



**20
25**
ЛИНЕЙНЫЕ
24 - 29 августа 2025



ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЕЙ: ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

24–29 Август 2025 г., Россия

Галимов А.Р.,

ЛФВЭ, ОИЯИ, Дубна

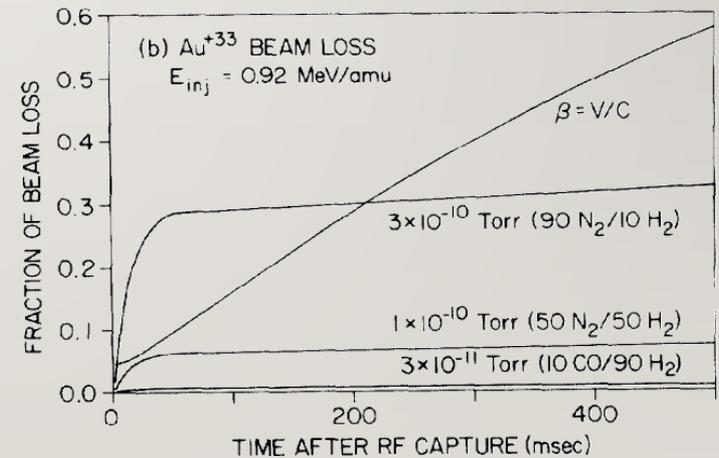
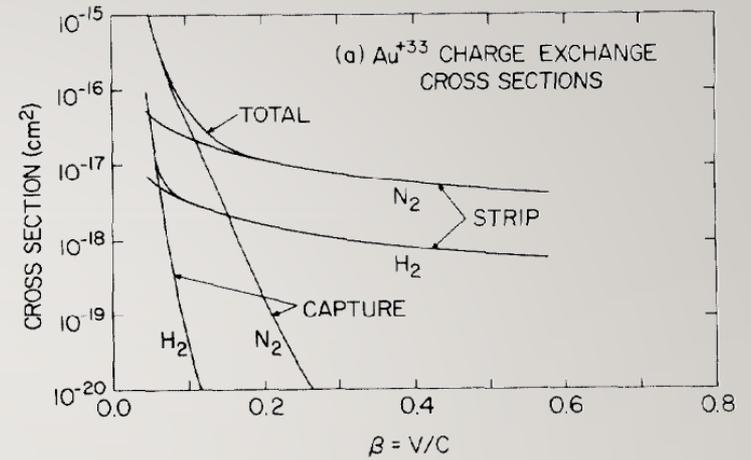
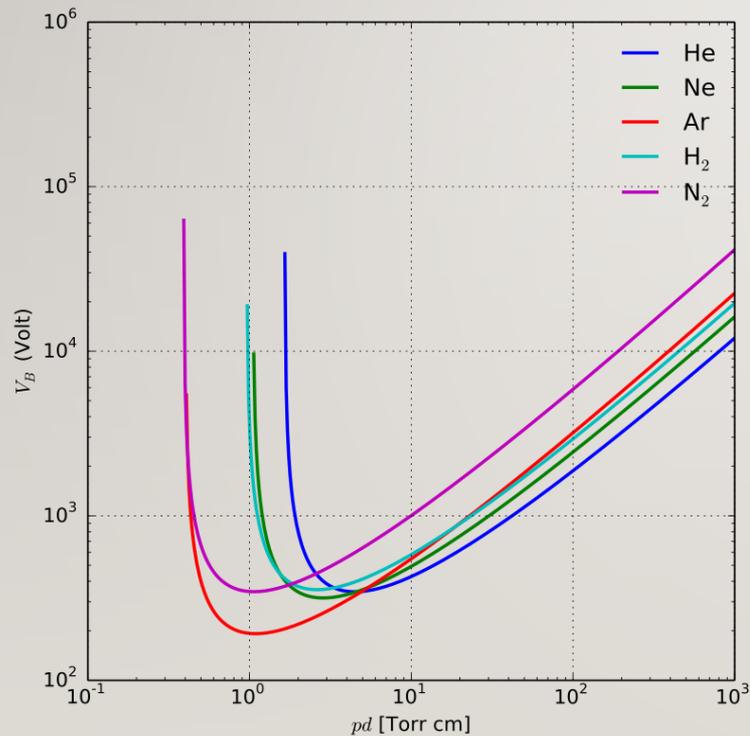
- Что такое вакуум и для чего он нужен
- Определиться с основными понятиями
- Рассмотреть источники газовой нагрузки
- Узнать о способах достижения требуемого вакуума
- Изучить способы контроля вакуума
- Рассмотреть примеры вакуумных систем
- Ознакомиться с дополнительными материалами

