

# Вакуумная техника

Полосаткин Сергей Викторович, тел.47-73

пятница, 10.45 – 12.20

<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

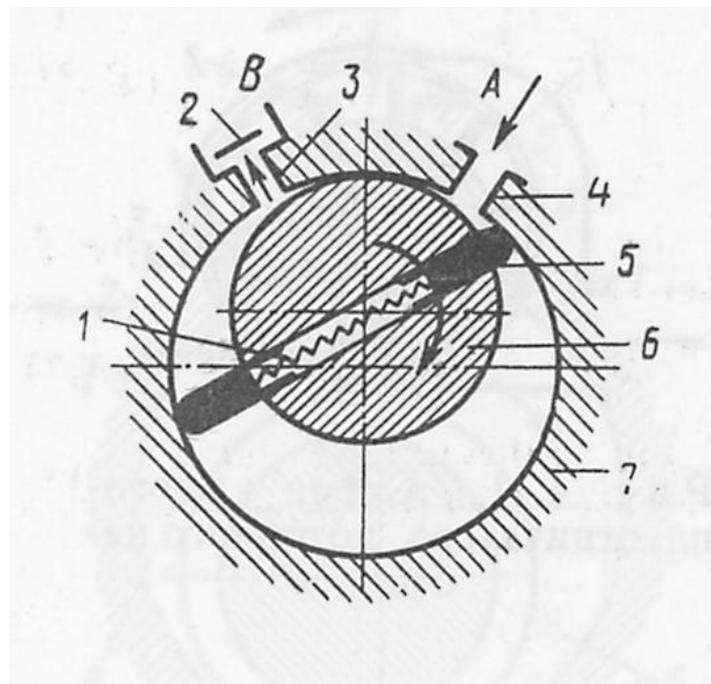
## Параметры насосов:

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

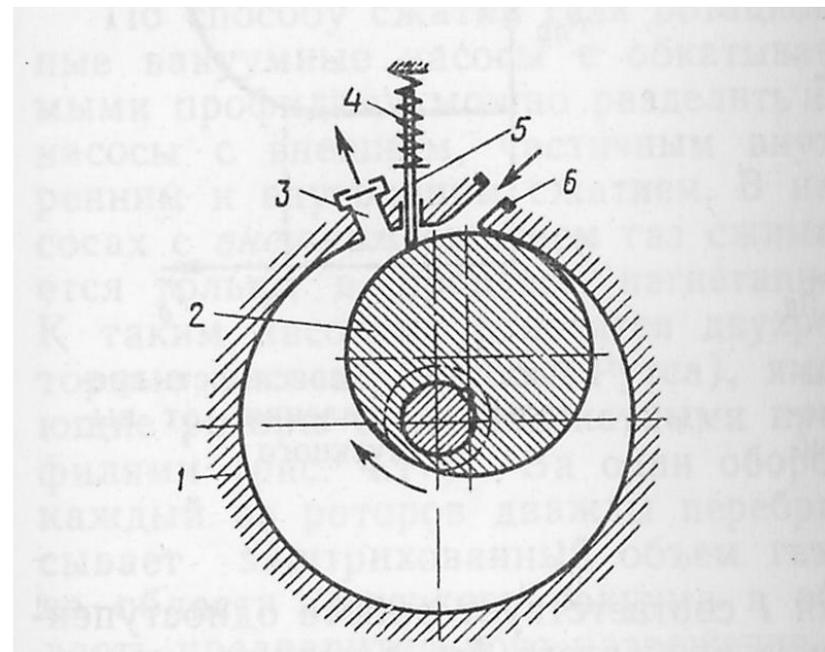
Невозможно с помощью одного типа насосов обеспечить вакуум во всем используемом диапазоне ( $10^5 - 10^{-11}$  Па)

# 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  $P_{\text{perm}}$  и уменьшает парциальную составляющую паров воды

## Масло для вращательных насосов

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

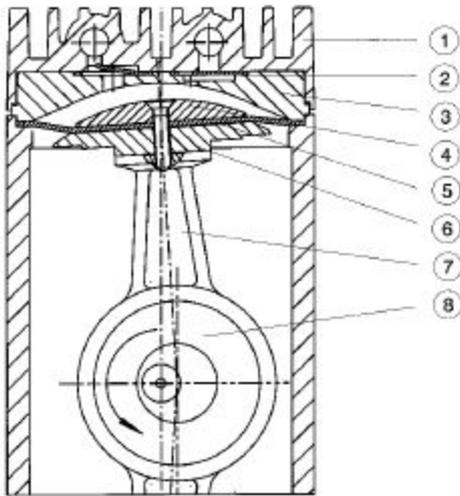
## Указания к работе с форвакуумным насосом:

- 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

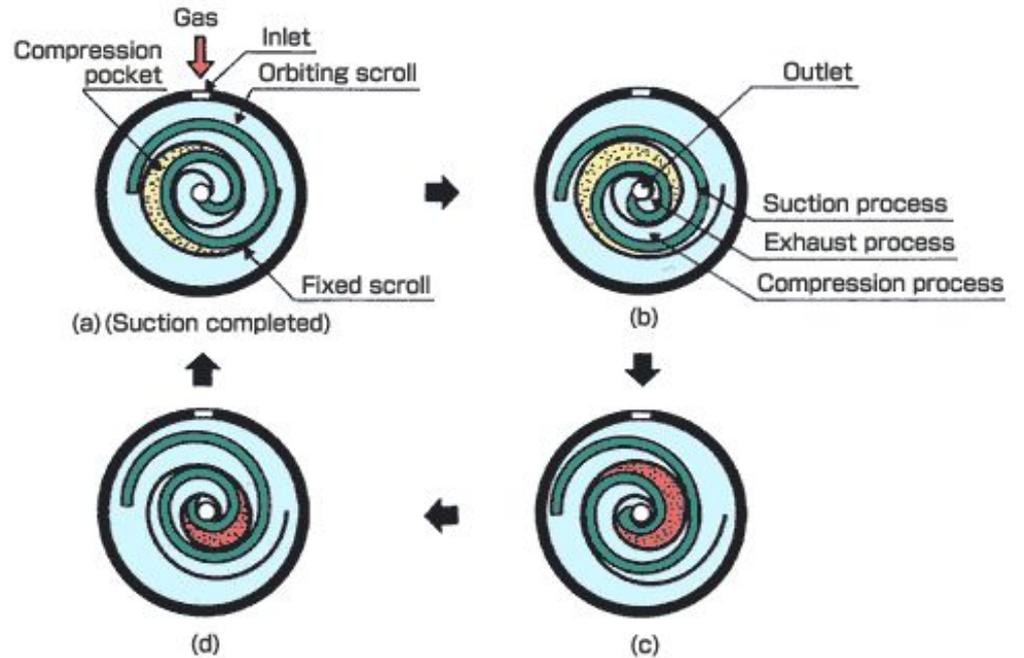
# Безмасляные насосы

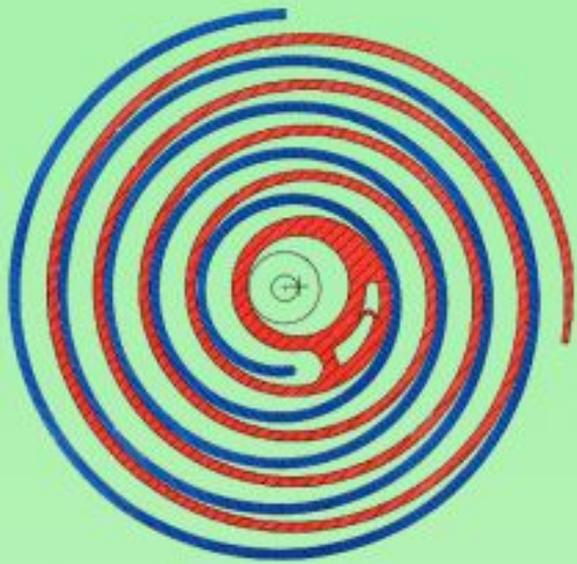
Диафрагменные – до 100 Па

Спиральные – до 1 Па

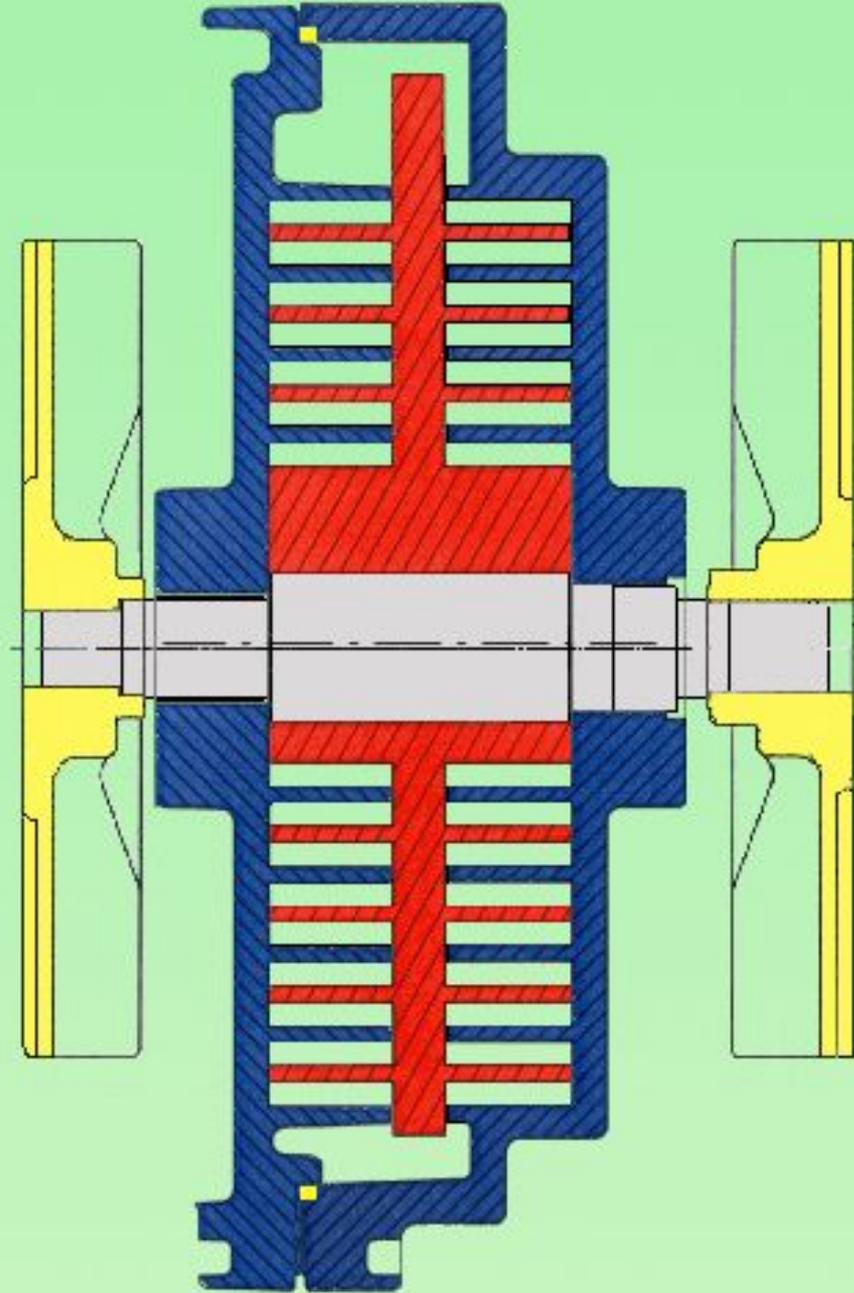


- |                    |                            |
|--------------------|----------------------------|
| (1) Casing lid     | (5) Diaphragm              |
| (2) Valves         | (6) Diaphragm support disk |
| (3) Lid            | (7) Connecting rod         |
| (4) Diaphragm disk | (8) Eccentric disk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

