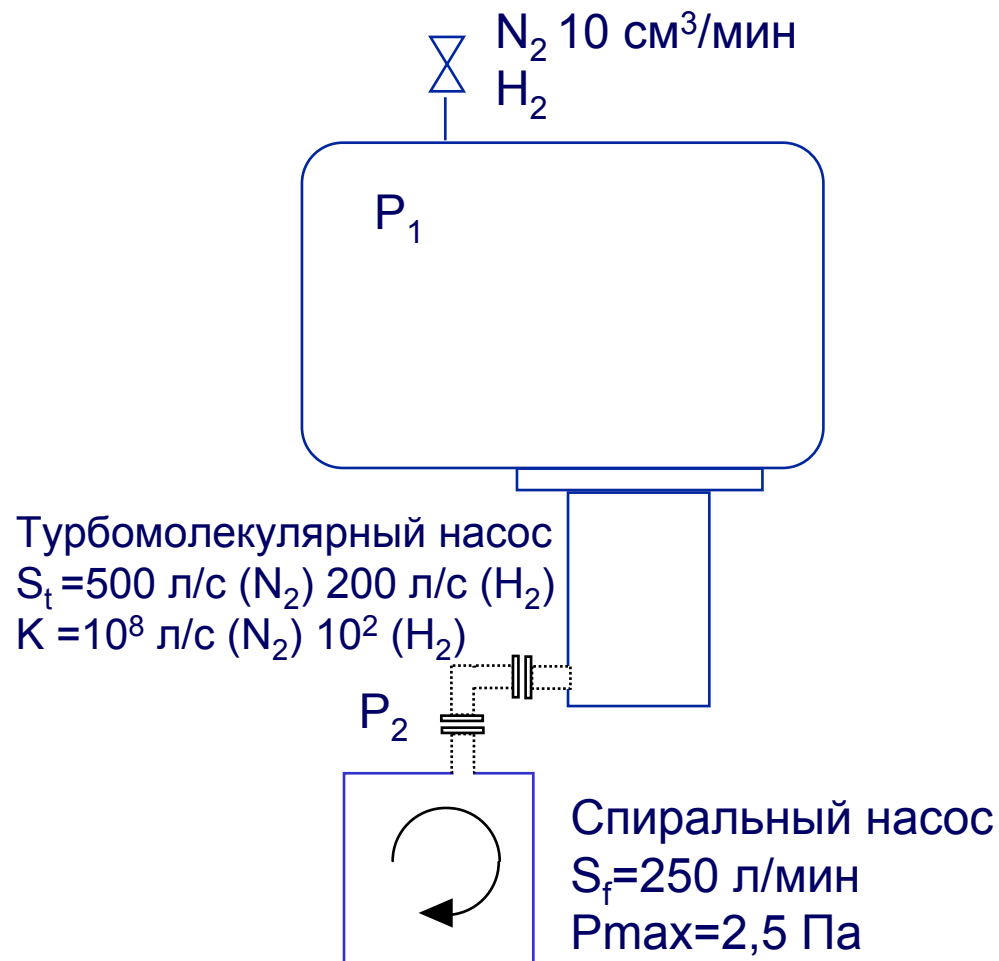


Пределный вакуум при большой газовой нагрузке

АЗОТ

$$P_2 = 10^5 \text{ Па} \cdot \frac{0,1 \text{ см}^3 / \text{мин}}{S_f} = 4 \text{ Па}$$

$$P_2 = 4 \text{ Па} \cdot \frac{0,1 \text{ см}^3 / \text{мин}}{S_t} = 10^{-6} \text{ Па}$$

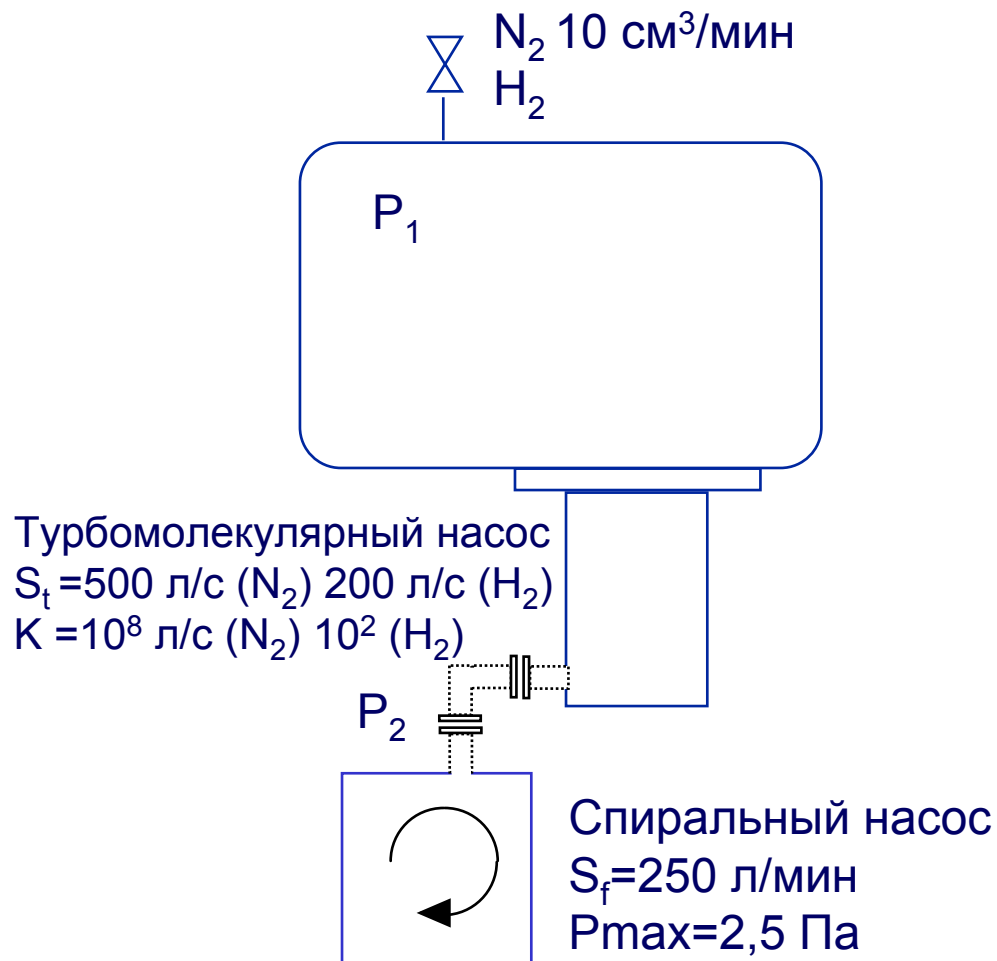


Предельный вакуум при большой газовой нагрузке

ВОДОРОД

$$P_2 = 10^5 \text{ Па} \cdot \frac{0,1 \text{ см}^3 / \text{мин}}{S_f} = 4 \text{ Па}$$

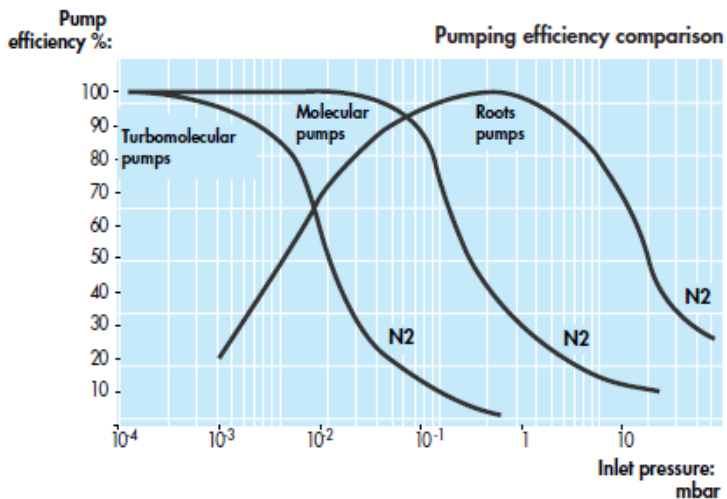
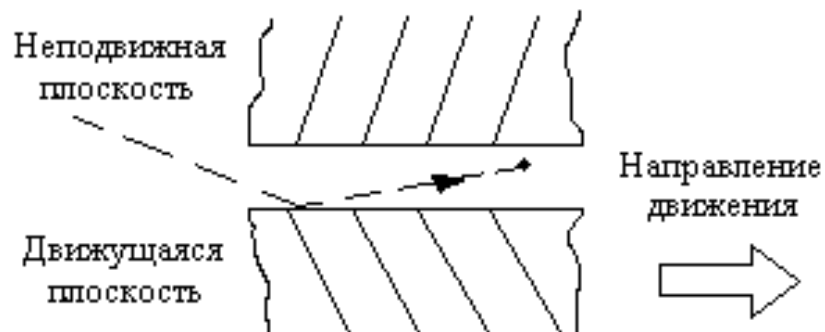
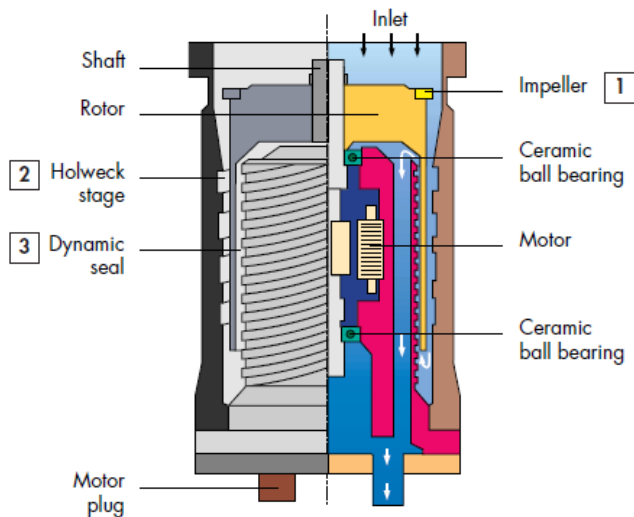
$$P_2 = 4 \text{ Па} / K = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$$