ЧТО ТАКОЕ ВАКУУМ И ДЛЯ ЧЕГО ОН НУЖЕН

- Вакуум (от лат. vacuum – пустота);
- Вакуум технический – состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного;
- Давление – количественная характеристика состояния среды. Под давлением газа понимают средний импульс, передаваемый единице площади стенки сосуда молекулами газа в единицу времени.
- Стандарты: **ГОСТ 5197-85, ISO 3529/I, DIN 28400/I**

| | Паскаль (Pa, Па) | Бар (bar, бар) | Техническая атмосфера (at, ат) | Физическая атмосфера (atm, атм) | Миллиметр ртутного столба (мм рт.ст., mmHg, torr, торр) | Метр водяного столба (м вод. ст., m H ₂ O) | Фунт-сила на кв. дюйм (psi) |
|--------------|--------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|-----------------------------------|
| 1 Па | 1 Н/м² | 10 ⁻⁵ | 10,197×10 ⁻⁶ | 9,8692×10 ⁻⁶ | 7,5006×10 ⁻³ | 1,0197×10 ⁻⁴ | 145,04×10 ⁻⁶ |
| 1 бар | 10 ⁵ | 1 ×10⁶ дин/см² | 1,0197 | 0,98692 | 750,06 | 10,197 | 14,504 |
| 1 ат | 98066,5 | 0,980665 | 1 кгс/см² | 0,96784 | 735,56 | 10 | 14,223 |
| 1 атм | 101325 | 1,01325 | 1,033 | 1 атм | 760 | 10,33 | 14,696 |
| 1 мм рт.ст. | 133,322 | 1,3332×10 ⁻³ | 1,3595×10 ⁻³ | 1,3158×10 ⁻³ | 1 мм рт.ст. | 13,595×10 ⁻³ | 19,337×10 ⁻³ |
| 1 м вод. ст. | 9806,65 | 9,80665×10 ⁻² | 0,1 | 0,096784 | 73,556 | 1 м вод. ст. | 1,4223 |
| 1 psi | 6894,76 | 68,948×10 ⁻³ | 70,307×10 ⁻³ | 68,046×10 ⁻³ | 51,715 | 0,70307 | 1 lbf/in² |

- Время жизни пучка;
- Электрическая изоляция;
- Тепловая изоляци;



| Область вакуума | Диапазон (Па) | Область применения |
|----------------------|--|---|
| Низкий | $3.3 \times 10^3 < P < 1.0 \times 10^5$ | Вакуумная чистка, механическая обработка ... |
| Средний | $1.0 \times 10^{-1} < P < 3.3 \times 10^3$ | Вакуумная сушка, вакуумная заморозка пищевых продуктов ... |
| Высокий | $1.0 \times 10^{-6} < P < 1.0 \times 10^{-1}$ | Лампочки, ламповая электроника ... |
| Очень высокий | $1.0 \times 10^{-9} < P < 1.0 \times 10^{-6}$ | Электронные микроскопы, трубки рентгеновского излучения, электронная сварка |
| Сверхвысокий | $1.0 \times 10^{-12} < P < 1.0 \times 10^{-9}$ | Ускорители частиц, симуляция космического пространства, полупроводниковая промышленность, исследование материалов |
| Экстремально высокий | $P \leq 1.0 \times 10^{-12}$ | |

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- Суммарный объём частиц газа пренебрежимо мал, а их количество в единице объема достаточно большое
(при 10^5 Па и 300 К – $2,4 \times 10^{19}$ молекул/см³)
(при 10^{-9} Па и 300 К – $2,4 \times 10^5$ молекул/см³)
- Потенциальной энергией взаимодействия частиц, составляющих газ, можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией;
- Между частицами нет дальнедействующих сил притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги;
- Время взаимодействия между частицами пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями.

Сильно разреженный газ \approx идеальный газ



с достаточной точностью возможно использование законов для идеального газа

$$pV = MR_iT$$

p – давление [Па]; V – объем [m^3]; M – молярная масса [кг/моль];

R_i – газовая постоянная i -го газа [Дж/(кг·К)]; T – температура [К]

Выведено Бенуа́ Поль Эми́лем Клапейро́ном в 1834г.
Объединяет законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро

$$R = MR_i$$

Универсальная газовая постоянная:

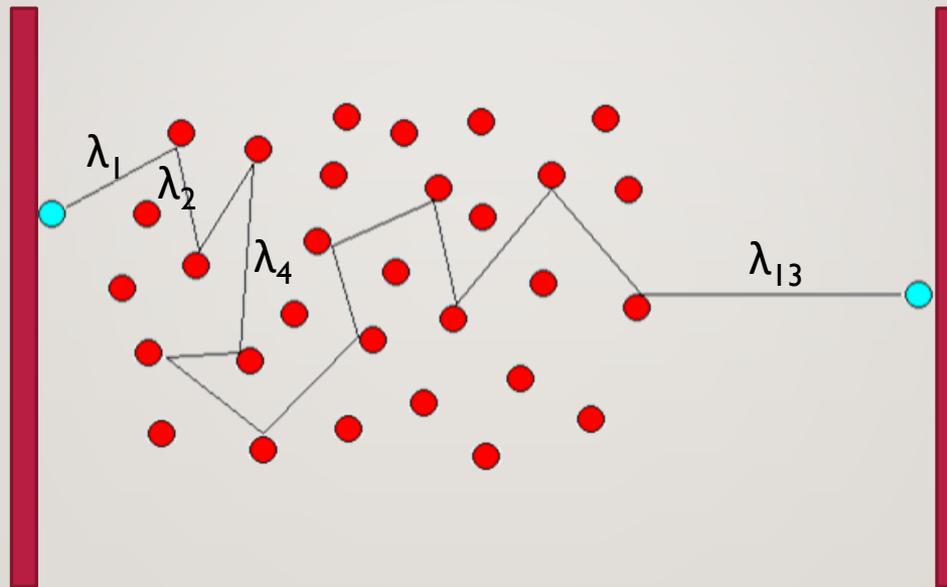
$$R = 8,31446261815324 \text{ [Дж/(моль · К)]}$$