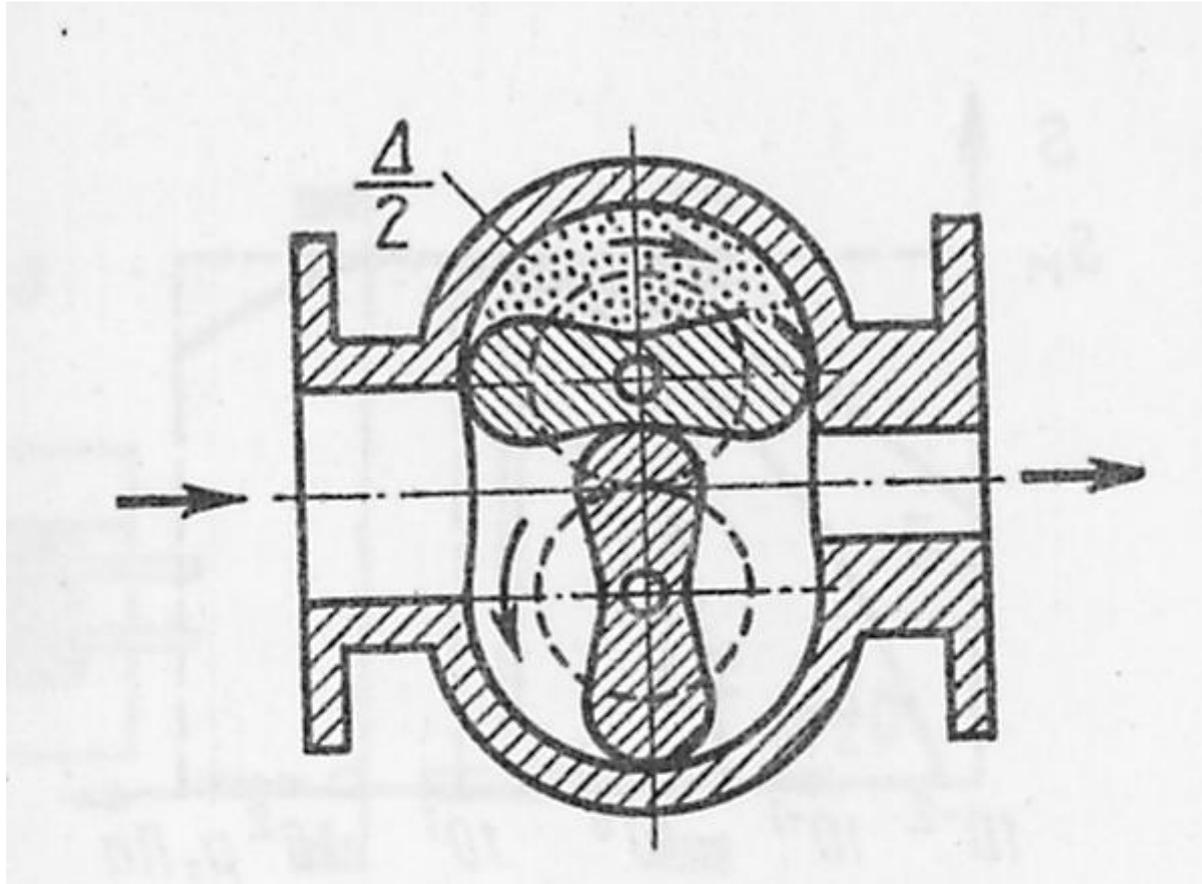




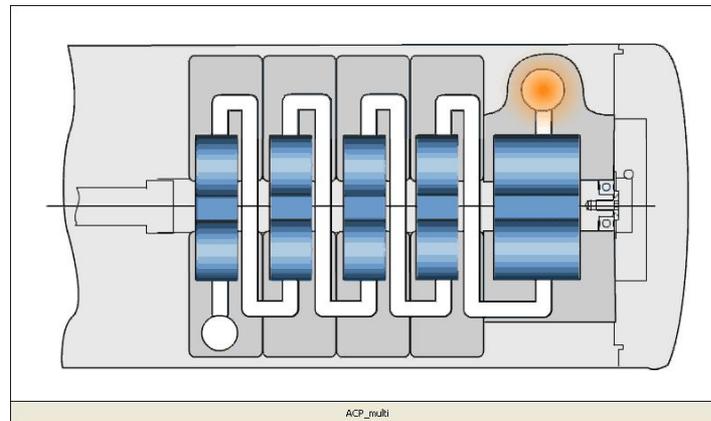
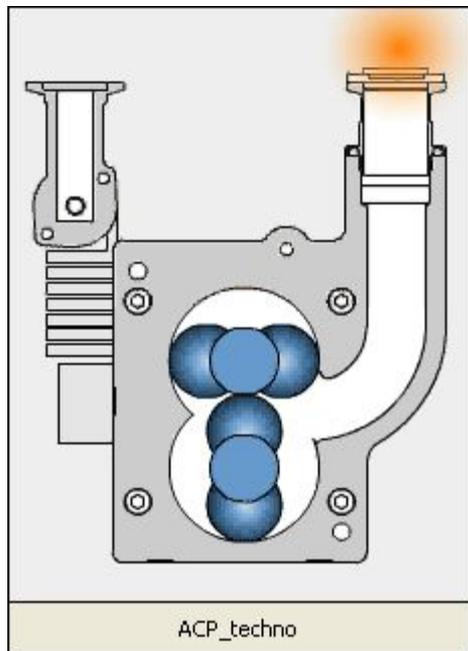
ISP Structure



Двухроторные (Рутса) – до  $10^{-3}$  Па



## Двухроторные (Рутса) – до $10^{-3}$ Па

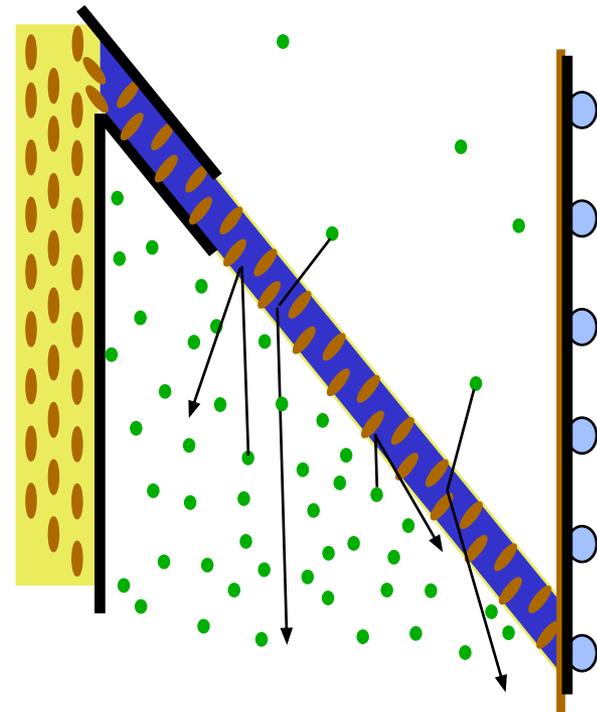
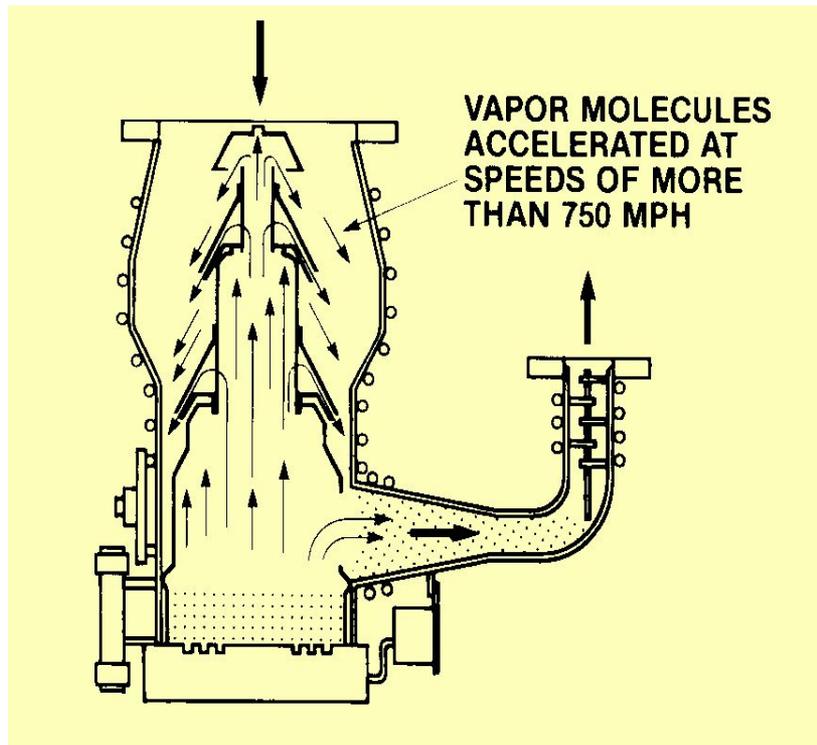