Молекулярные насосы

спираль Хольвека

Adixen-Alcatel MDP 5011



Параметры (Alcatel MDP 5011):

Входное отверстие DN 63

Скорость откачки 7,5 л/с

Степень сжатия 10^3 (H_2) 10^9 (N_2)

Рабочее давление 10^3 - 10^{-4} Па

Давление выхлопа $4 \cdot 10^3$ Па

Адсорбционные насосы

Принцип – физ. сорбция на поверхности
Требуется развитая поверхность

Адсорбенты –

Силикогель

Алюмогель

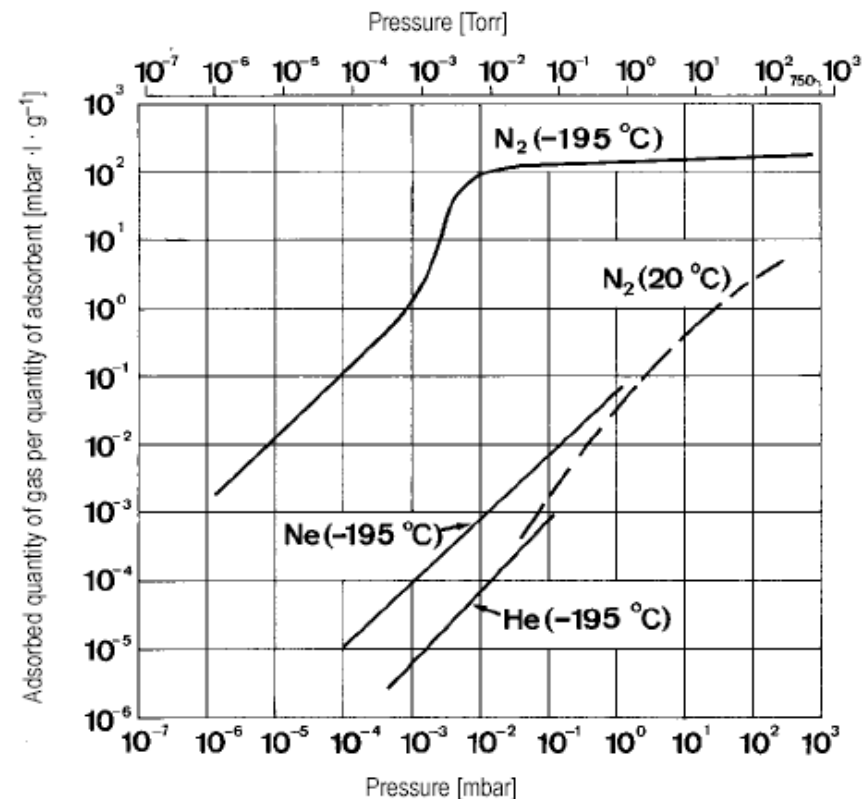
Активированный уголь

Цеолиты – размер пор 1,3 нм, площадь поверхности 1000 м²/г

Откачка – при 77 К, регенерация 400 К.

Плохо откачивают инертные газы

Предельный вакуум 10⁻² Па



Емкость адсорбционного насоса

Считая, что адсорбционный насос насыщается, когда один монослой адсорбента покрывается атомами остаточного газа, найти емкость адсорбционного насоса при удельной площади поверхности $1000 \text{ м}^2/\text{г}$

Емкость адсорбционного насоса

Считая, что адсорбционный насос насыщается, когда один монослой адсорбента покрывается атомами остаточного газа, найти емкость адсорбционного насоса при удельной площади поверхности $1000 \text{ м}^2/\text{г}$

1 монослой - $\sim 10^{15}$ частиц/ см^2 - 10^{22} частиц/г – $40 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{г}$ – $400 \text{ л} \cdot \text{мБар}/\text{г}$

Емкость адсорбционного насоса

Вакуумный объем откачивается турбомолекулярным насосом с производительностью 500 л/с. Для поддержания форвакуума на выхлопе насоса используется адсорбционный насос с массой адсорбента 1 кг. Давление в камере составляет 10^{-3} Па. Определите время непрерывной работы до насыщения адсорбционного насоса

Емкость адсорбционного насоса

Вакуумный объем откачивается турбомолекулярным насосом с производительностью 500 л/с. Для поддержания форвакуума на выхлопе насоса используется адсорбционный насос с массой адсорбента 1 кг. Давление в камере составляет 10^{-3} Па. Определите время непрерывной работы до насыщения адсорбционного насоса

$$4 \cdot 10^4 \text{ л} \cdot \text{Па} / \text{г} \cdot 1000 \text{ г} / 10^{-3} \text{ Па} / 500 \text{ л} / \text{с} = 8 \cdot 10^7 \text{ с}$$

Емкость адсорбционного насоса

Вакуумный объем откачивается форвакуумным насосом до предельного давления 1 Па, после чего форвакуумный насос отсекается и подключается адсорбционный насос. Определить предельный вакуум, который может быть получен в объеме

Емкость адсорбционного насоса

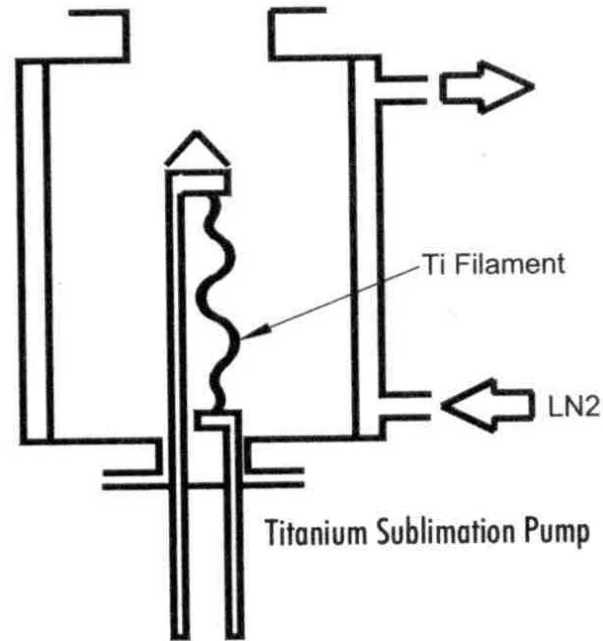
Вакуумный объем откачивается форвакуумным насосом до предельного давления 1 Па, после чего форвакуумный насос отсекается и подключается адсорбционный насос. Определить предельный вакуум, который может быть получен в объеме

В воздухе содержится 1% аргона, не откачиваемого насосом. Предельный вакуум будет определяться аргоном и составит 10^{-2} Па