$$pV = RT$$

Выведен Дмитрием Ивановичем Менделеевым в 1874г

Уравнение состояния идеального газа или общее уравнение состояния

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$



$$\lambda(\text{м}) = \frac{0.07}{p(\text{Па})}$$

d – диаметр молекул, м

$k = 1,3806 \times 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К

P – давление, Па

T – температура, К

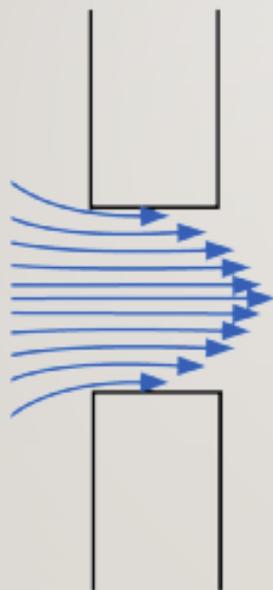
Для воздуха при 20°C:

| P (Па) | 1.0E+05 | 1.0E+02 | 1.0E-01 | 1.0E-04 | 1.0E-07 |
|----------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| λ (см) | 0.000007 | 0.007 | 7 | 7000 | 7000000 |

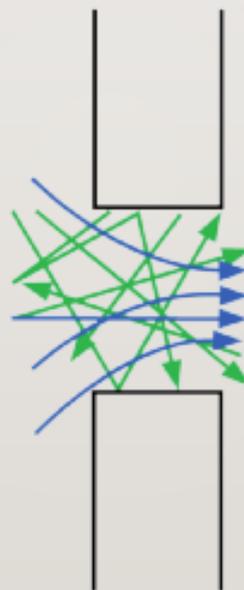
- Число Кнудсена определяет режим течения газа

$$Kn = \frac{\lambda}{d}$$

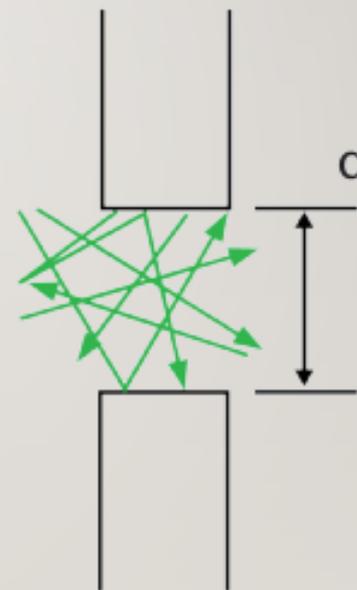
λ - длина свободного пробега
 d - характерный размер



Вязкостный режим
 $Kn < 0,01$
Низкий вакуум



Переходный режим
 $0,01 < Kn < 0,5$
Средний вакуум



Молекулярный режим
 $0,5 < Kn$
Высокий/сверхвысокий вакуум

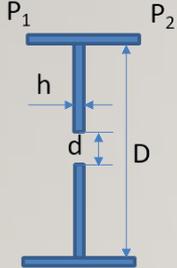
- Проводимость U – количество газа, которое может пропустить через себя элемент трубопровода л/с
- Проводимость зависит от температуры, рода газа, геометрии канала и давления (в вязкостном режиме)
- При последовательном соединении:
- При параллельном соединении:

$$\frac{1}{U_{total}} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} = \sum_i^N \frac{1}{U_i}$$

$$U_{total} = U_1 + U = \sum_i^N U_i$$

Вязкостные режим:

- Для малой диафрагмы ($h \ll d \ll D$)



$$U = F \frac{\tau^{1/k}}{1 - \tau} \sqrt{(1 - \tau^{k-1/k}) \frac{2k}{k-1} \frac{RT}{M}} \quad \tau = P_2/P_1$$

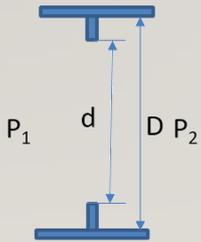
P_1 – давление в сосуде из которого вытекает газ

P_2 – давление в сосуде в который втекает газ

k – показатель адиабаты (C_p/C_v)

$\tau_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k-1}$ – скорость истечения постоянна

- Для большой диафрагмы



$$L = \frac{F_D}{F_D - F} \text{ – поправочный коэффициент}$$

Молекулярные режим:

- Для малой диафрагмы ($h \ll d \ll D$)

$$U = 36,4 \times F \times \sqrt{\frac{T}{M}}$$

[T]= K, M= молекулярный вес

- При комнатной температуре для воздуха - 20°C:

$$U = 116 \times F$$

Где:

$$[U]=\text{л/с}$$

$$[F]=\text{м}^2$$

- Для большой диафрагмы

$$L = \frac{F_D}{F_D - F} \text{ – поправочный коэффициент}$$

Для длинного трубопровода в молекулярном режиме ($l > 20D$) – $U = 38,1 \times \frac{d^3}{L} \sqrt{\frac{T}{M}}$

- Эффективная быстрота действия, это быстрота действия на входе в откачиваемый объем с учетом коммуникаций между насосом и объемом.

$$\frac{1}{S_{\text{Э}}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H}$$

Рассчитаем эффективную быстроту действия между насосом и камерой

S_H по азоту = 300 л/с

CF150 колено $d=154\text{мм}$ и длина $200 \times 200\text{мм}$

Проводимость по воздуху при комнатной температуре:

$$U = 121 \times F \times \alpha$$

$$F = \pi * r^2 = 0,0186 \text{ м}^2$$

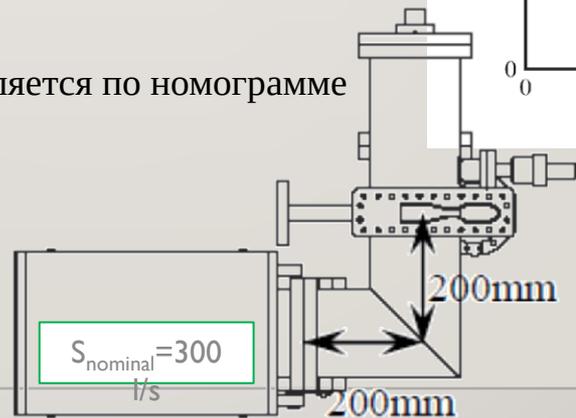
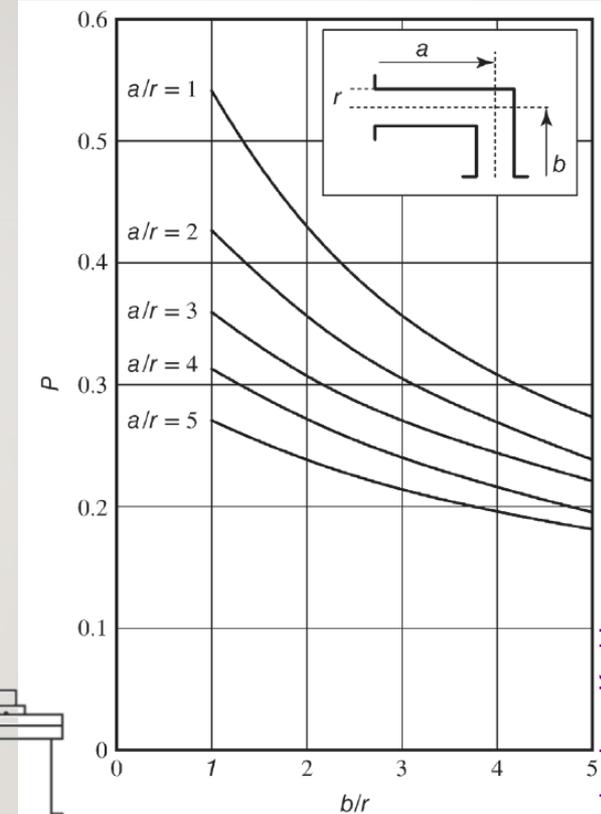
Вероятность прохождения газа через колено определяется по номограмме

$$\frac{b}{r} = \frac{a}{r} = \frac{200}{77} = 2.6 \dots \dots \dots \alpha \sim 0.3$$