# Высоковакуумные насосы

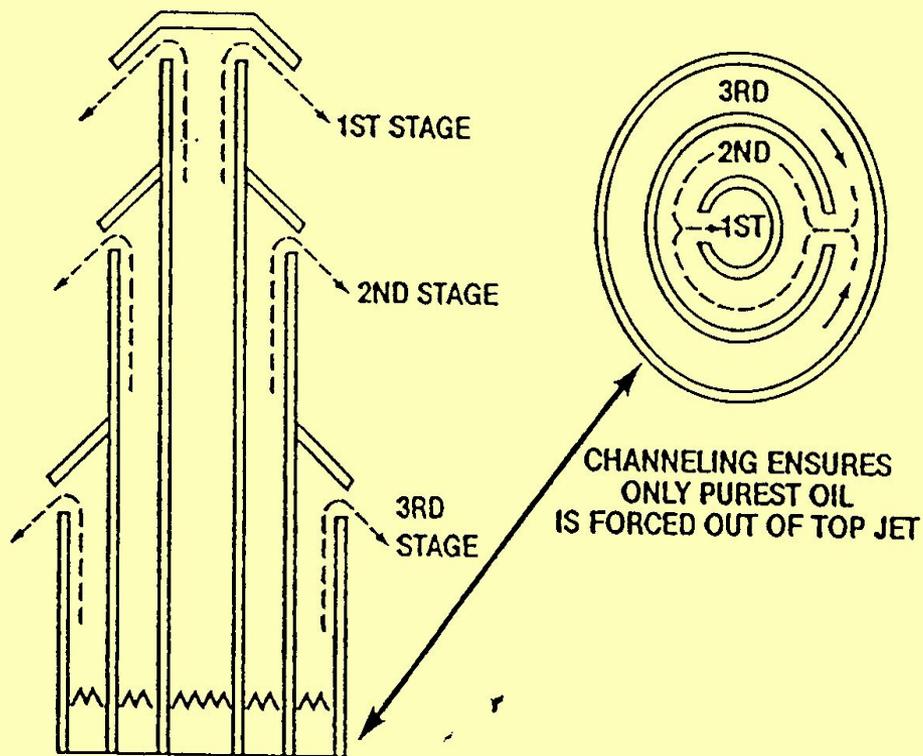
Пароструйные – до  $10^{-6}$  Па

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

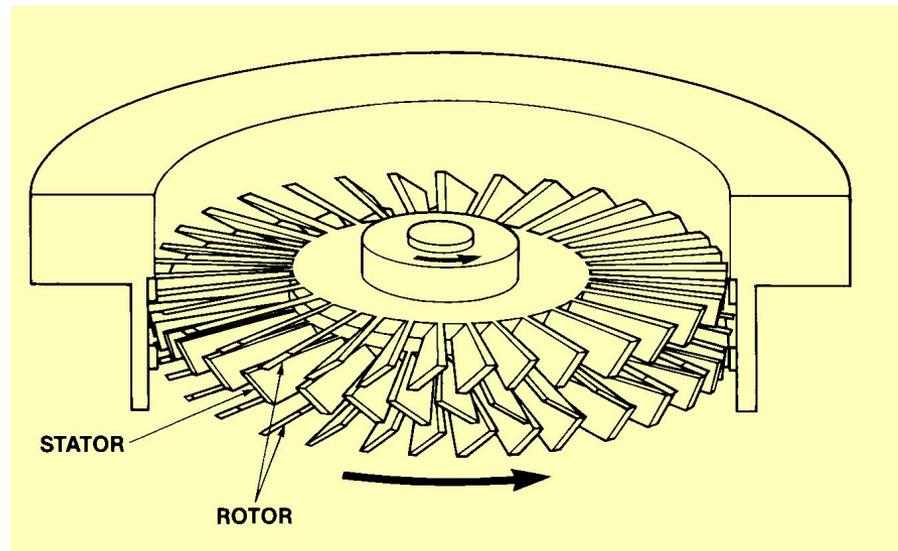
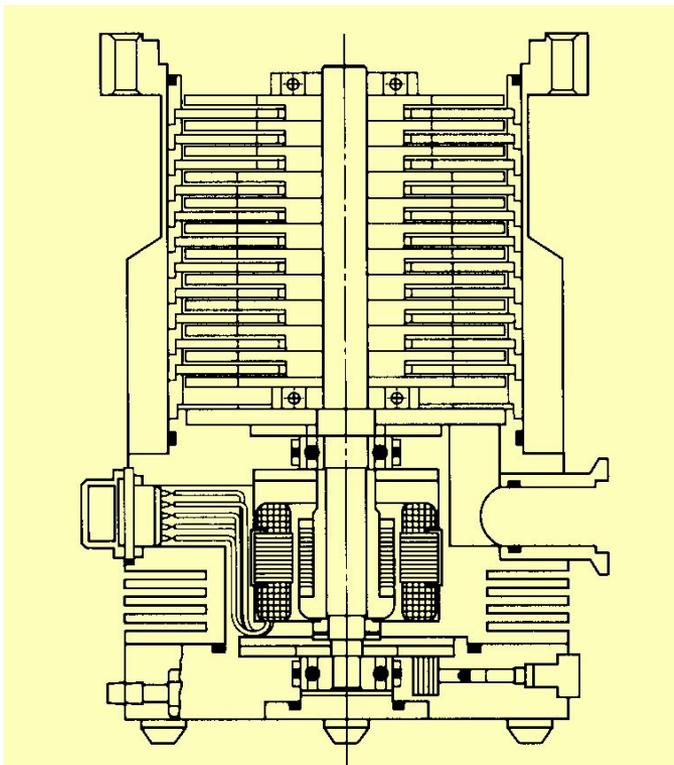
Включение нагрева и охлаждающей воды

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



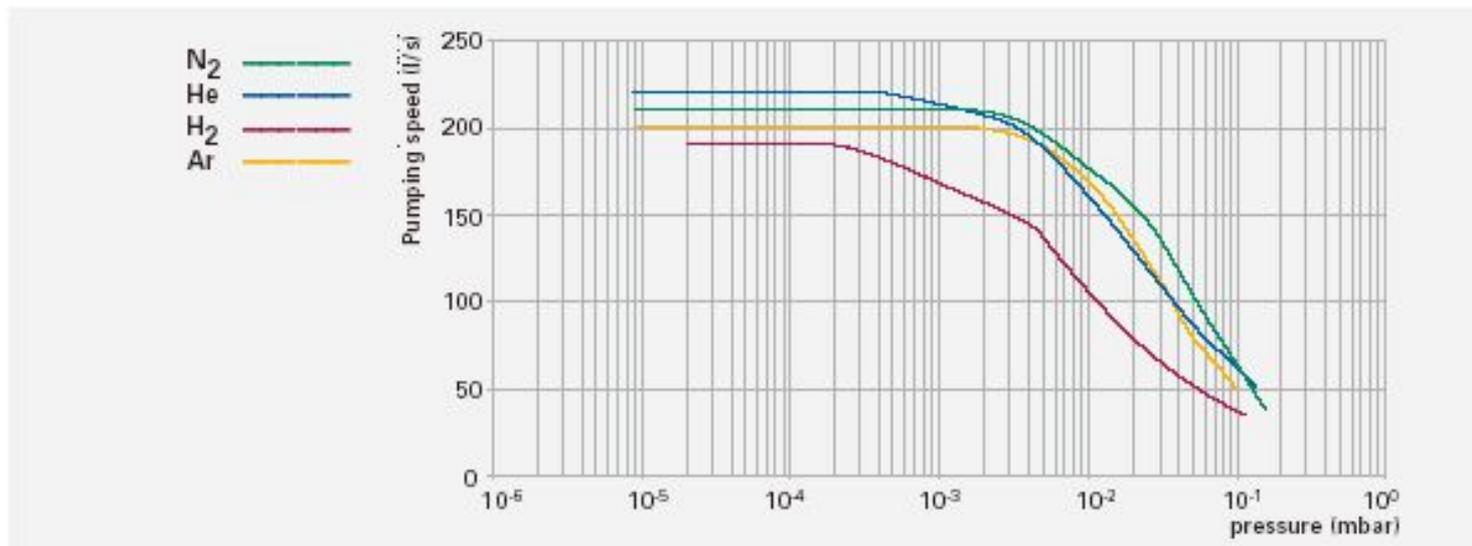
## Параметры:

Входное отверстие DN 25 – DN 600

Скорость откачки 10 – 4000 л/с

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

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



# Пределный вакуум при большой газовой нагрузке

## АЗОТ

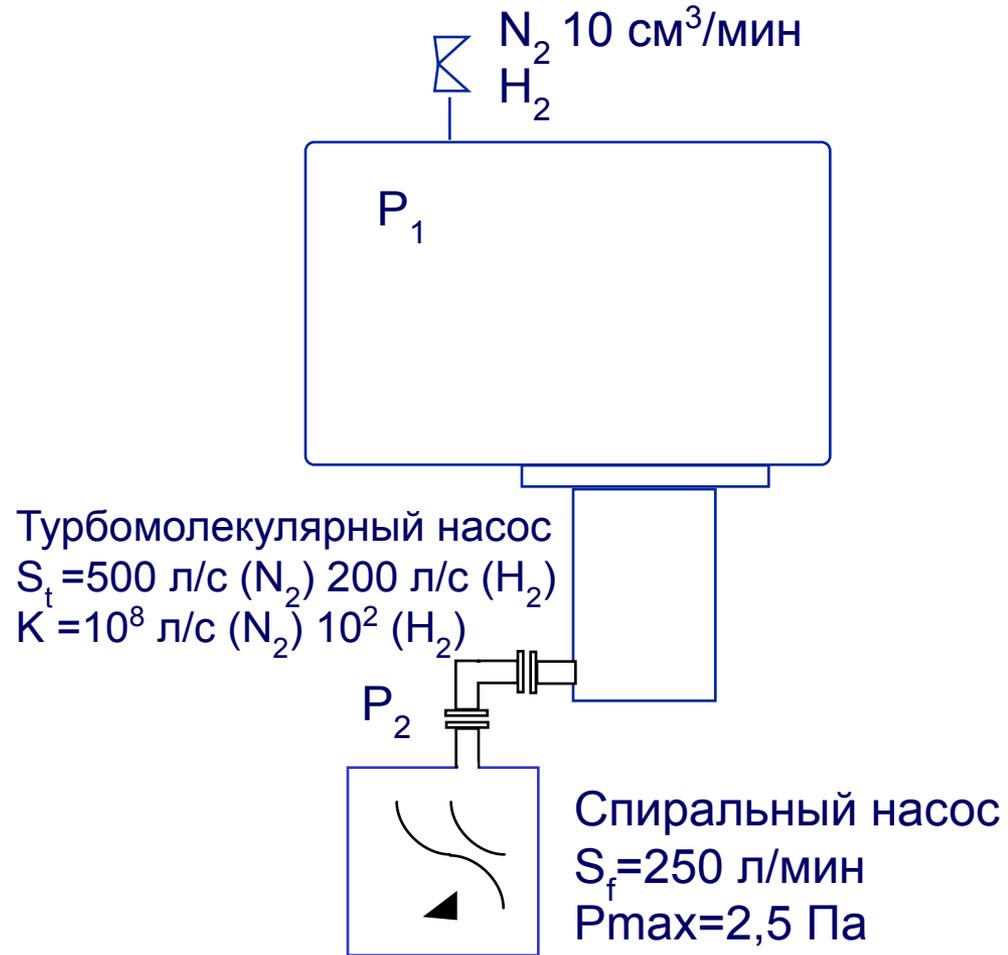
$$P_2 = 10^5 \text{ Па} \cdot \frac{0,1 \text{ см}^3 / \text{мин}}{S_f} = 4 \text{ Па}$$

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

## ВОДОРОД

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

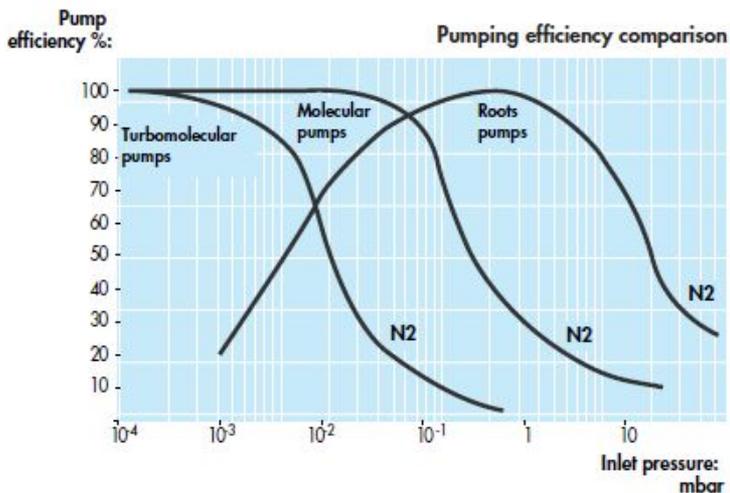
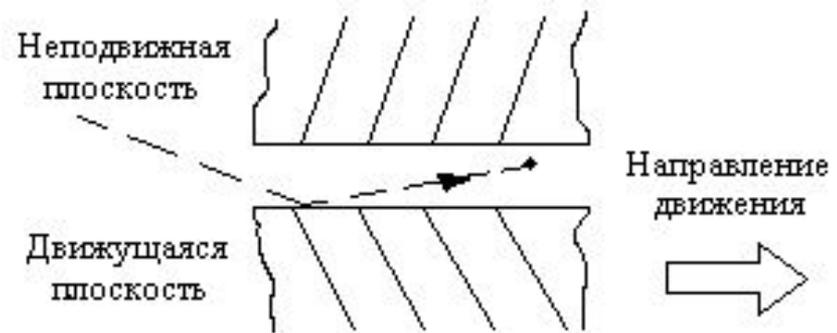
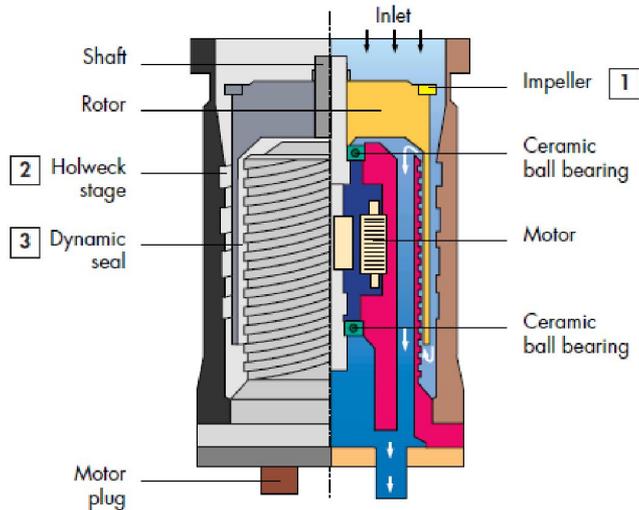
$$P_2 = 4 \text{ Па} / K = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$$