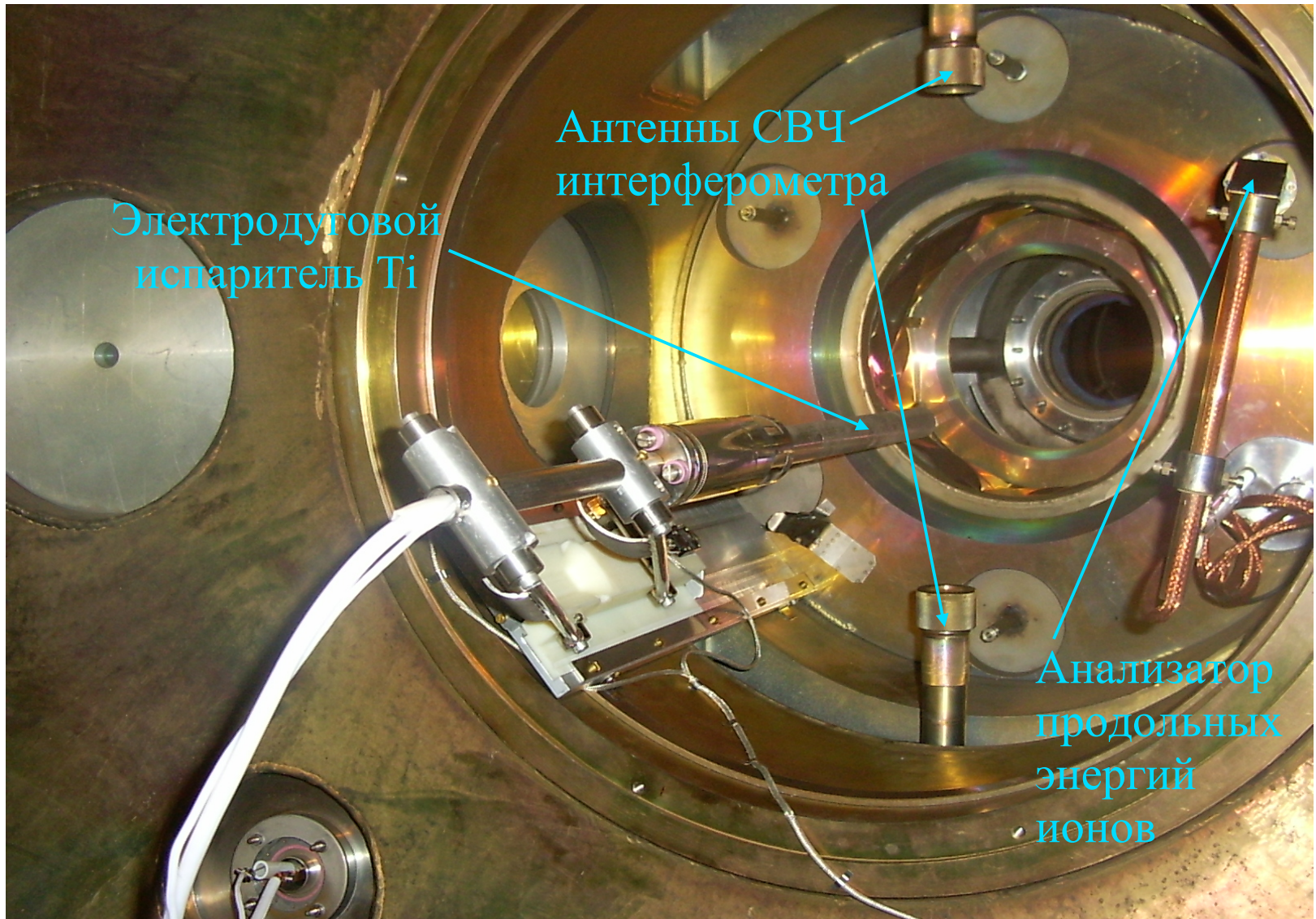
Геттерные насосы

Хемосорбция или растворение откачиваемых газов
Рабочее вещество (абсорбент) – титан

Высокая скорость откачки, большая емкость, компактность



Вакуумные условия и подготовка первой стенки (ГДЛ, эксперимент SHIP)



Нераспыляемые геттеры

Материалы с пористой структурой и высокой скоростью диффузии газов

Пористый титан, TiV, ZrAl, Тактивации 350 - 650°C

LEP – лента 30 мм с покрытием 100 мкм Zr84%-Al16% (геттер St101)
2000 л/с·м, $2 \cdot 10^{-10}$ Па

Магнито-разрядные насосы

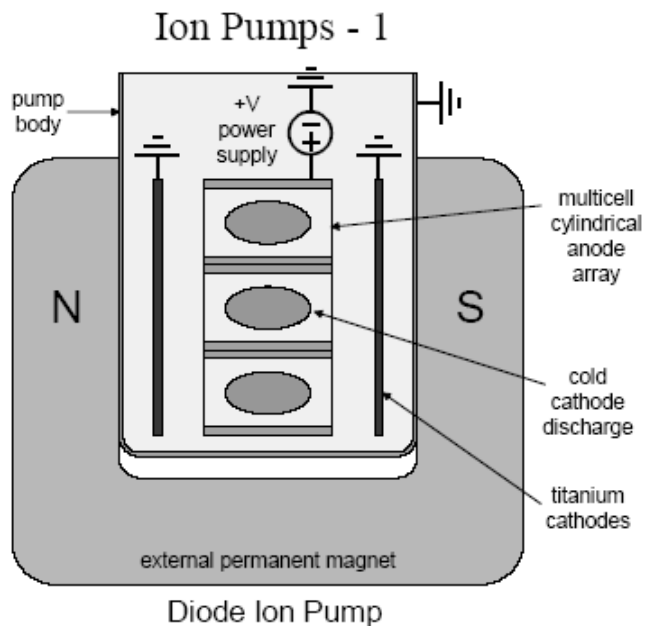
Используется Пеннинговский разряд

start с 10^{-1} Па → до 10^{-8} Па

Система с осциллирующими электронами

Электроны ионизируют газ, ускоренные ионы газа распыляют титан
→ работает как геттер

Не требуют форвакуумной откачки



Крионасосы

Эффекты:

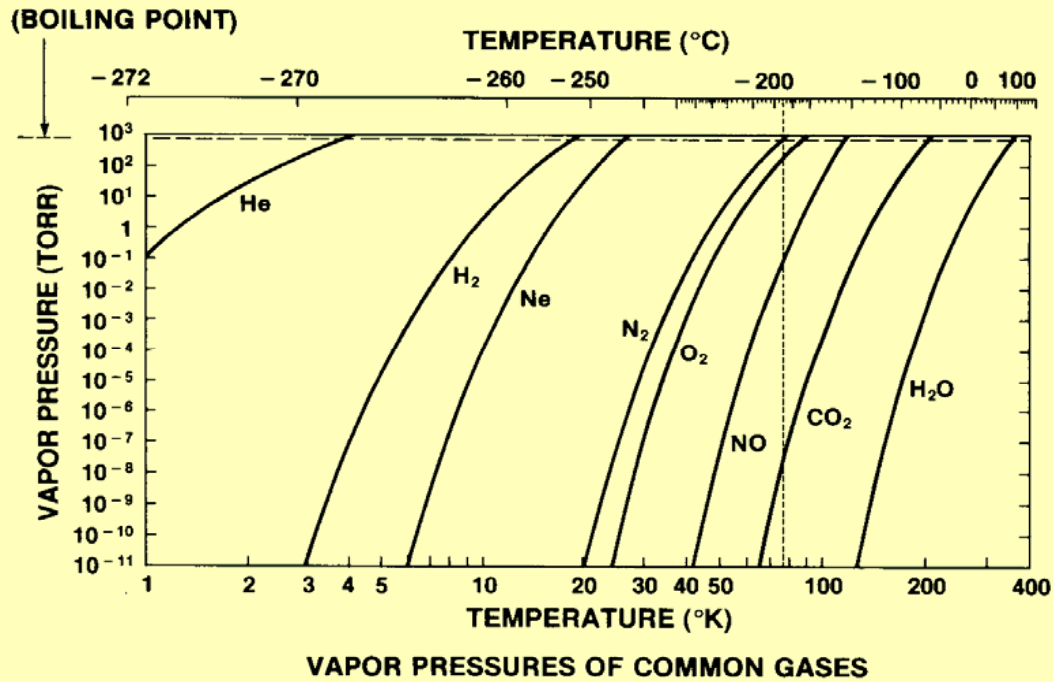
Криоконденсация – конденсация газов при низких температурах