$$U = 121 \times 0,0186 \times 0,3 = 0,659 \text{ м}^3/\text{с}$$

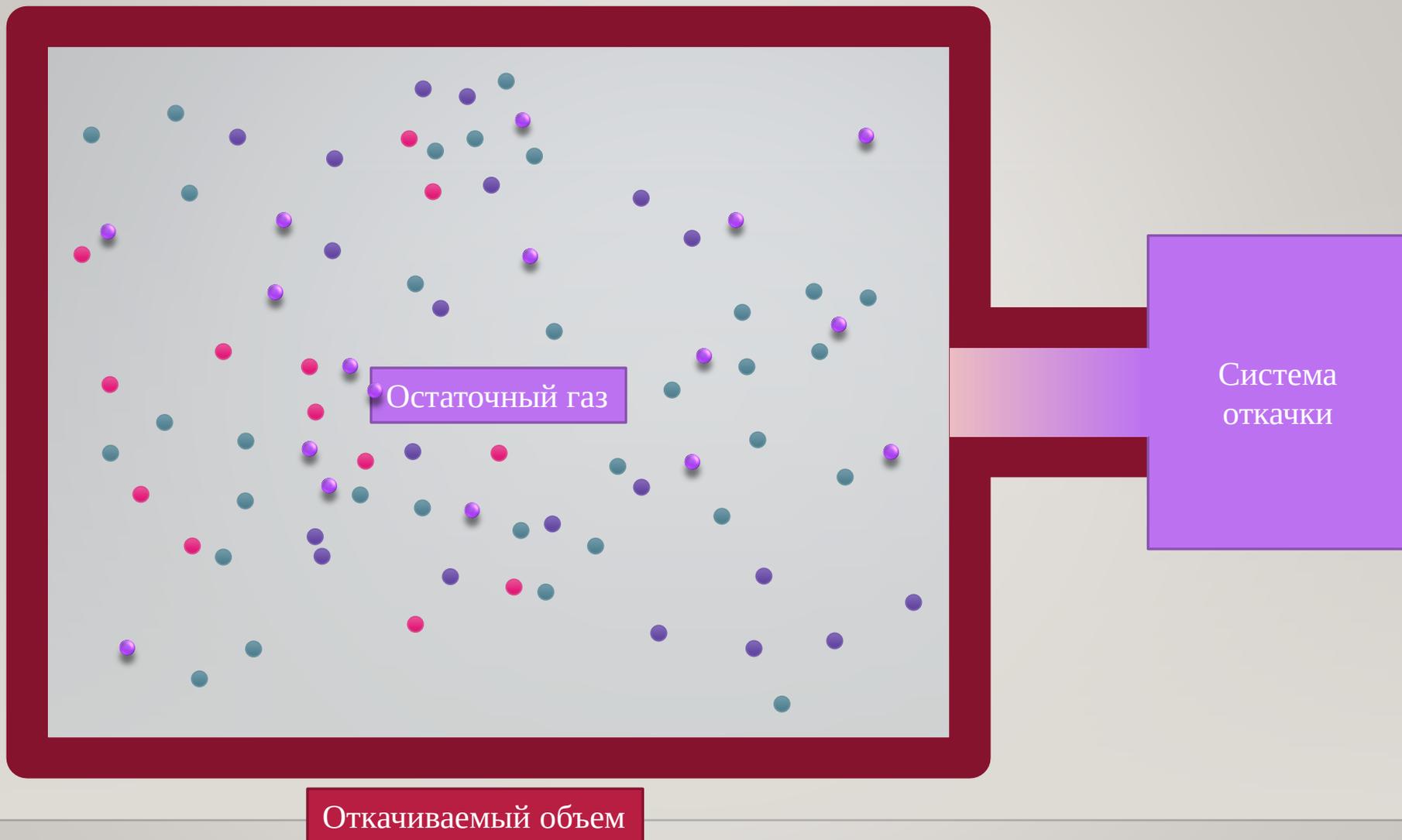
$$\frac{1}{S_{\text{Э}}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H} = \frac{1}{0,659} + \frac{1}{0,300}$$

$$S_{\text{Э}} = 0,206 \text{ м}^3/\text{с}$$

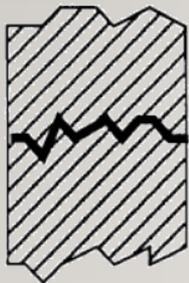


ИСТОЧНИК ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ

Источники газовой нагрузки



- Дефекты сварки («непровар»; остатки присадочного материала; растрескивание);
- Дефекты литья (трещины в теле элементов вакуумных объемов);
- Дефекты сборки фланцевых соединений (некачественная сборка; царапины на уплотняющих поверхностях, повреждения уплотнений);



- Реальные течи определяют предельное давление, которое можно получить в вакуумном объеме;
- Существуют две категории реальных течей:

$Q_{РТ} > 10^{-3}$ Па·л/с – ламинарная течь;

$Q_{РТ} < 10^{-6}$ Па·л/с – молекулярная течь;

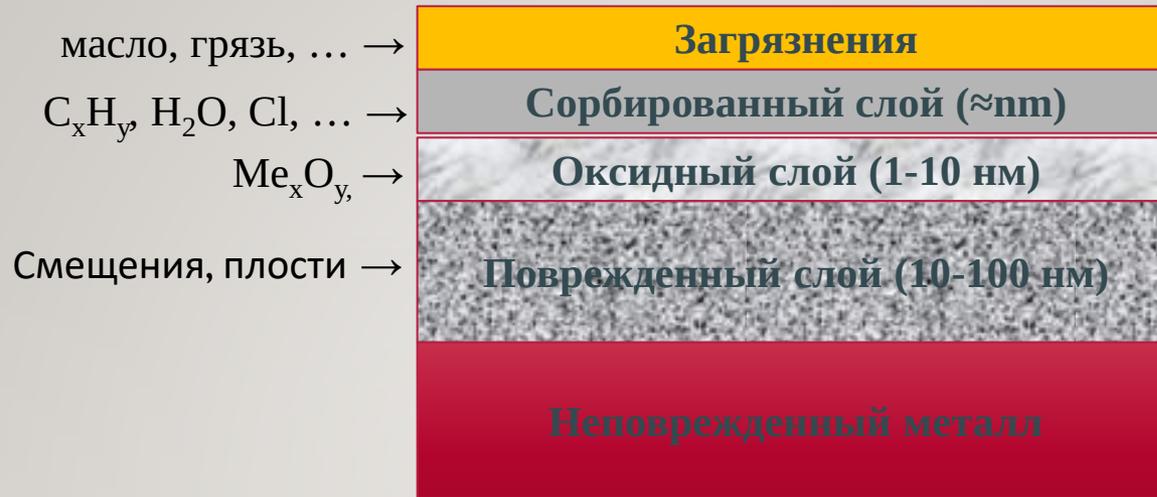
- Реальные течи диагностируются при помощи специальных приборов: течеискателей.
- Метод гелиевого течеискания один из самых чувствительных