# 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<sub>2</sub>)  $10^9$  (N<sub>2</sub>)

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 м<sup>2</sup>/г

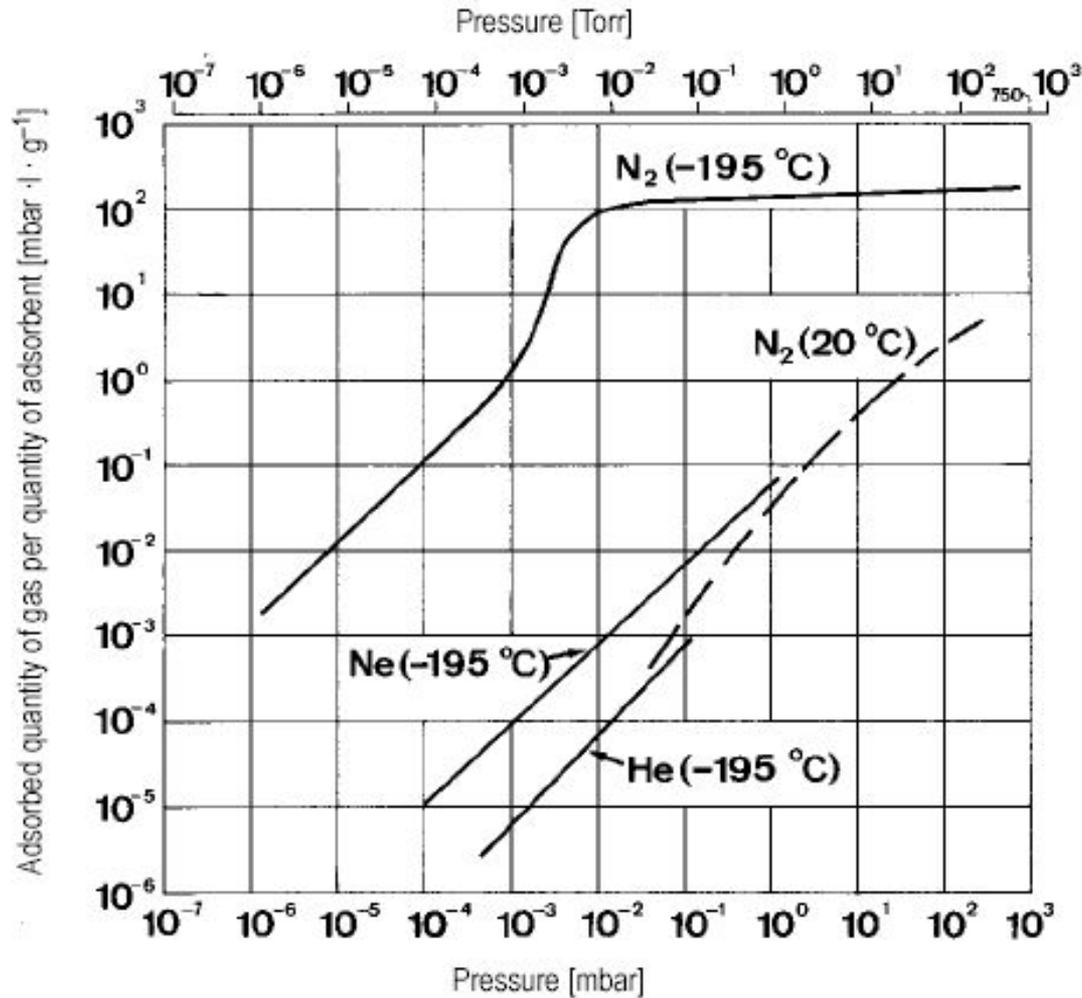
Откачка – при 77 К, регенерация 400 К.

Плохо откачивают инертные газы

Предельный вакуум 10<sup>-2</sup> Па

## Емкость адсорбционного насоса

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

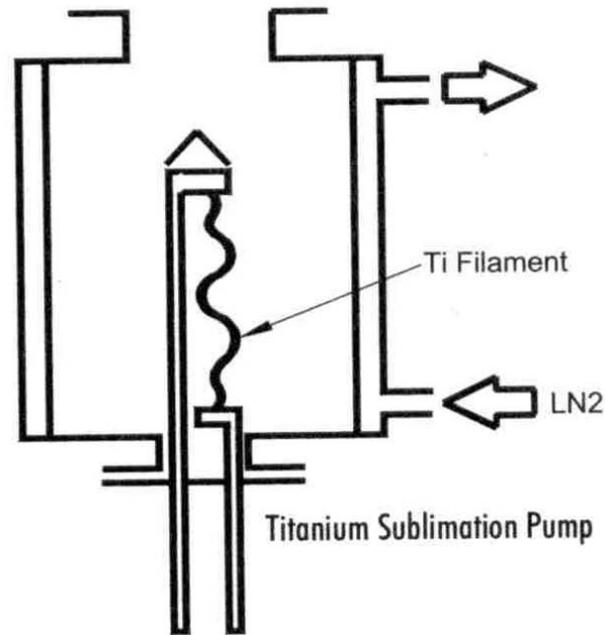


## Геттерные насосы

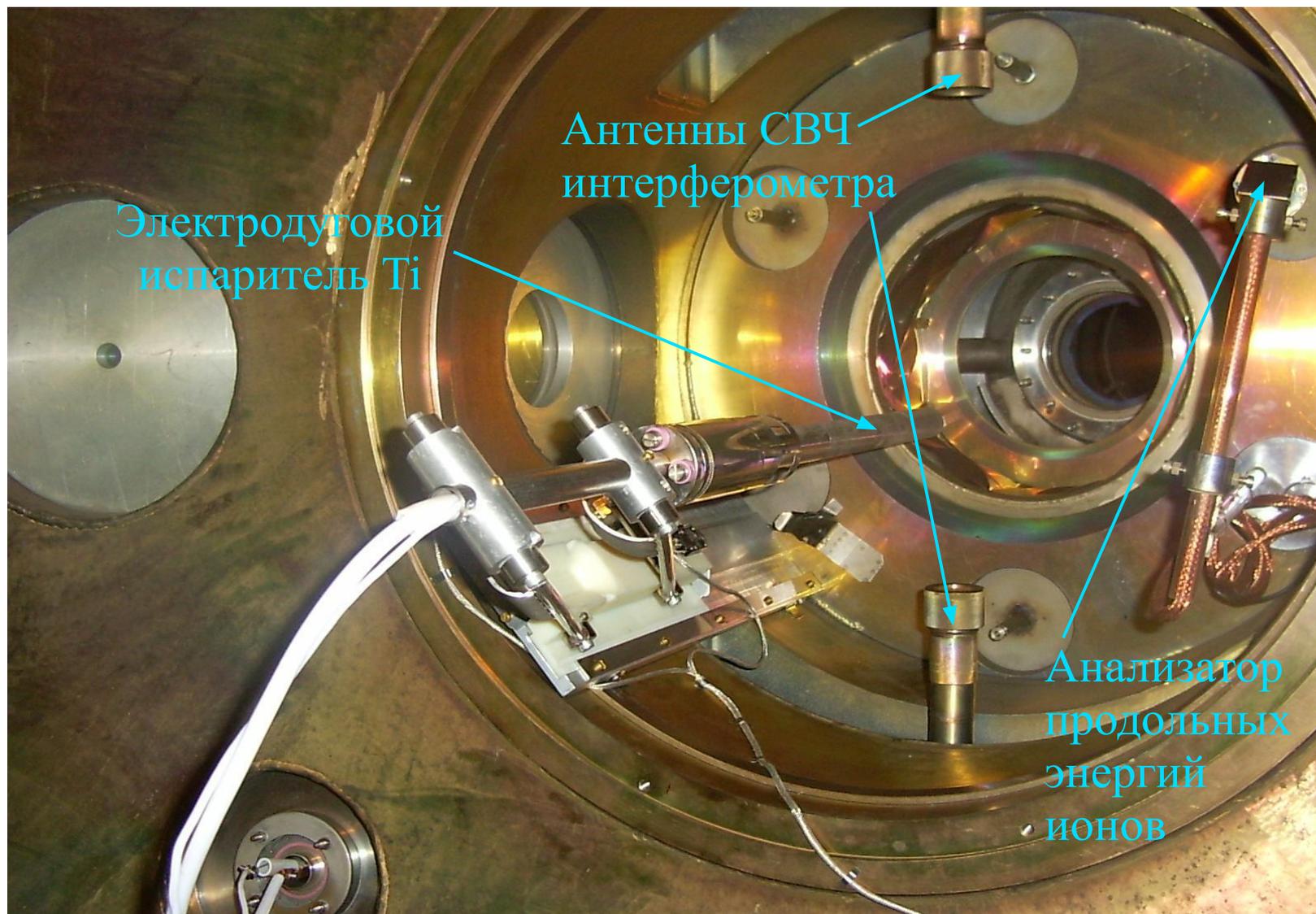
Хемосорбция или растворение откачиваемых газов

Рабочее вещество (абсорбент) – титан

Высокая скорость откачки, большая емкость, компактность



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

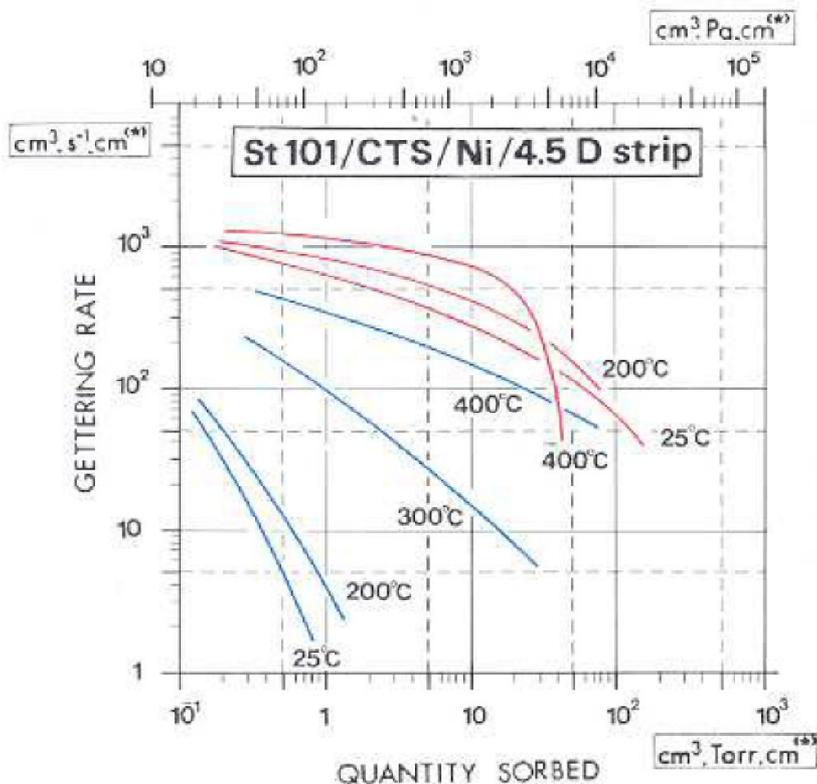


# Нераспыляемые геттеры

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



Скорость откачки ( $\text{CO}$ )  $\sim 0,01$  л/(с·см<sup>2</sup>)  
Емкость  $5 \cdot 10^{-2}$  Па·л/см<sup>2</sup>  
 $10^{-6}$  Па -  $5 \cdot 10^6$  с

Скорость откачки ( $\text{H}_2$ )  $\sim 0,1$  л/(с·см<sup>2</sup>)  
Емкость  $10^2$  Па·л/см<sup>2</sup>  
0,1 Па -  $10^4$  с

# Магнито-разрядные насосы

Используется Пеннинговский разряд

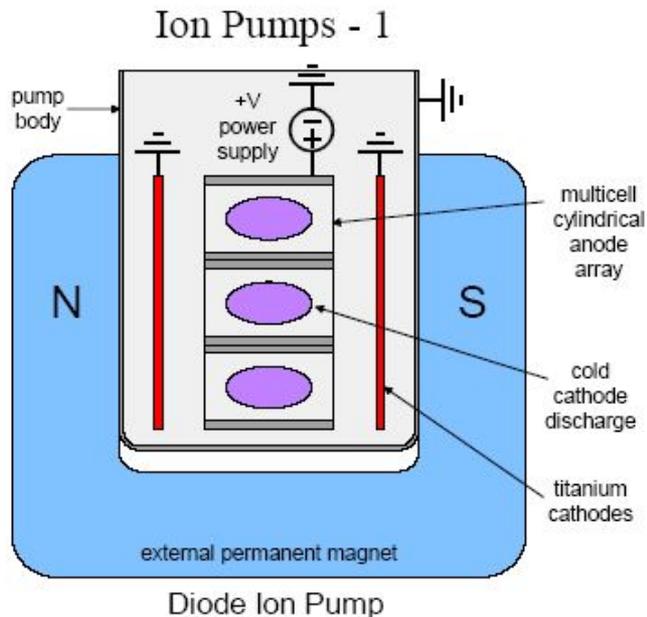
start с  $10^{-1}$  Па → до  $10^{-8}$  Па