Криосорбция – поглощение газа веществами с развитой поверхностью

Криозахват – захват неконденсирующихся газов в слое конденсата

Криоконденсация

Наибольшее распространение – азотная ловушка



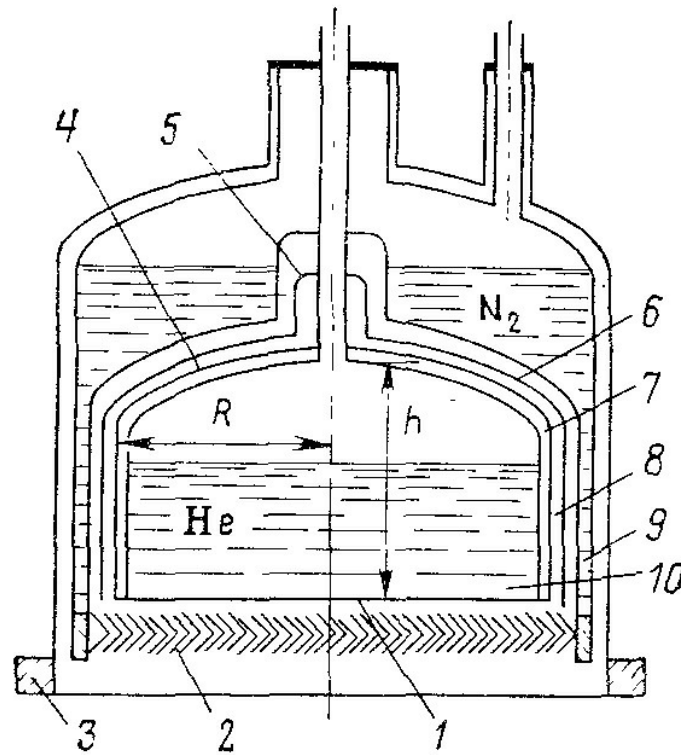
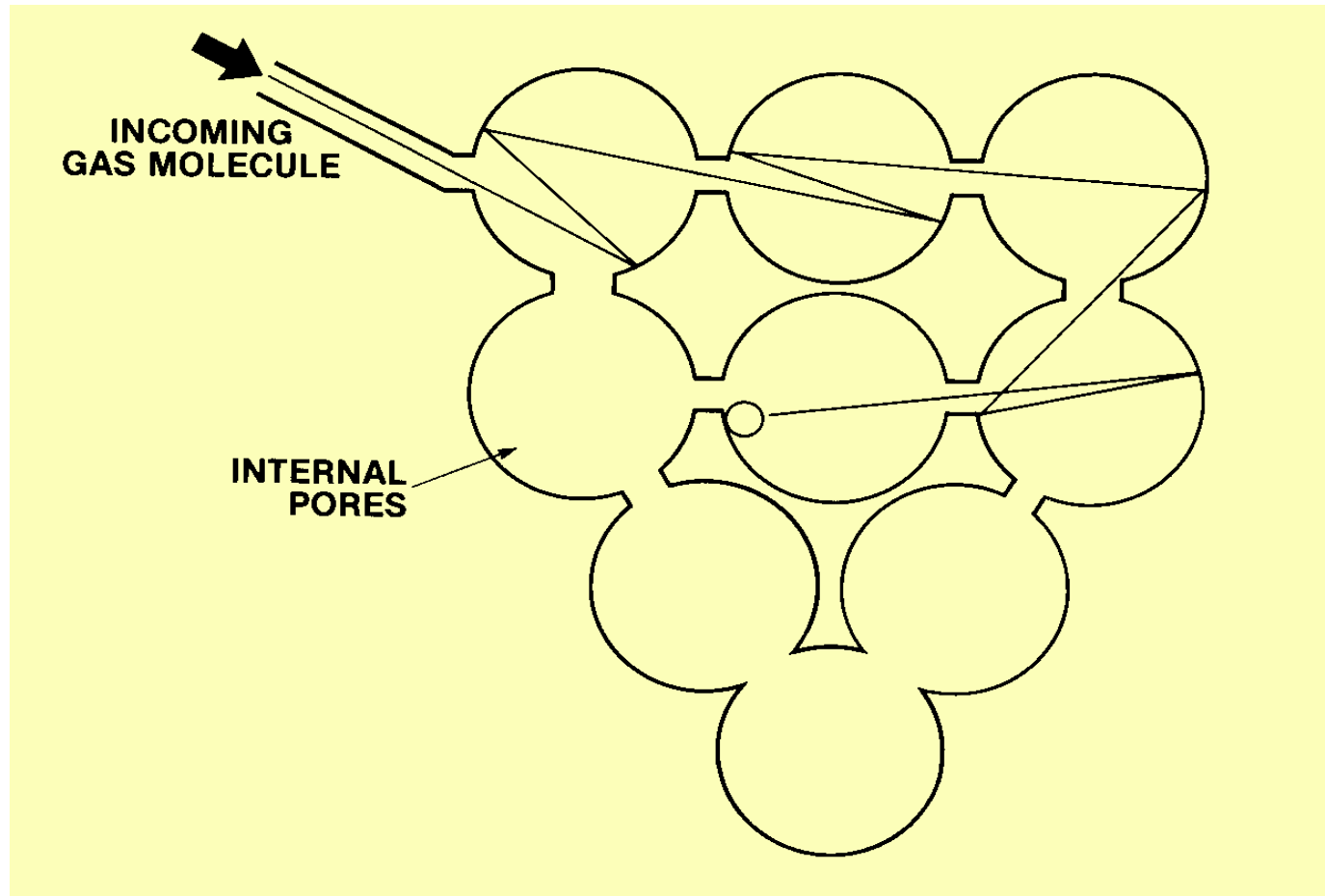


Рис. 9.3. Улучшенный вариант крионасоса-ванны для экстремально низких давлений и длительного времени работы [9.7]:

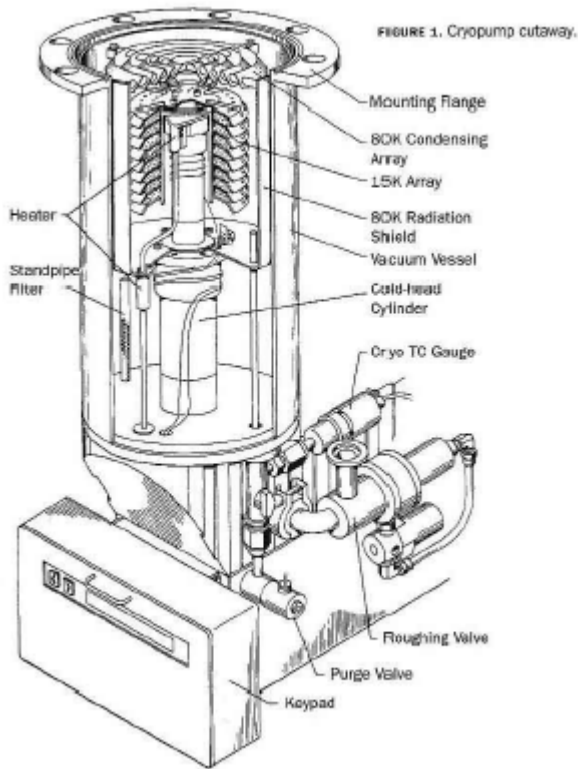
1 — поверхность конденсации, покрытая Ag; 2 — шевронный экран; 3 — подсоединительный фланец; 4 — рубашка с двойными стенками, покрытыми Ag; 5 — слой Si толщиной 0,2 мм; 6 — экран, покрытый с наружной стороны Ag и зачерненный с внутренней стороны; 7 — камера, заполненная неонам; 8 — зазор, равный d ; 9 — ванна с жидким N_2 ; 10 — ванна с жидким He

Криосорбция



Активный элемент – активированный уголь

Крионасосы Cryo-Torr

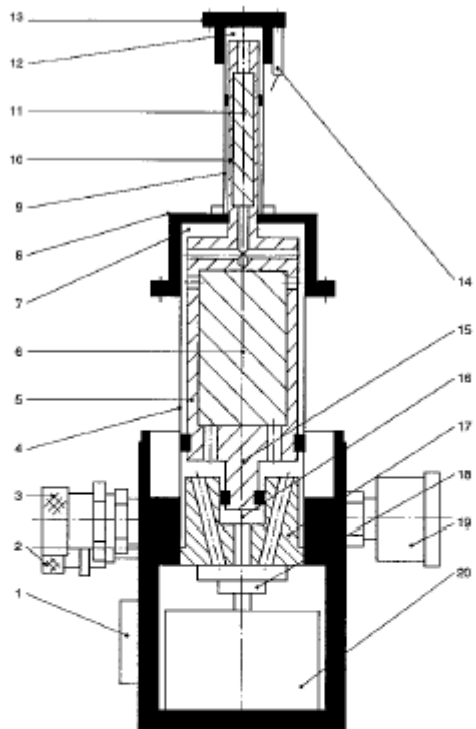


$T=10-30$ К, теплоноситель - гелий

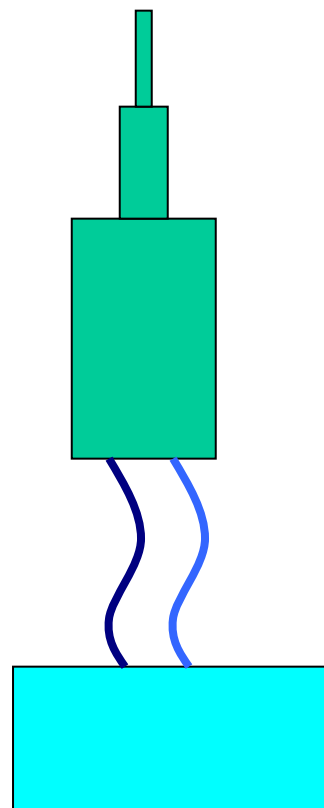
Скорость откачки $0,3 - 6$ м³/с

Параметр включения $\sim 10^4$ Па·л

Емкость (водород) 3-40 стандартных литров

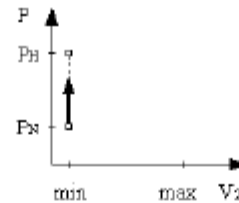
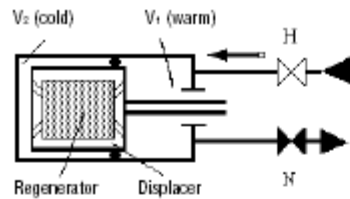


- | | |
|---|--|
| 1 Electric connections and current feedthrough for the motor in the cold head | 11 Regenerator, 2nd stage |
| 2 He high pressure connection | 12 Expansion volume, 2nd stage |
| 3 He low pressure connection | 13 2nd (cooling) stage (copper flange) |
| 4 Cylinder, 1st stage | 14 Measurement chamber for the vapor pressure |
| 5 Displacer, 1st stage | 15 Control piston |
| 6 Regenerator, 1st stage | 16 Control volume |
| 7 Expansion volume, 1st stage | 17 Control disk |
| 8 1st (cooling) stage (copper flange) | 18 Control valve |
| 9 Cylinder, 2nd stage | 19 Gauge for the hydrogen vapor pressure thermometer |
| 10 Displacer, 2nd stage | 20 Motor in the cold head |



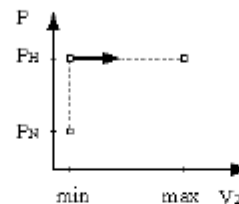
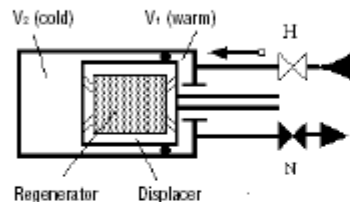
Компрессор

Процесс Гриффина - Макнагона



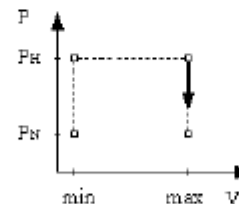
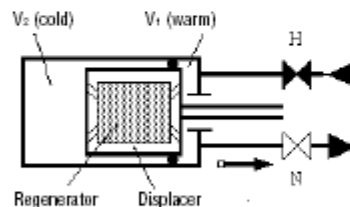
Phase 1:

The displacer is at the left dead center; V_2 where the cold is produced has its minimum size. Valve N remains closed, H is opened. Gas at the pressure p_H flows through the regenerator into V_2 . There the gas warms up by the pressure increase in V_1 .