- Виртуальная течь это объем, конструктивно заперты в теле камеры или устройств внутри вакуумного объема;
- Основная причина возникновения – ошибки в конструкции
- Мнимая течь не связана каналом с атмосферой;
- Мнимая течь с течением времени уменьшается



$$Q_{LV} = \frac{P_a V}{et}$$

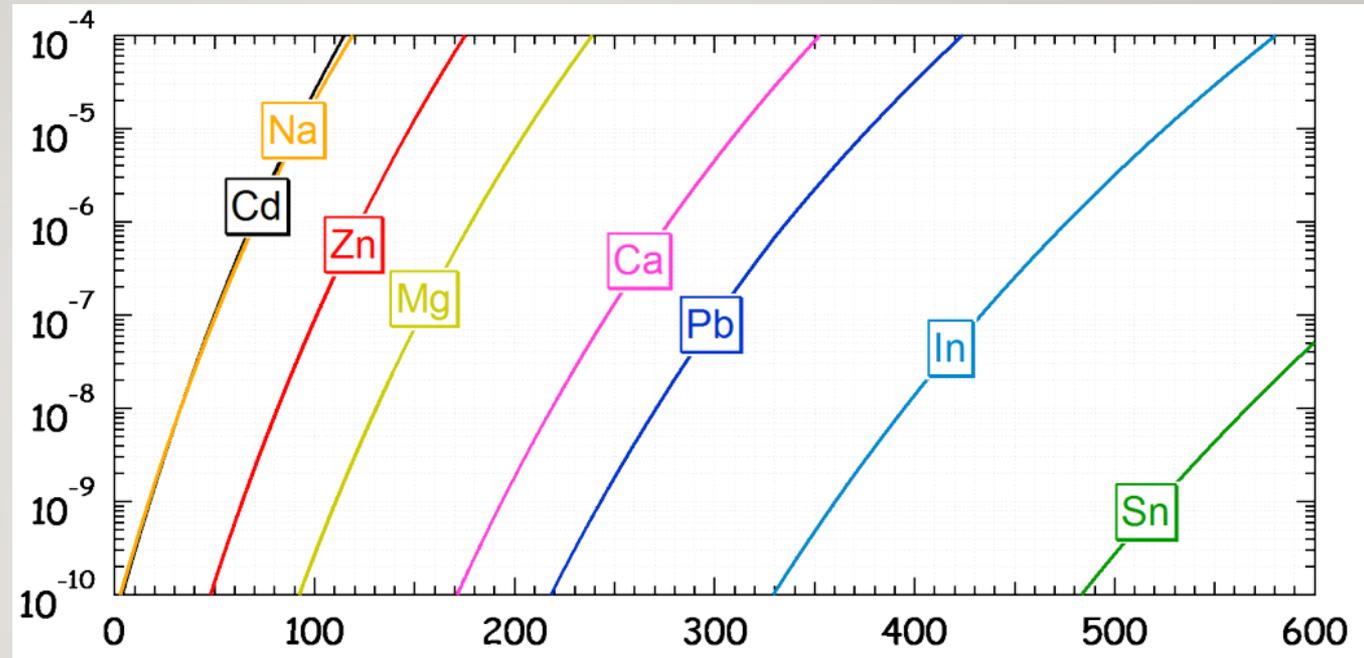
- Q_{LV} – газовый поток из мнимой течи;
- P_a – давление в полости мнимой течи;
- e – натуральный логарифм;
- t – время



- **Десорбция** – выход газа с внутренних поверхностей вакуумного объема под действие температуры или иных индуцирующих факторов
- **Физическая сорбция** – удержание частиц на стенках вакуумного объема за счет действия Ван-Дер-Ваальсовых сил. Типичная энергия сорбции $< 0,5 \text{ eV}$ (50кДж/моль). Большинство газов взаимодействуют по средством этих сил.
- **Химическая сорбция** – удержание молекул на твердой поверхности в результате образования химических связей.
- **Десорбция нулевого порядка** - выход газа из внешних слоев.
- **Десорбция первого порядка** – десорбция газа из монослоя без диссоциации
- **Десорбция второго порядка** – рекомбинация молекул с последующей десорбцией