Система с осциллирующими электронами

Электроны ионизируют газ, ускоренные ионы газа распыляют титан

→ работает как геттер

Не требуют форвакуумной откачки



# Крионасосы

Эффекты:

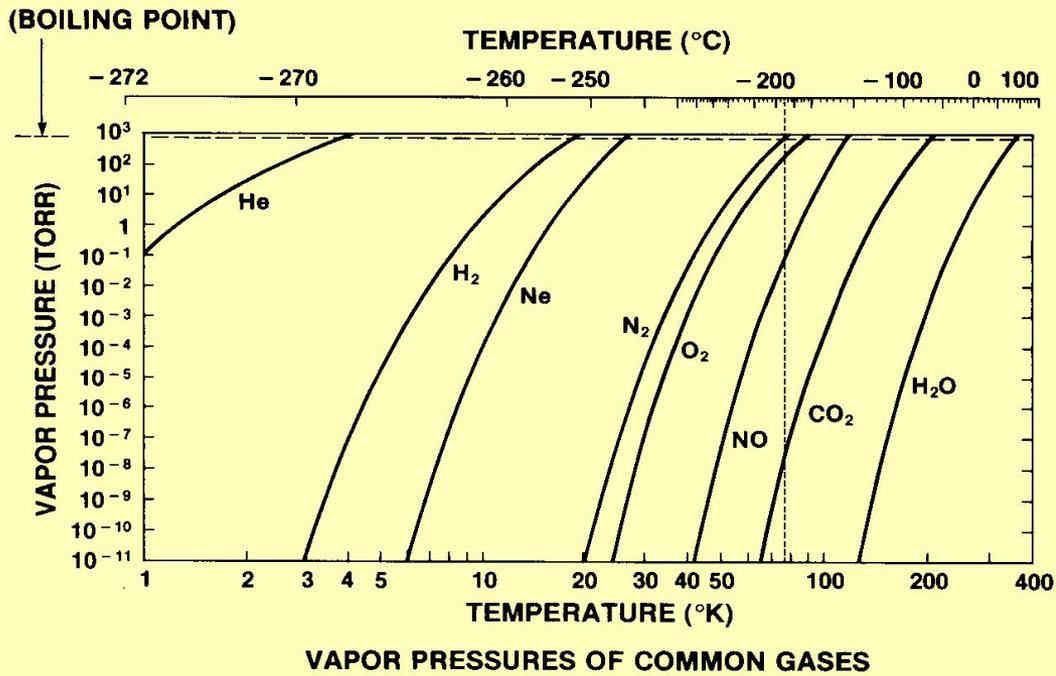
Криоконденсация – конденсация газов при низких температурах

Криосорбция – поглощение газа веществами с развитой поверхностью

Криозахват – захват неконденсирующихся газов в слое конденсата

# Криоконденсация

Наибольшее распространение – азотная ловушка



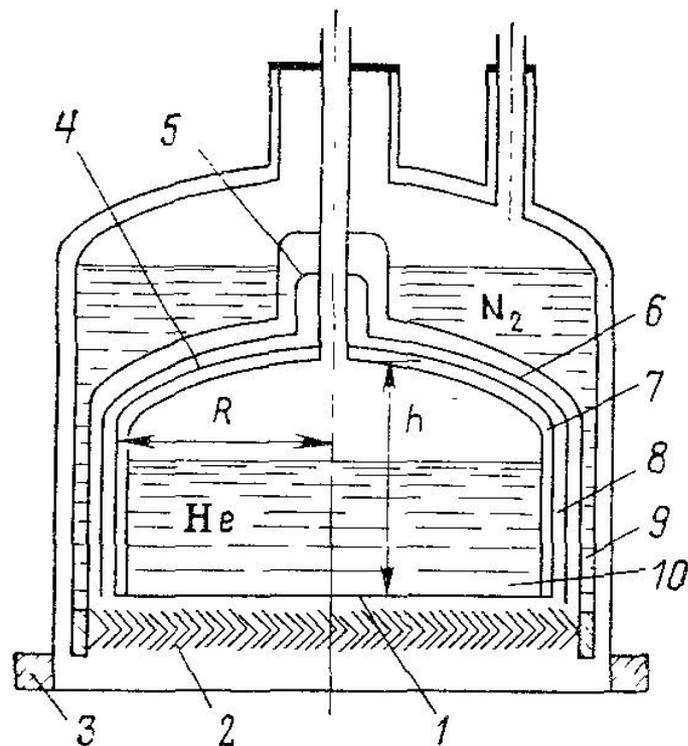
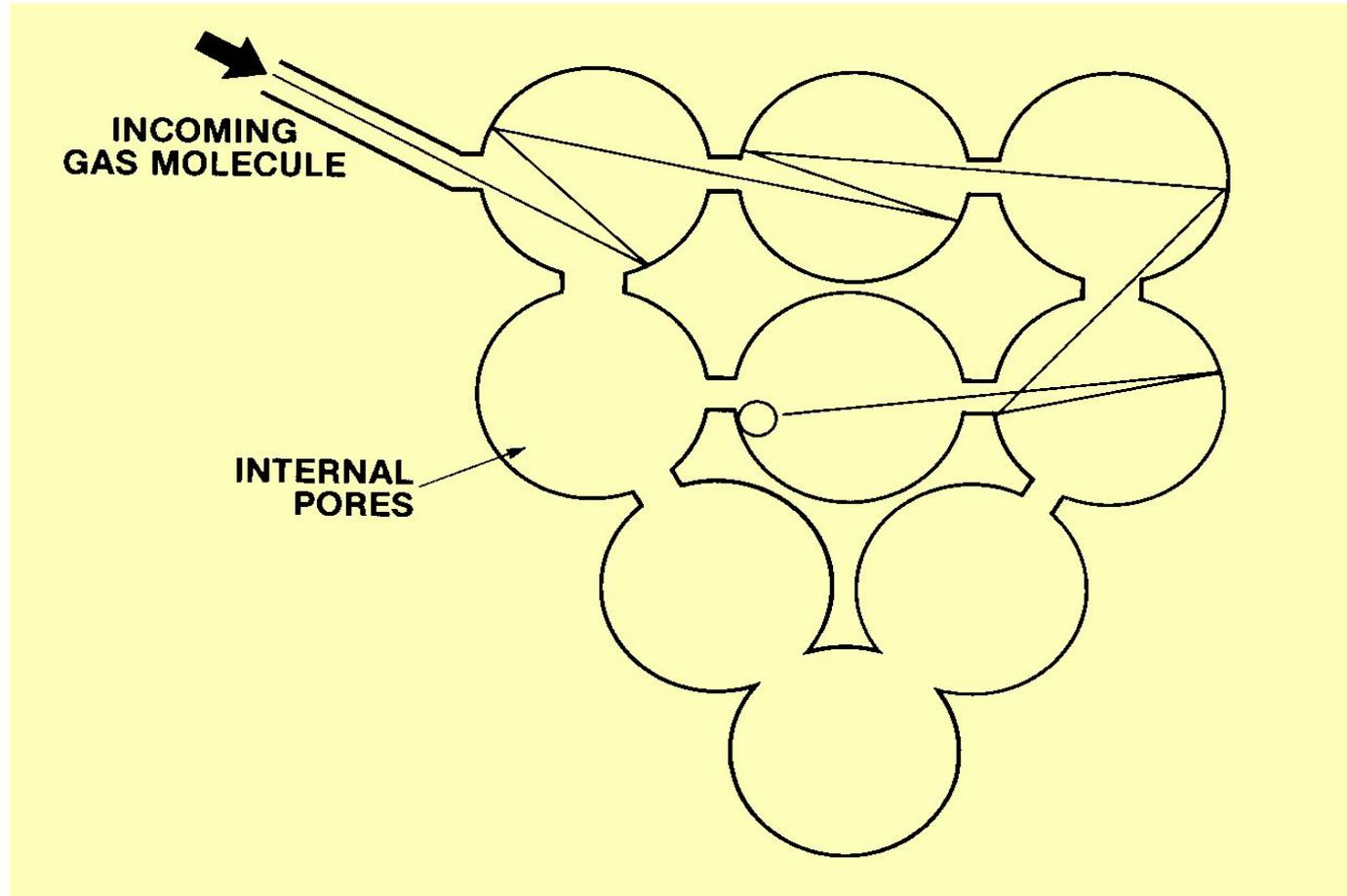


Рис. 9.3. Улучшенный вариант крионасоса-ванны для экстремально низких давлений и длительного времени работы [9.7]:

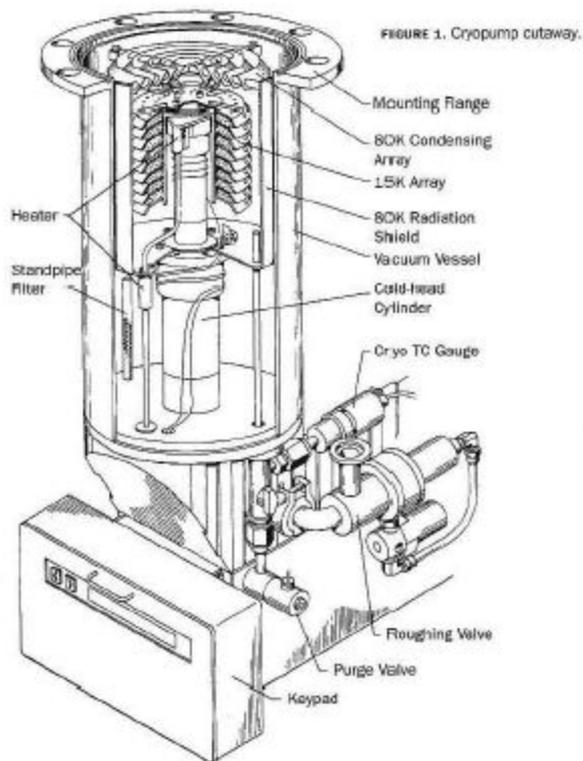
1 — поверхность конденсации, покрытая Ag; 2 — шевронный экран; 3 — подсоединительный фланец; 4 — рубашка с двойными стенками, покрытыми Ag; 5 — слой Si толщиной 0,2 мм; 6 — экран, покрытый с наружной стороны Ag и зачерненный с внутренней стороны; 7 — камера, заполненная неона; 8 — зазор, равный  $d$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