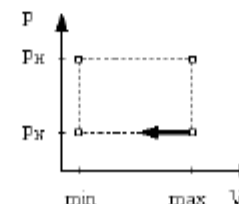
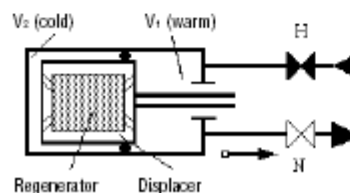
Phase 2:

Valve H remains open, valve N closed: the displacer moves to the right and ejects the gas from V_1 through the regenerator to V_2 where it cools down at the cold regenerator; V_2 has its maximum volume.



Phase 3:

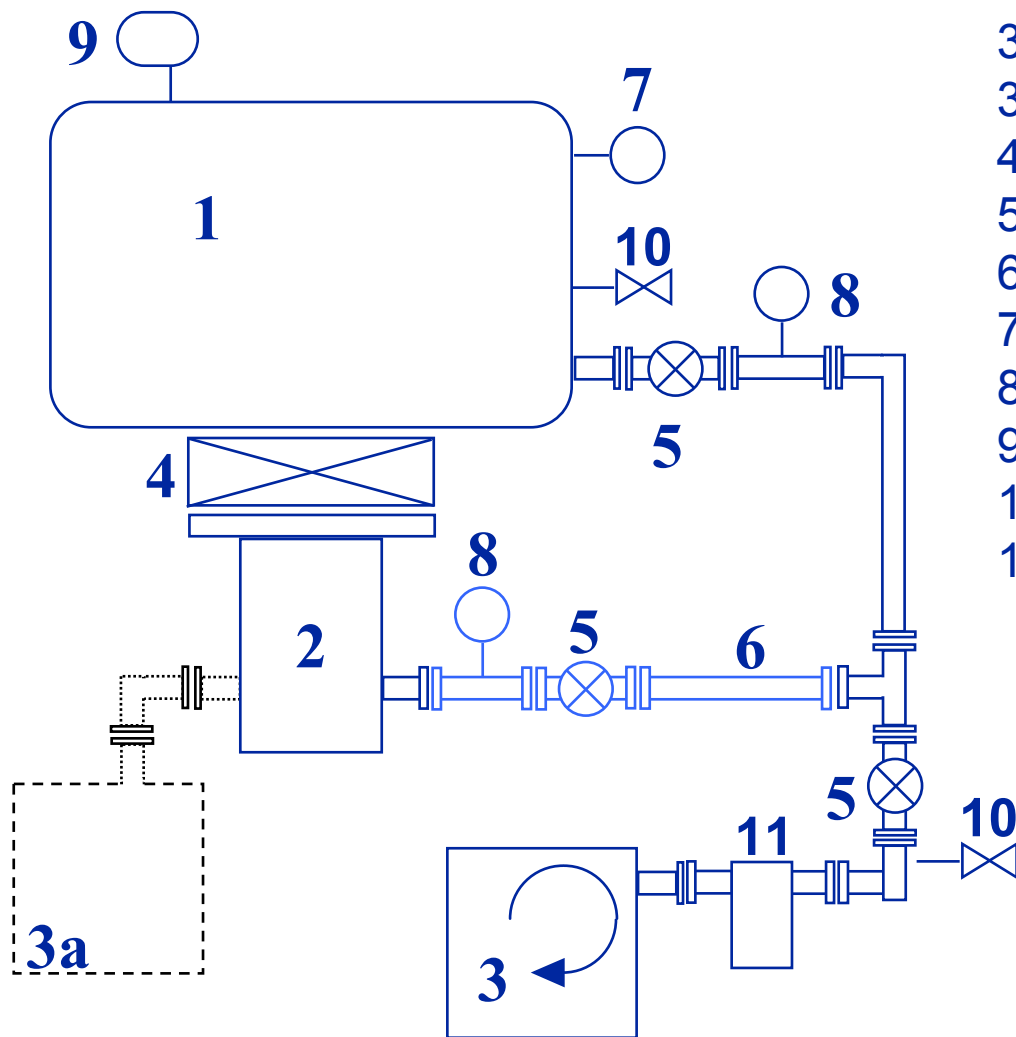
Valve H is closed and the valve N to the low pressure reservoir is opened. The gas expands from p_H to p_N and thereby cools down. This removes heat from the vicinity and it is transported with the expanding gas to the compressor.



Phase 4:

With valve N open the displacer moves to the left; the gas from $V_{2,max}$ flows through the regenerator, cooling it down and then flows into the volume V_1 and into the low pressure reservoir. This completes the cycle.

Вакуумная система



1. Вакуумная камера
2. Высоковакуумный насос
3. Форвакуумный насос
- 3а. Форвакуумный насос
4. Шибер
5. Вакуумные клапаны
6. Байпасс
7. Высоковакуумные лампы
8. Форвакуумные лампы
9. Масс-спектрометр
10. Клапан напуска атмосферы
11. Цеолитовая ловушка

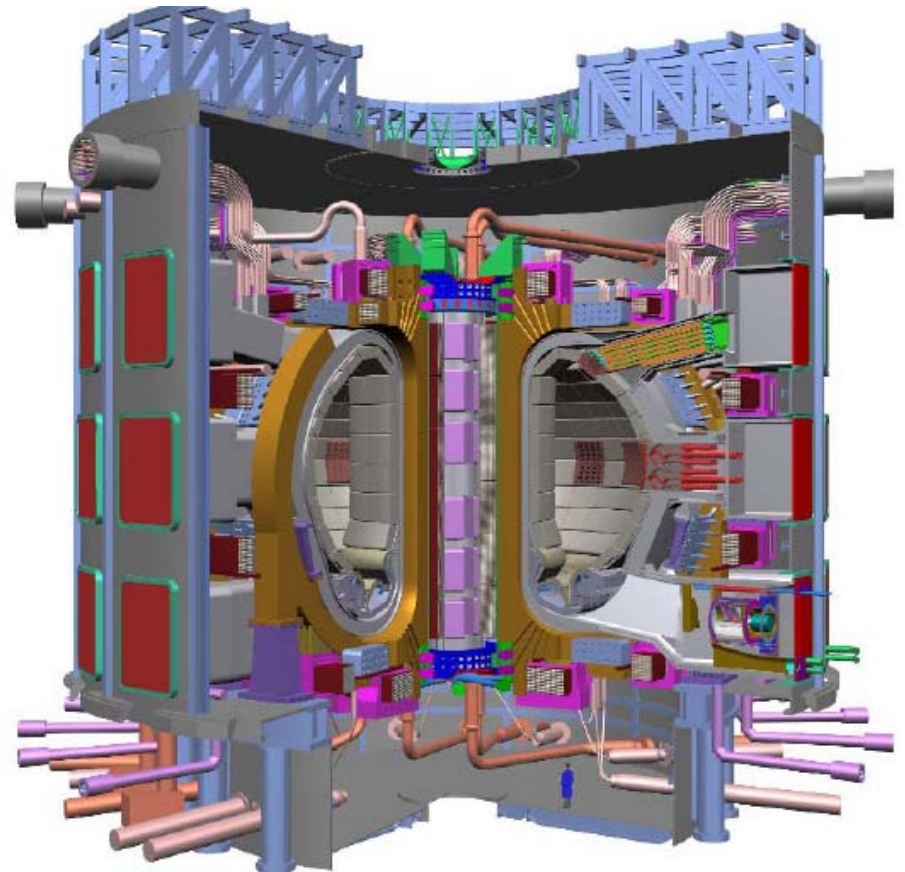
Вакуумная система токамака ИТЭР

Откачиваемый объем 10^4 м^3

Предельный вакуум 10^{-4} Па (водород)

Большая газовая и тепловая нагрузка

Работа с тритием



Вакуумная система токамака ИТЭР

Вакуумные системы

- Основной объем (1400 м³)
- Криостат (8400 м³)
- Инжекторы нейтралов (160 м³)
- Служебные и диагностические системы

Вакуумная система токамака ИТЭР

Основное средство откачки-

Криосорбционные насосы
(активированный уголь, 4,7 К)

Скорость откачки 80 м³/с

Цикл работа-регенерация 600 с

Форвакуумные насосы-

Насосы Рутса 250 м³/час

Отсутствие органических
уплотнений



Вакуумная система ЛНС

Откачка криостата (10^{-4} Па)