$$\log_{10} P_E = A - \frac{B}{C + T}$$

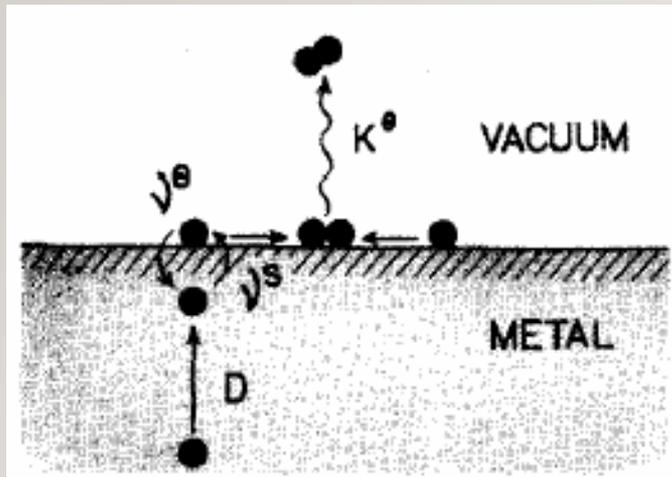
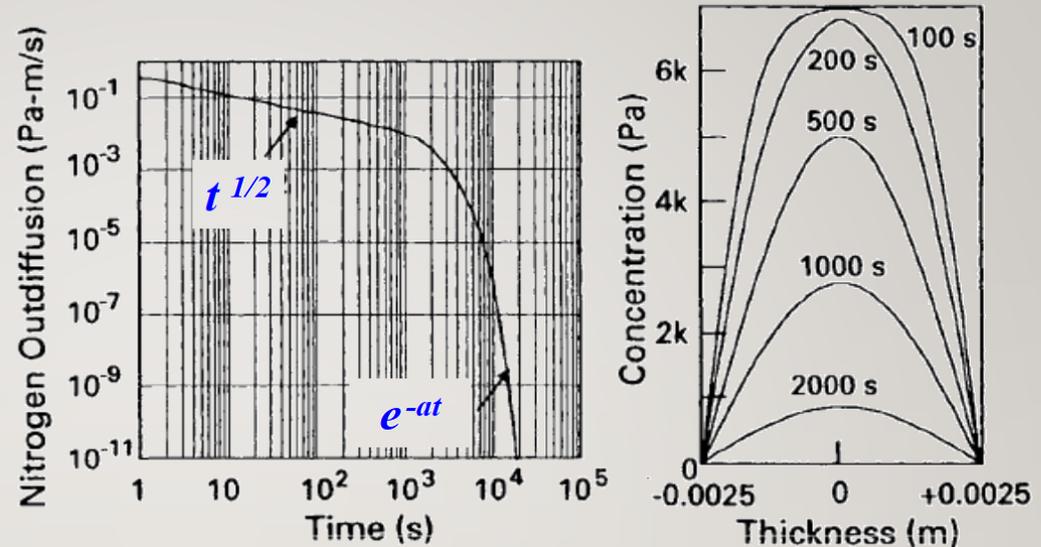
- Коэффициенты А, В, С определяются для узкого температурного диапазона



$$Q_E = 3.639 \sqrt{\frac{T}{M}} (P_E - P) A$$

- Q_E – газовый поток испаряющегося материала;
- T – температура [К]
- M – молекулярный вес [грамм/моль]
- P_E – давление насыщенного пара материала при данной температуре;
- P – парциальное давление испаряющихся молекул;
- A – площадь испарения [см²]

- Диффузия – миграция растворенного газа к внутренней поверхности стенки вакуумного объема и последующая десорбция