# Криосорбция



Активный элемент – активированный уголь

## Крионасосы Cryo-Torr

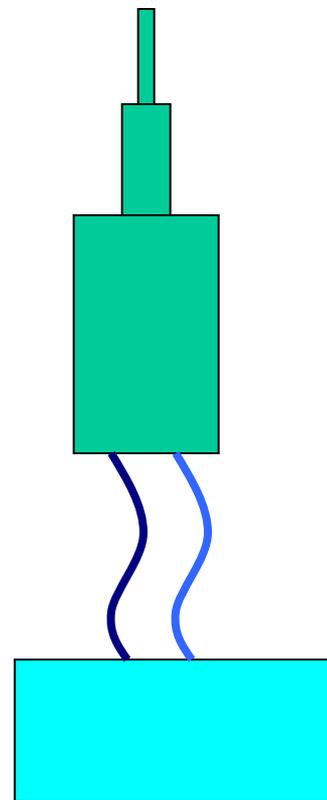
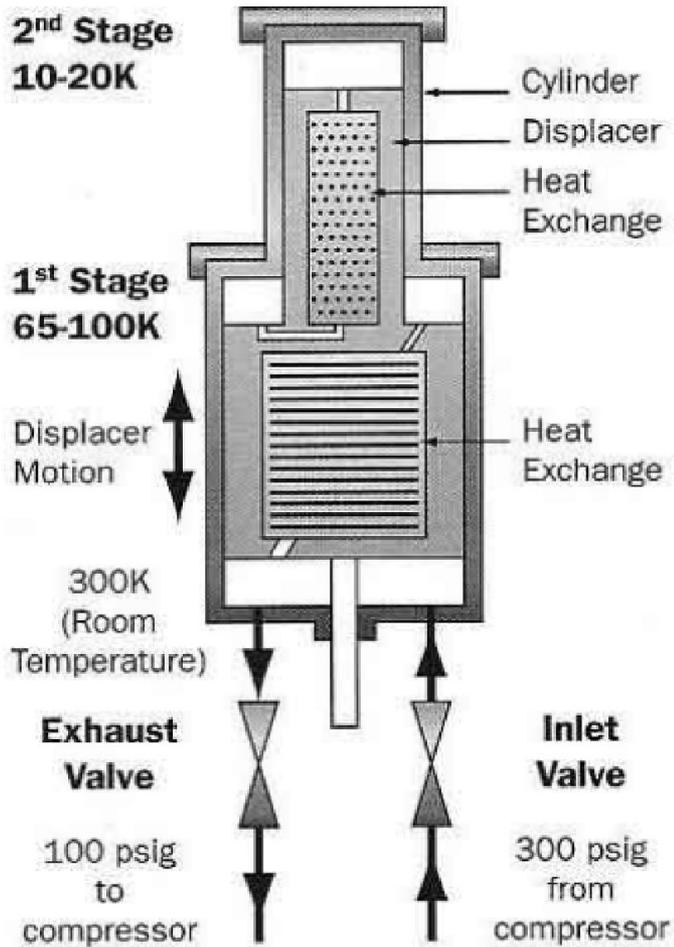


$T=10-30\text{ K}$ , теплоноситель - гелий

Скорость откачки  $0,3 - 6\text{ м}^3/\text{с}$

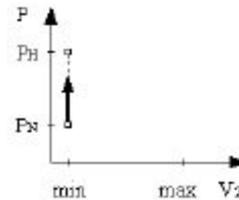
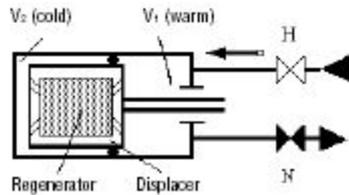
Параметр включения  $\sim 10^4\text{ Па}\cdot\text{л}$

Емкость (водород) 3-40 стандартных литров



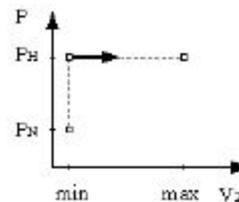
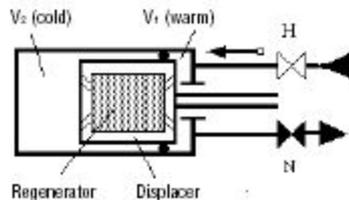
Компрессор

# Процесс Гриффина - Макнагона



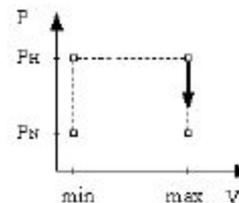
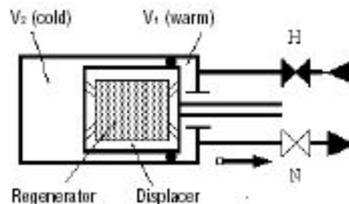
## Phase 1:

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  $V_1$ .



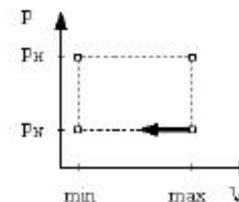
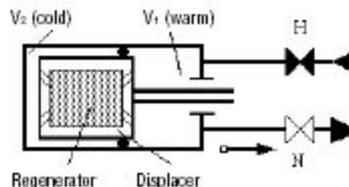
## Phase 2:

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 токамака ИТЭР

## Основное средство откачки-

Криосорбционные насосы  
(активированный уголь, 4,7 К)

Скорость откачки 80 м<sup>3</sup>/с

Цикл работа-регенерация 600 с

## Форвакуумные насосы-

Насосы Рутса 250 м<sup>3</sup>/час

Отсутствие органических  
уплотнений



# Вакуумная система LHC

## Откачка криостата ( $10^{-4}$ Па)

Первичный вакуум -турбомолекулярные насосы

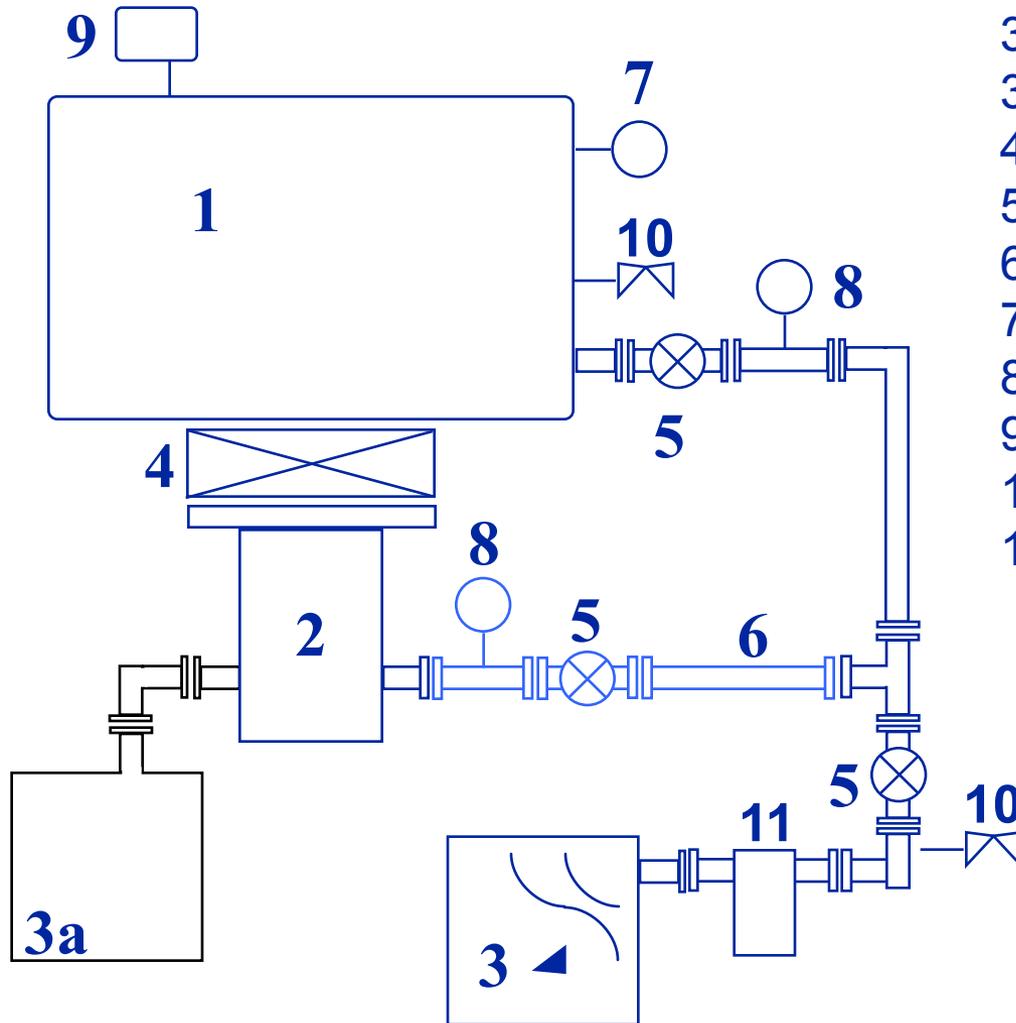
Поддержание вакуума – естественная криооткачка (1,9 К)

## Откачка вакуумной камеры ( $10^{-6}$ Па)

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

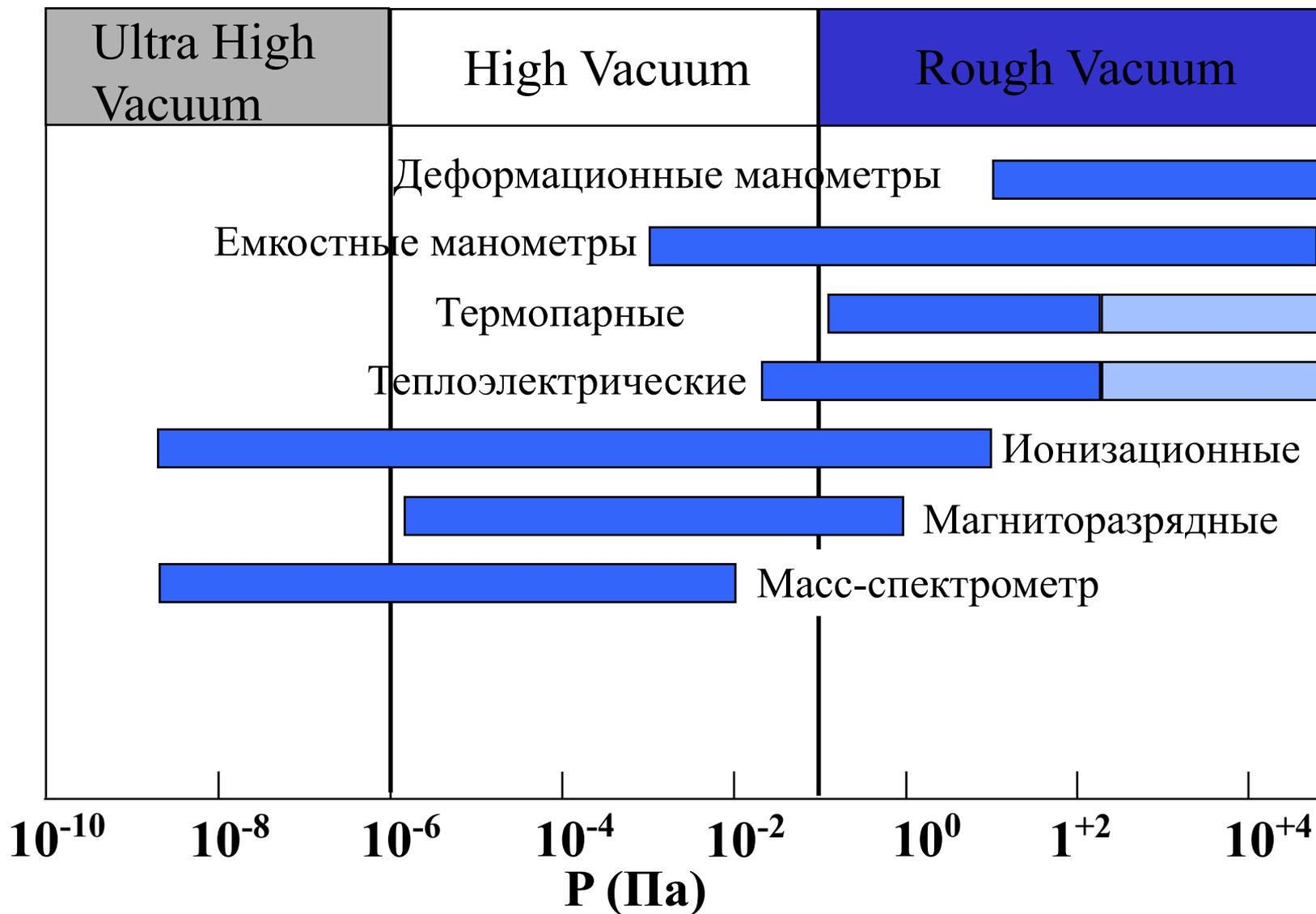
Охлаждение камеры газообразным гелием (20 К)