Первичный вакуум - турбомолекулярные насосы

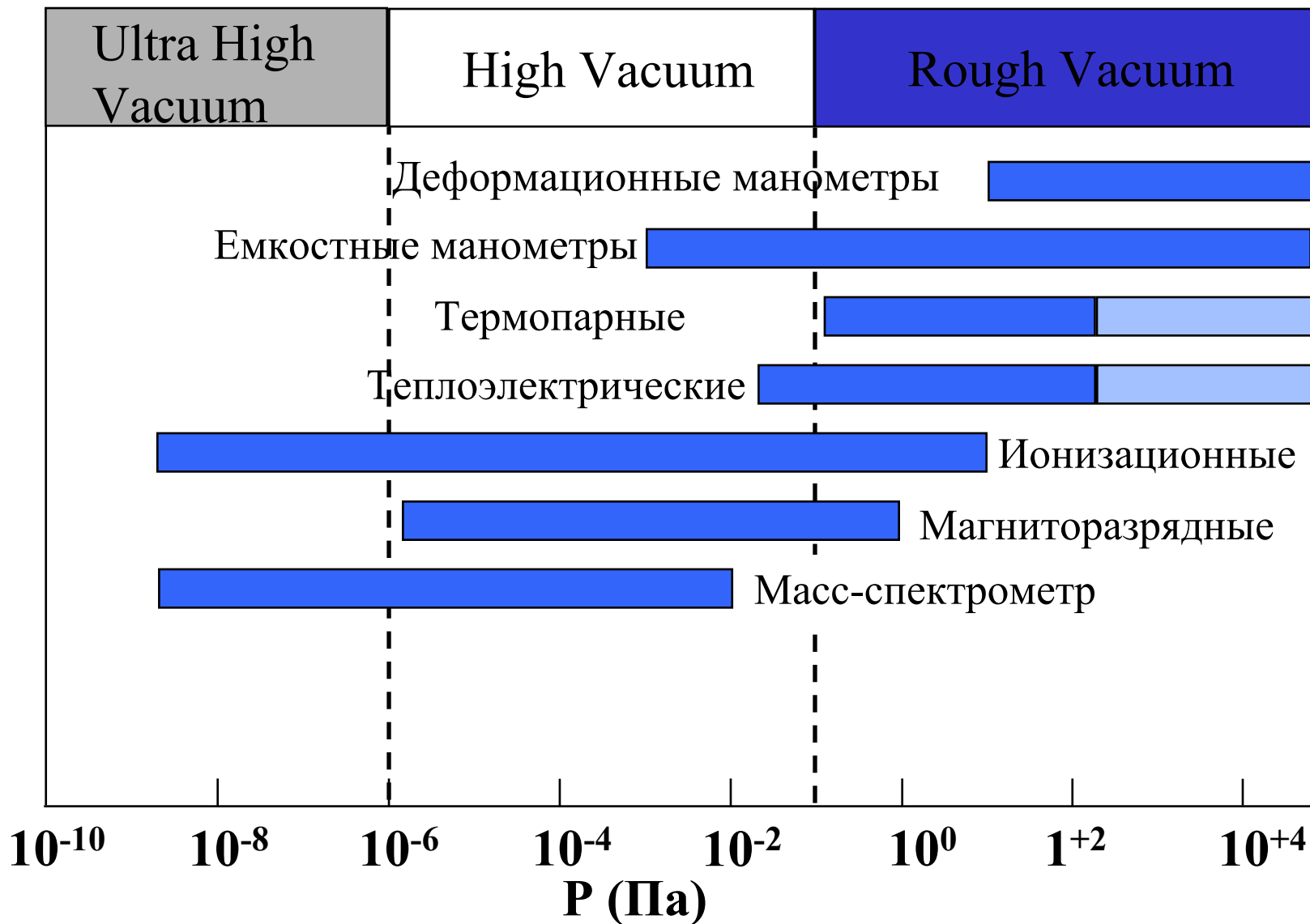
Поддержание вакуума – естественная криооткачка (1,9 К)

Откачка вакуумной камеры (10^{-6} Па)

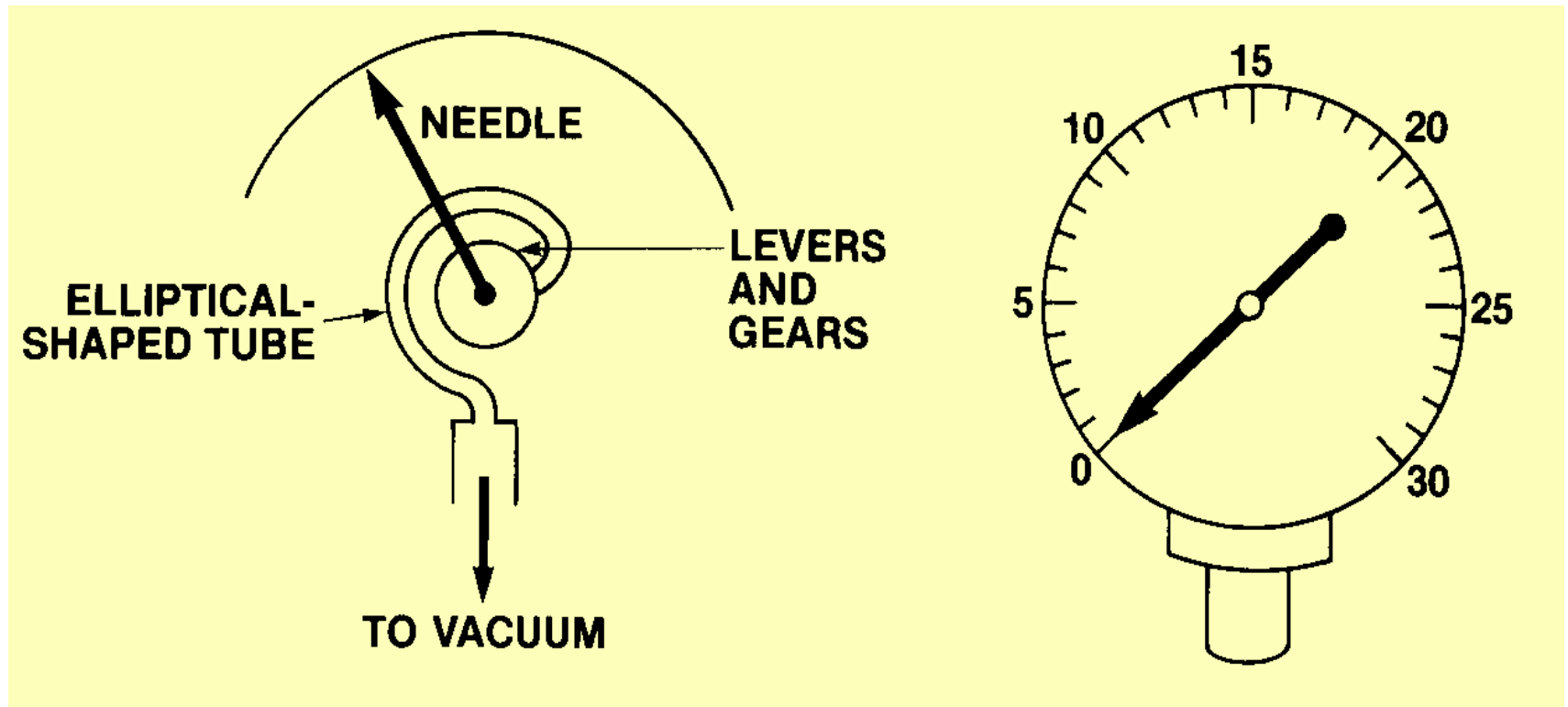
Криооткачка – ограничение из-за энерговыделения в камере (0,1-1 Вт/м)

Охлаждение камеры газообразным гелием (20 К)

Вакуумные измерения



Деформационные мановакуумметры

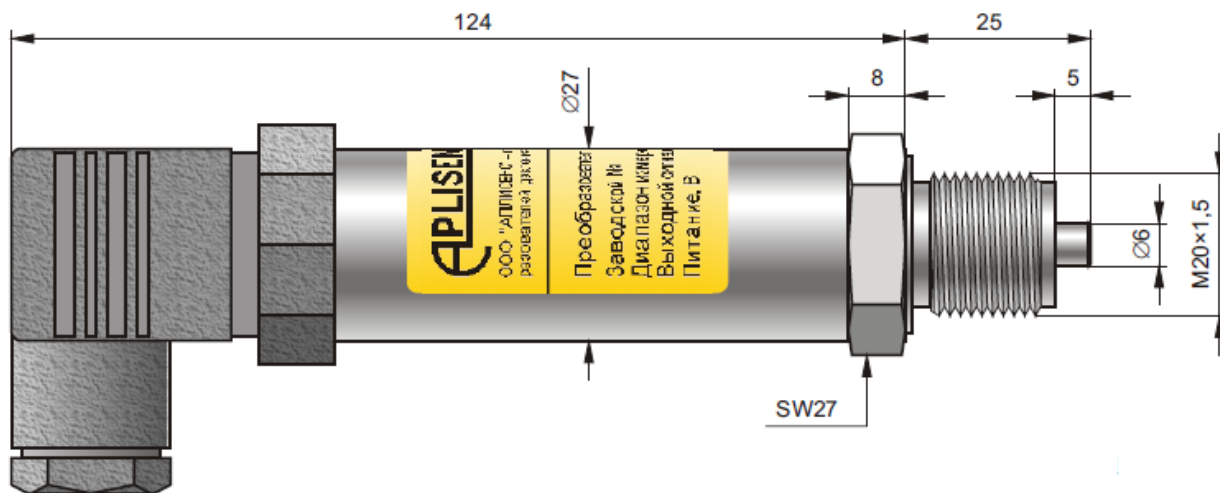


Абсолютные или относительные

$1 - 10^5$ Па

Не зависят от сорта газа

Пьезорезистивные мановакуумметры



Абсолютные или относительные

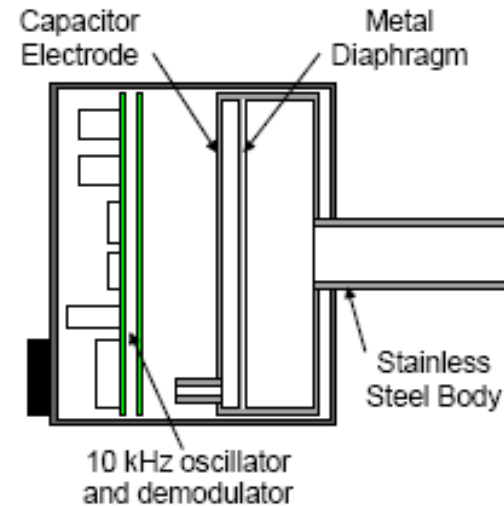
$2,5 \cdot 10^3 - 10^5$ Па

Погрешность 0,4 – 1%

Не зависят от сорта газа

Емкостной манометр

Capacitance Manometers - 1



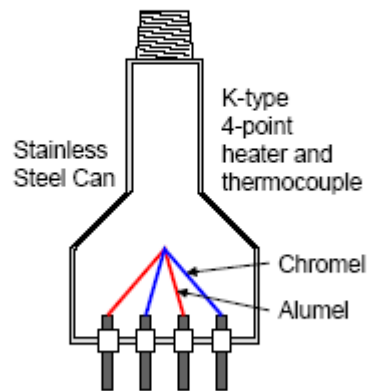
Баратрон (MKS instruments)

$10^{-5} - 10^5$ Па

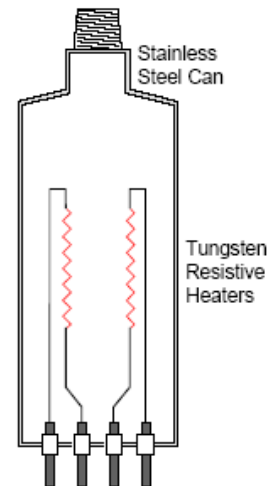
Точность 0,12 %

Тепловые манометры

Thermocouple Gauges - 1



Pirani Gauges - 1

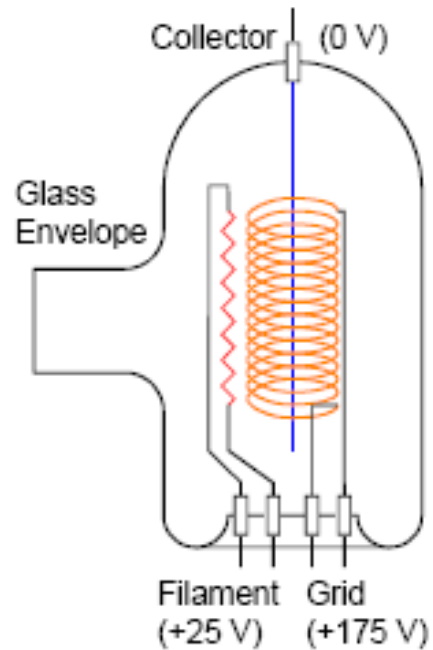


Разные газы имеют разную градуировку (теплопроводность зависит от сорта газа)

0.1 – 10^5 Па

MicroPirani (MKS inst) 10^{-3} – 10^5 Па

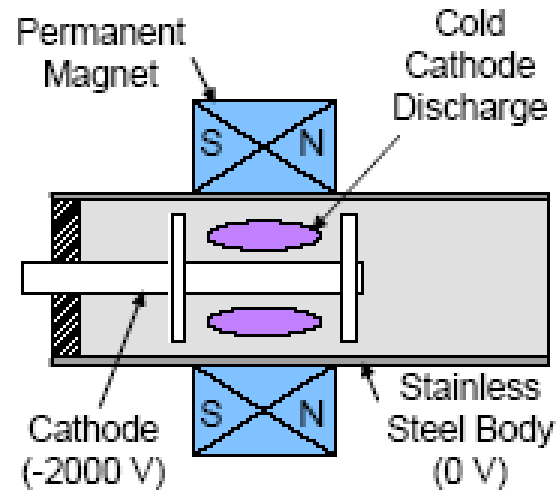
Ионизационные манометры



Лампа Байарда-Альперта

Измеряемый сигнал зависит от сорта газа
Можно проводить быстрые измерения

Магниторазрядные манометры



Ячейка Пеннинга

Ток разряда пропорционален давлению (до 10^{-10} Па)

Широкодиапазонные вакуумметры

Совмещают несколько ламп
Диапазон до 10^{-10} - 10^5 Па

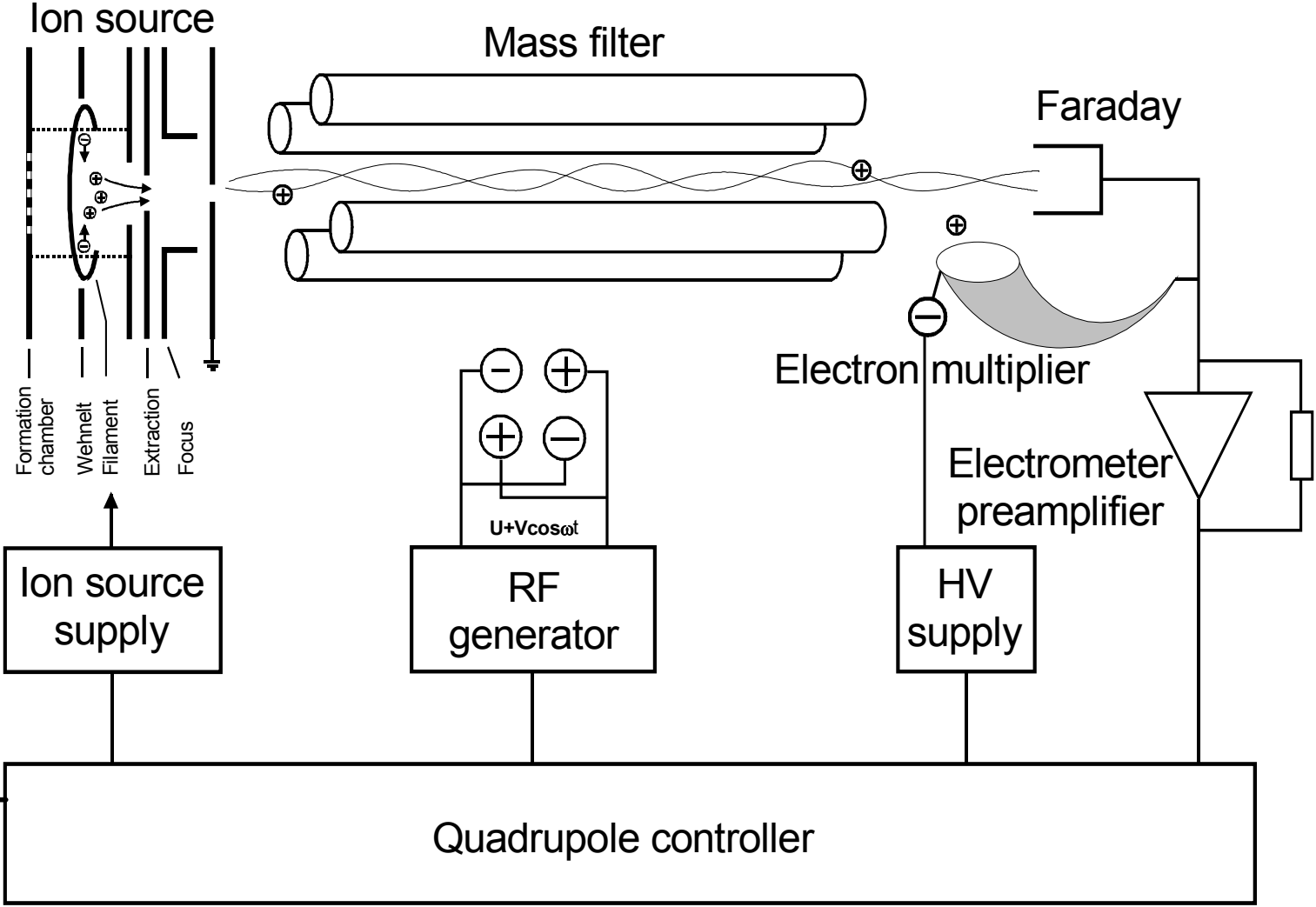
Выходное напряжение пропорционально
логарифму давления