# Вакуумная система

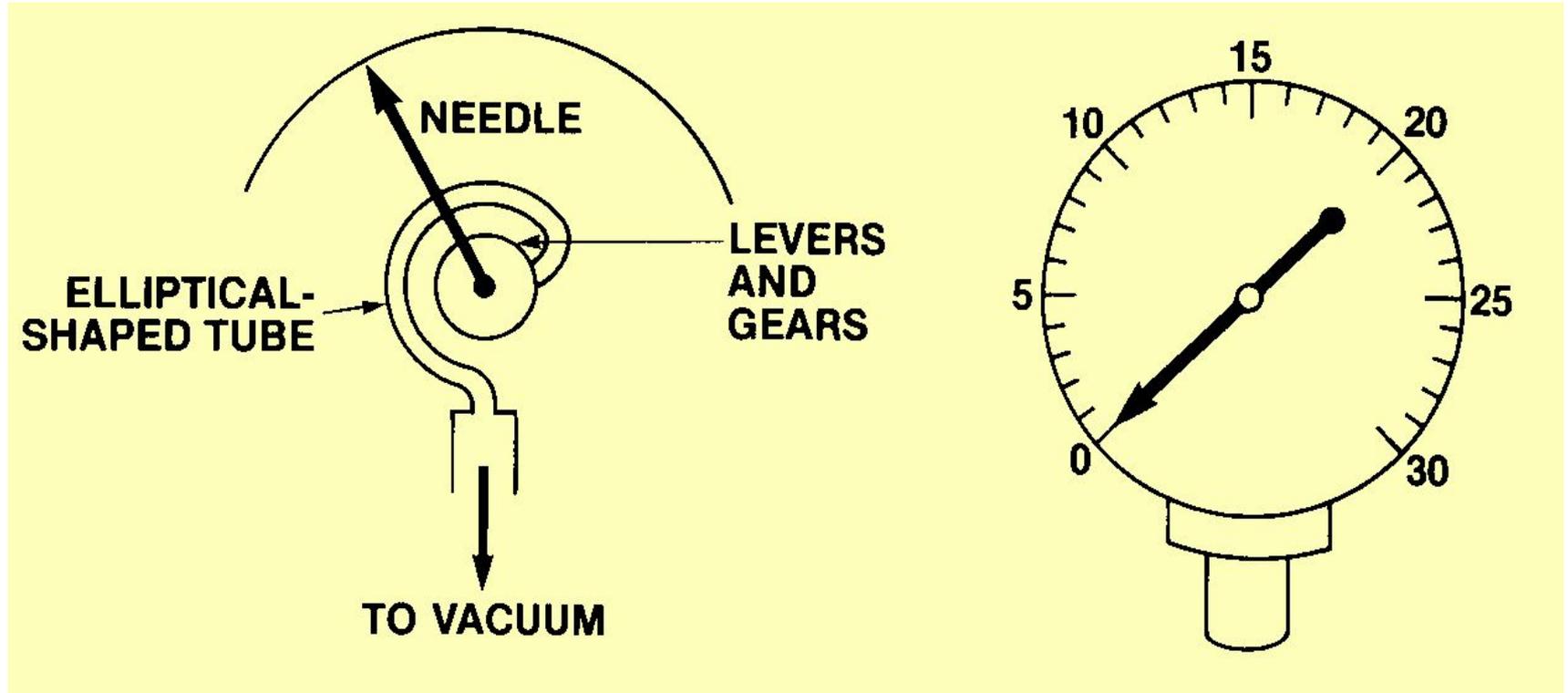


1. Вакуумная камера
2. Высоковакуумный насос
3. Форвакуумный насос
- 3a. Форвакуумный насос
4. Шибер
5. Вакуумные клапаны
6. Байпасс
7. Высоковакуумные лампы
8. Форвакуумные лампы
9. Масс-спектрометр
10. Клапан напуска атмосферы
11. Цеолитовая ловушка

# Вакуумные измерения



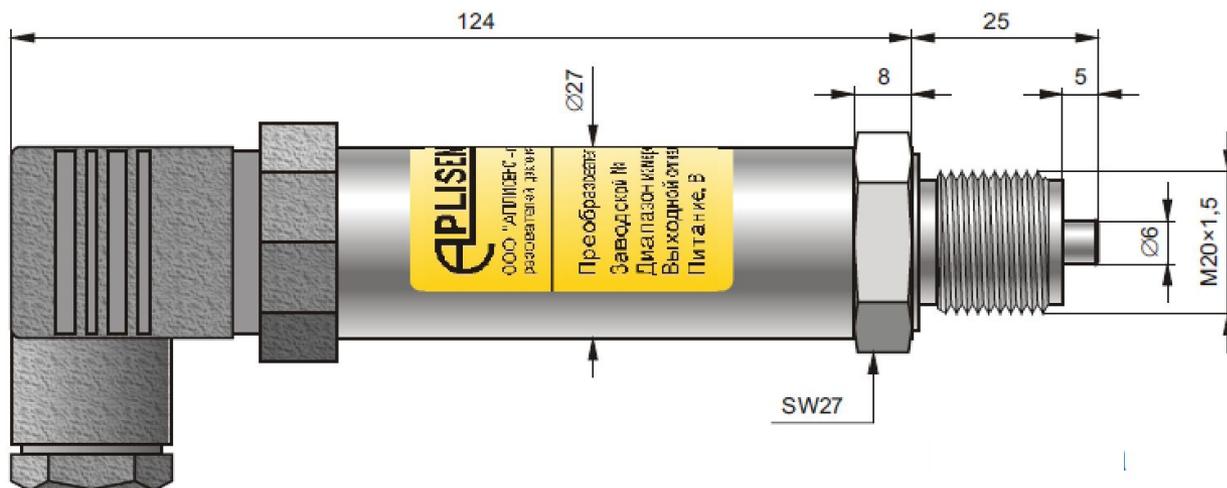
## Деформационные мановакуумметры



Абсолютные или относительные  
 $1 - 10^5$  Па

Не зависят от сорта газа

## Пьезорезистивные мановакууметры



Абсолютные или относительные

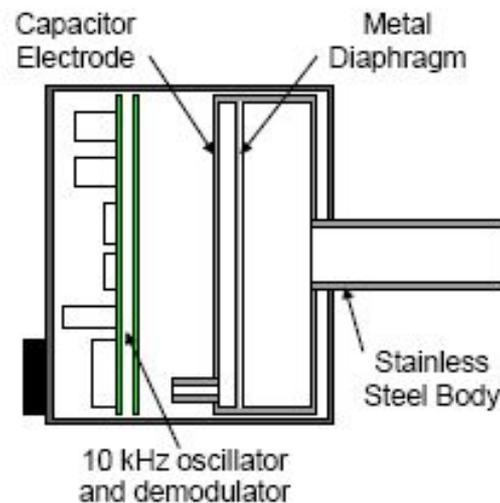
$2,5 \cdot 10^3 - 10^5$  Па

Погрешность 0,4 – 1%

Не зависят от сорта газа

## Емкостной манометр

### Capacitance Manometers - 1



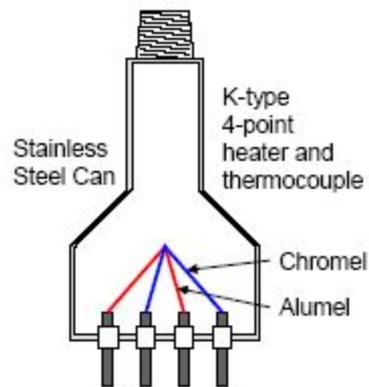
Баратрон (MKS instruments)

$10^{-5} - 10^5$  Па

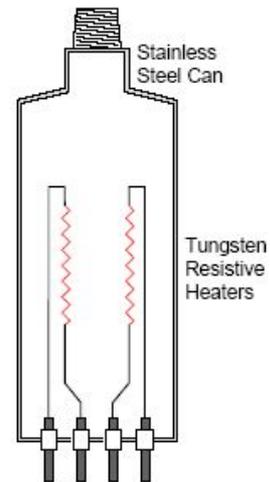
Точность 0,12 %

# Тепловые манометры

Thermocouple Gauges - 1



Pirani Gauges - 1

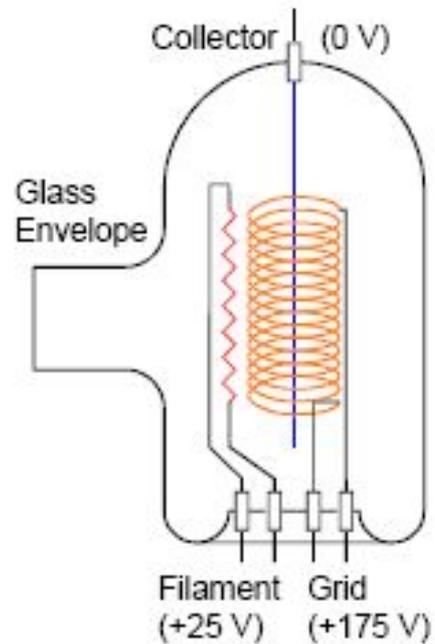


Разные газы имеют разную градуировку (теплопроводность зависит от сорта газа)

0.1 –  $10^5$  Па

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

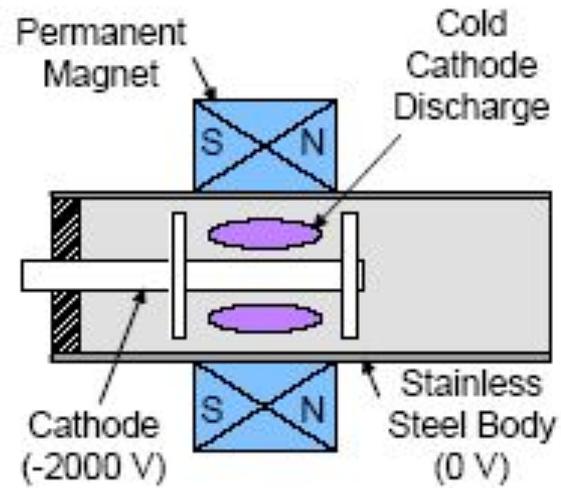
# Ионизационные манометры



## 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 вакууметры

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

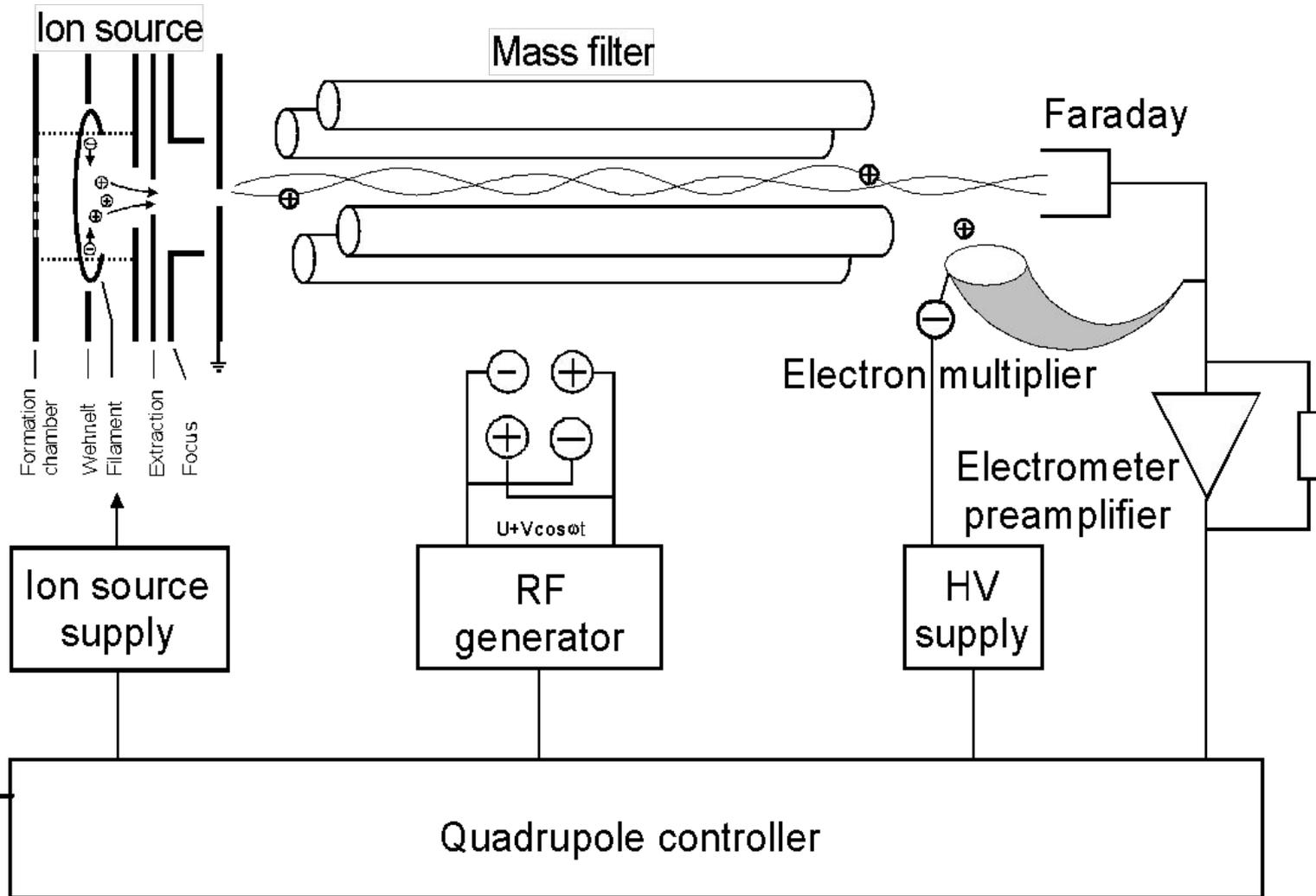
Выходное напряжение пропорционально  
логарифму давления