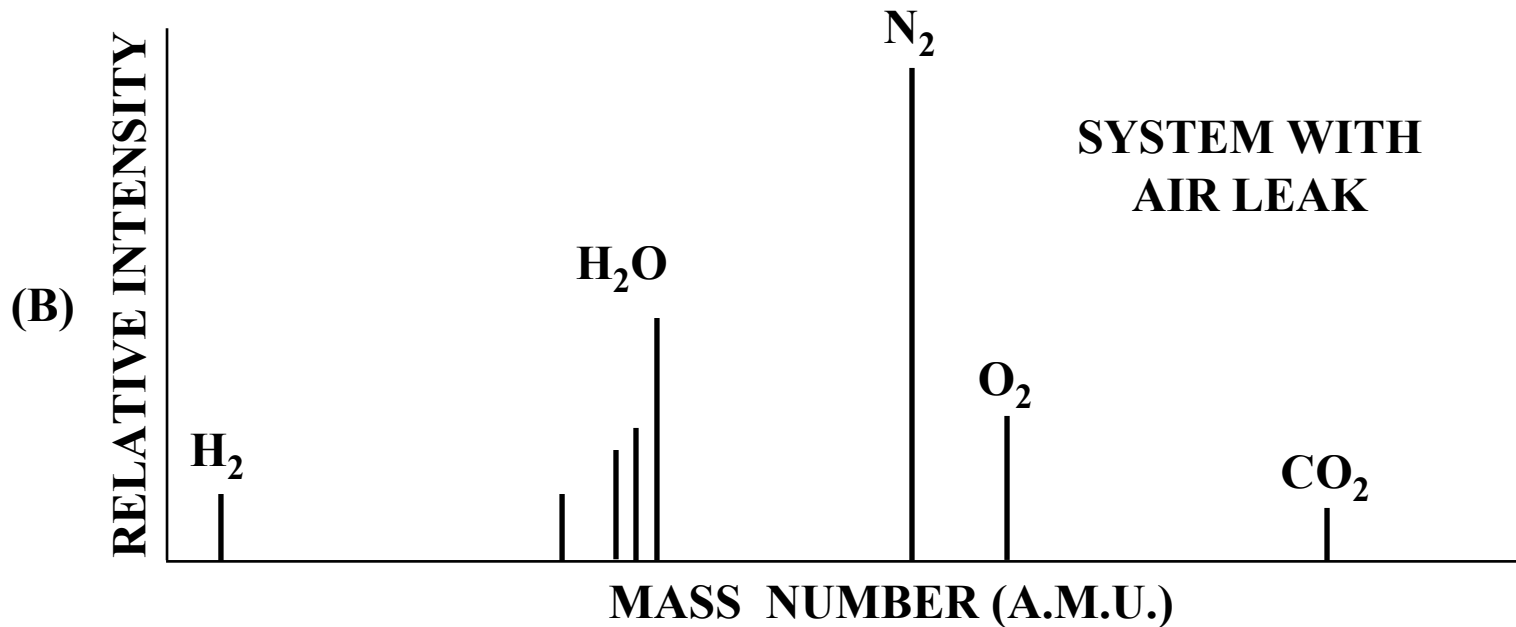
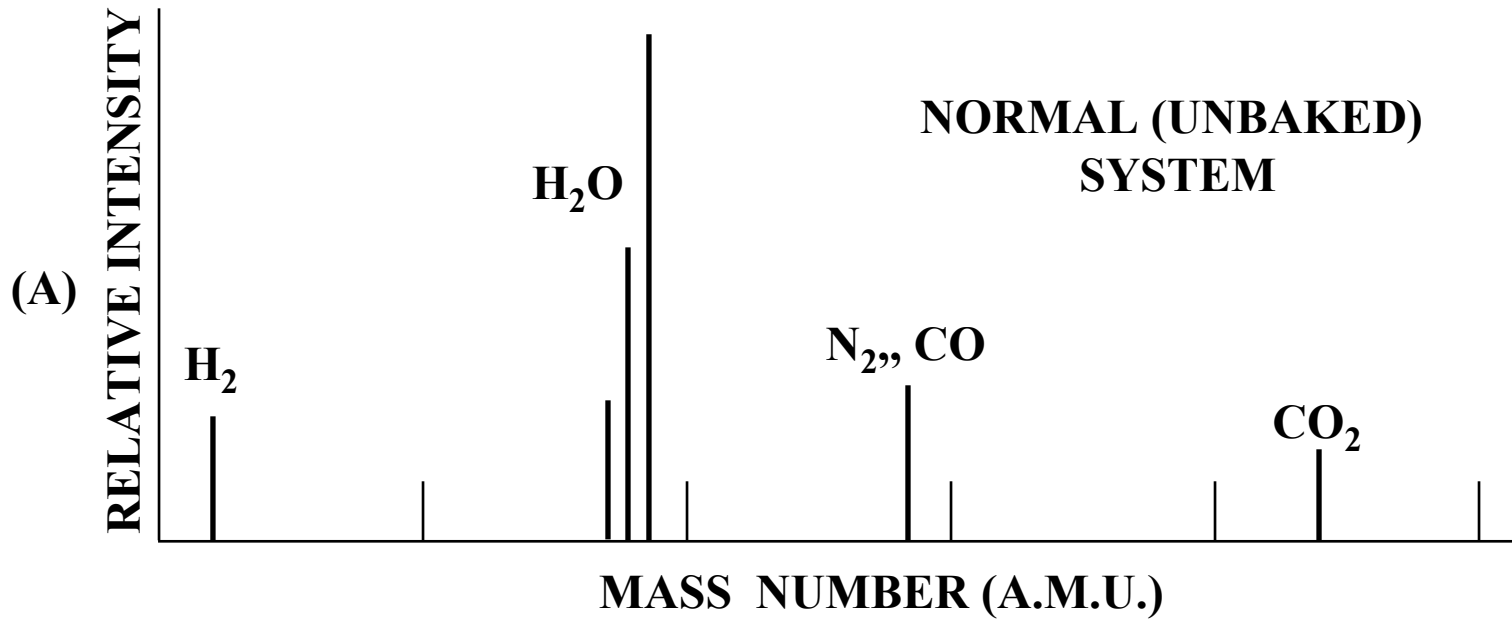
Pfeiffer PKR 251

$$P_{[\text{Па}]} = 10^{(1.67 \cdot U_{[B]} - 9.33)}$$

Масс-спектрометр

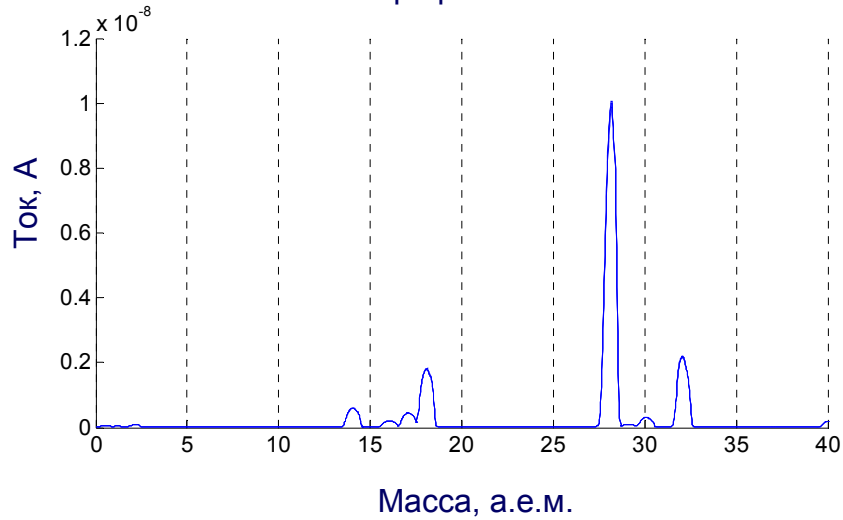


Масс-спектрометр

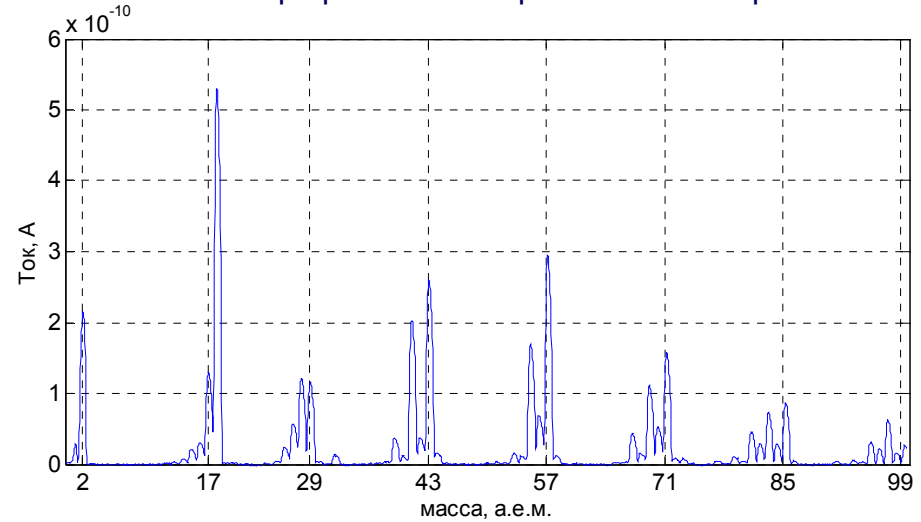


Масс-спектры в различных режимах

Масс-спектр при наличии течи



Масс-спектр при наличии органических загрязнений



Масс-спектр при отсутствии течи



Поиск течей

Методы течеискания

1. Компрессионный -нагнетание воздуха при $P > P_{\text{атм}}$
2. Люминесцентный
3. Искровой
4. Манометрический (контролирует проникновение по манометру при проникновении пробного вещества /спирт, бензин, вода, ацетон/) ← Для форвакуума
5. Галогенный
6. Масс-спектрометрический

ION SEPARATION IN MAGNETIC FIELD