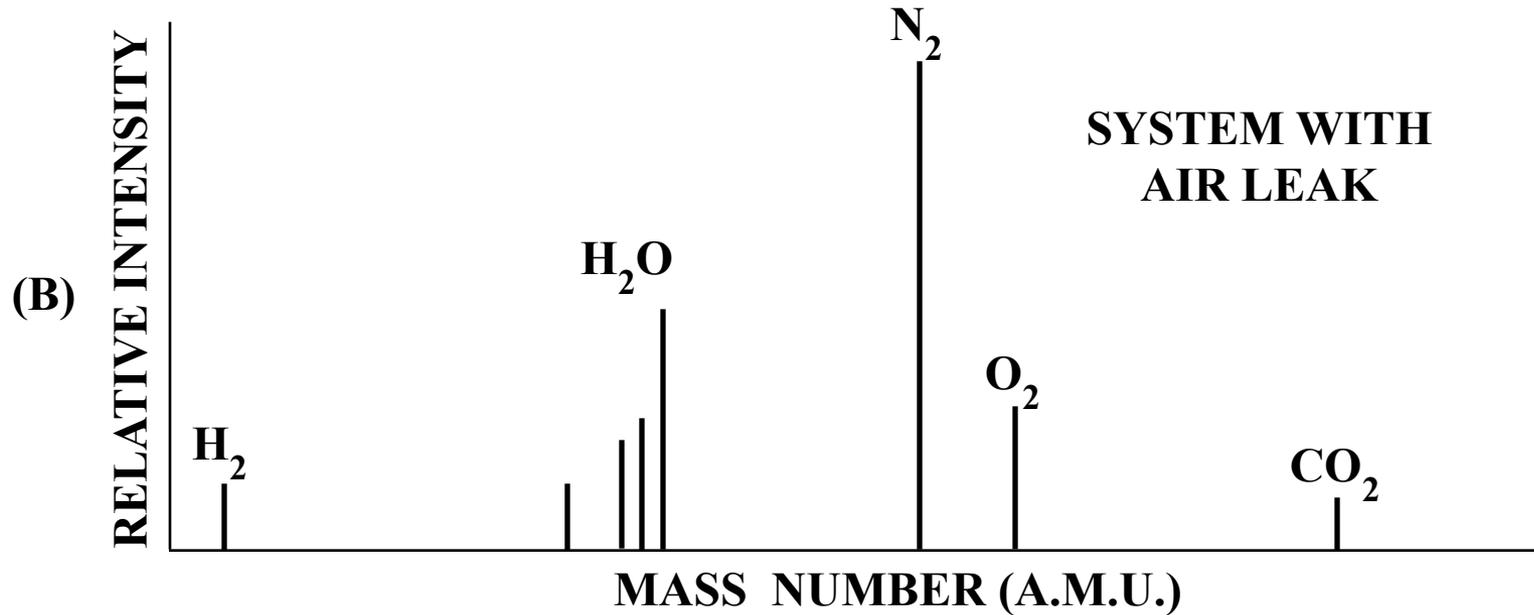
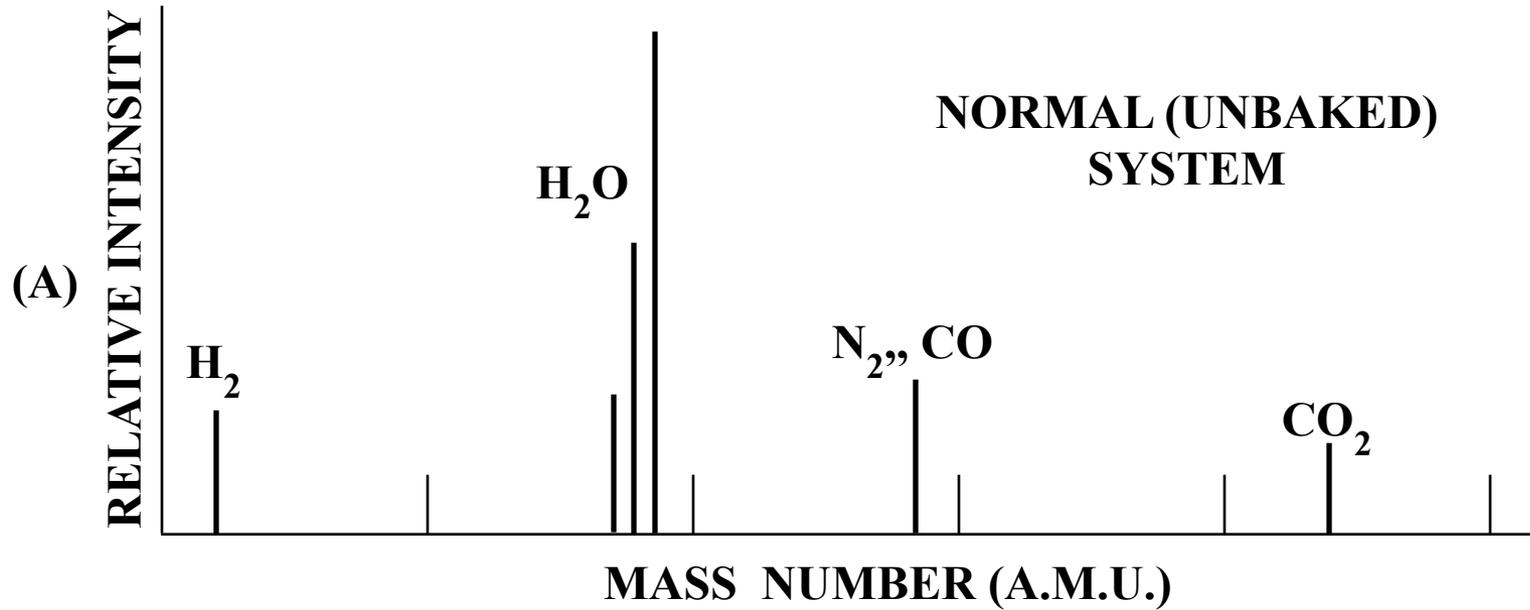
Pfeiffer PKR 251

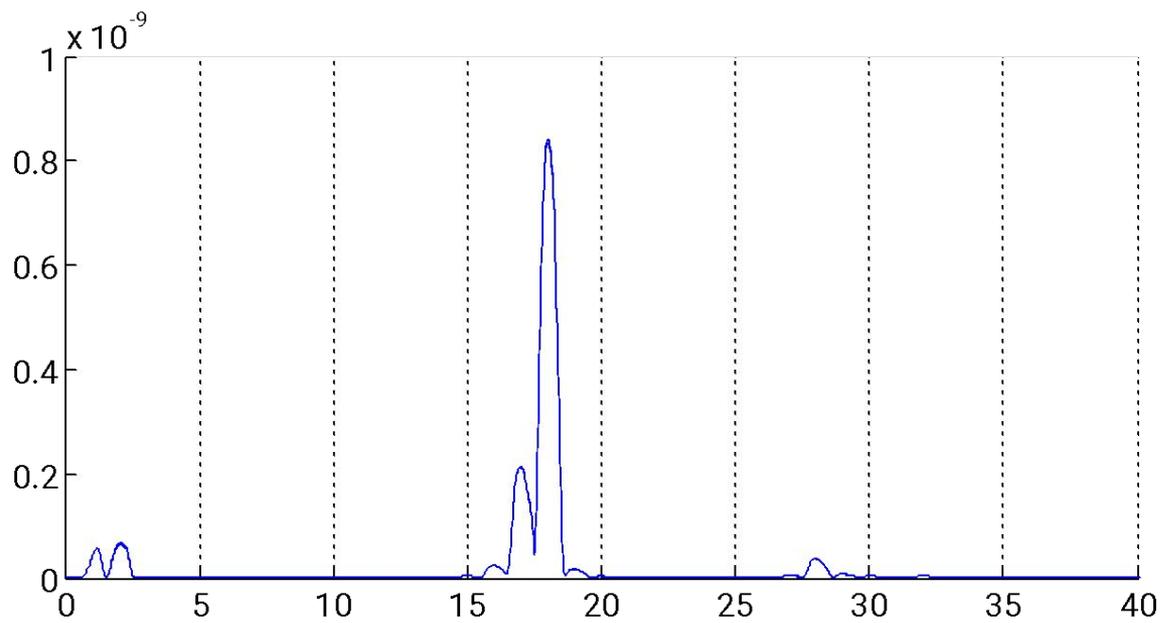
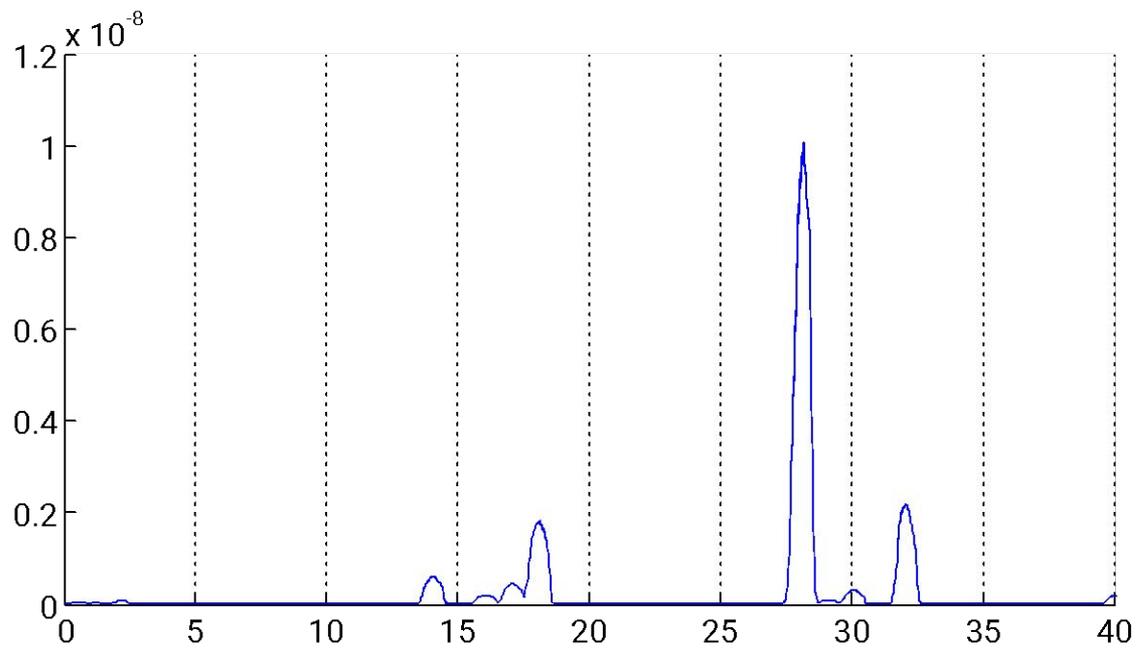
$$P_{[Па]} = 10^{(1.67 \cdot U_{[В]} - 9.33)}$$

# Масс-спектрометр



# Масс-спектрометр





# 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