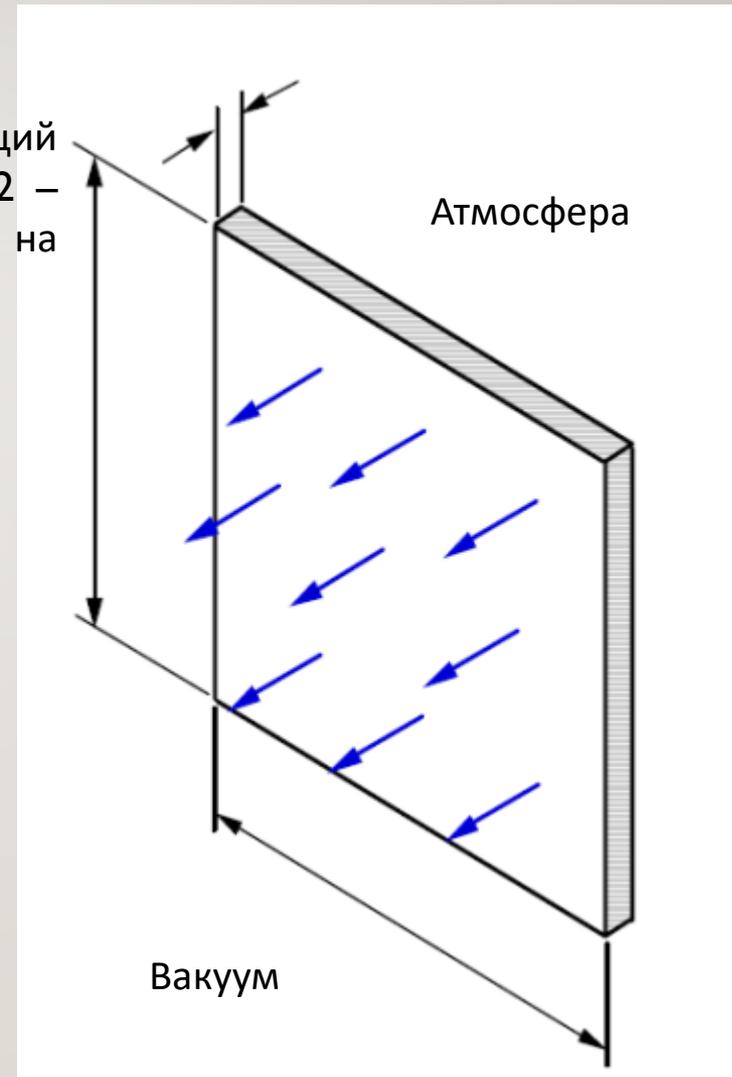


- В процессе производства в металле растворяется большое количество газов
- Водород, имея высокую мобильность, достигает поверхности, где образует химическую связь с другим атомом. Энергия сродства с поверхностью и молекулы водорода гораздо ниже, чем у отдельных атомов. Молекулы водорода покидают поверхность.

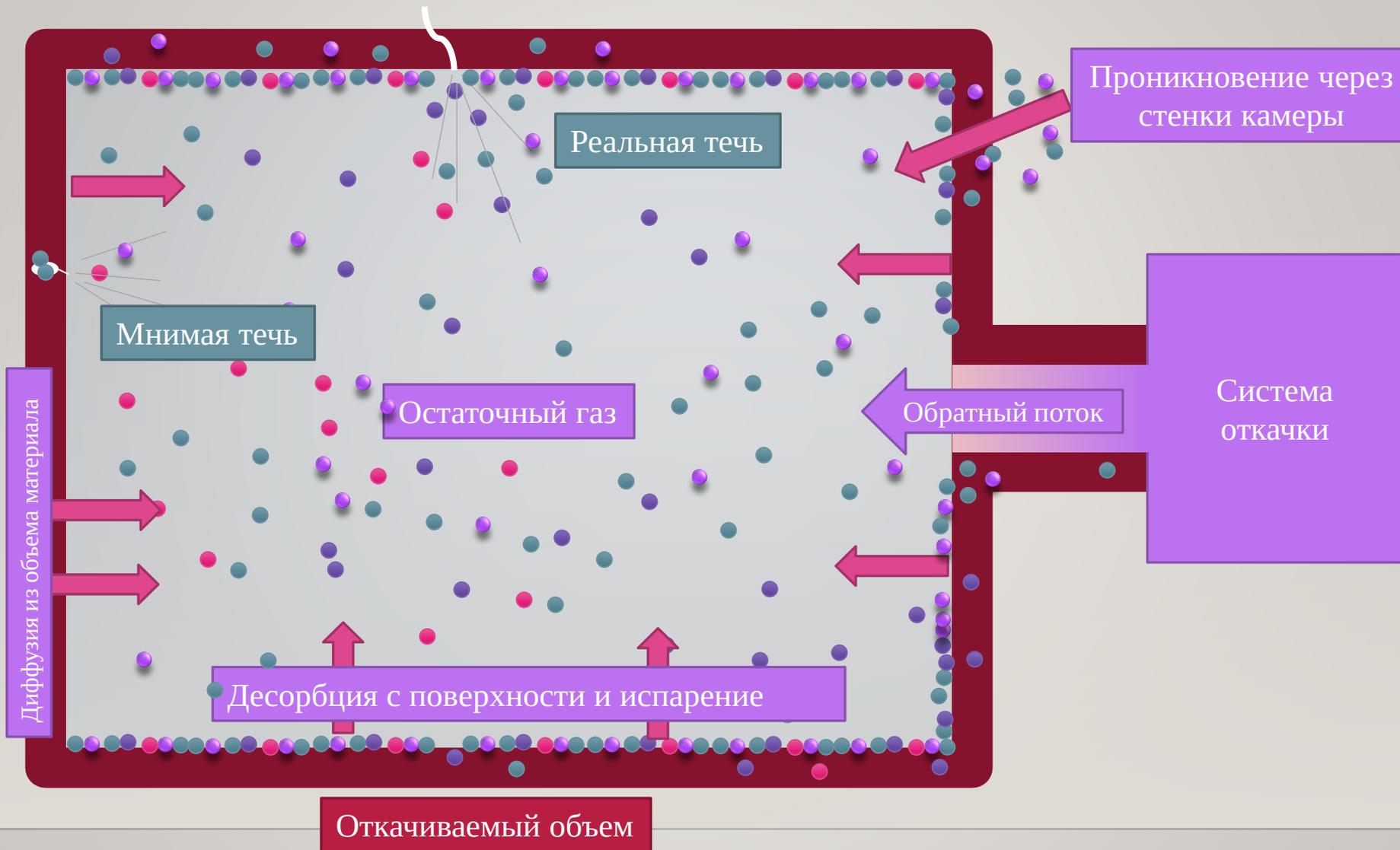
- **Проникновение газа через стенки** – процесс, состоящий из трех этапов: 1 - сорбция газа на поверхности; 2 – растворение газа в металле, диффузия и выход на поверхности со стороны вакуума; 3 - десорбция
- **Определяющие факторы:** материал; температура; толщина стенки; перепад давления

$$Q_p = q_p A = \frac{K_p \Delta P}{d} A$$

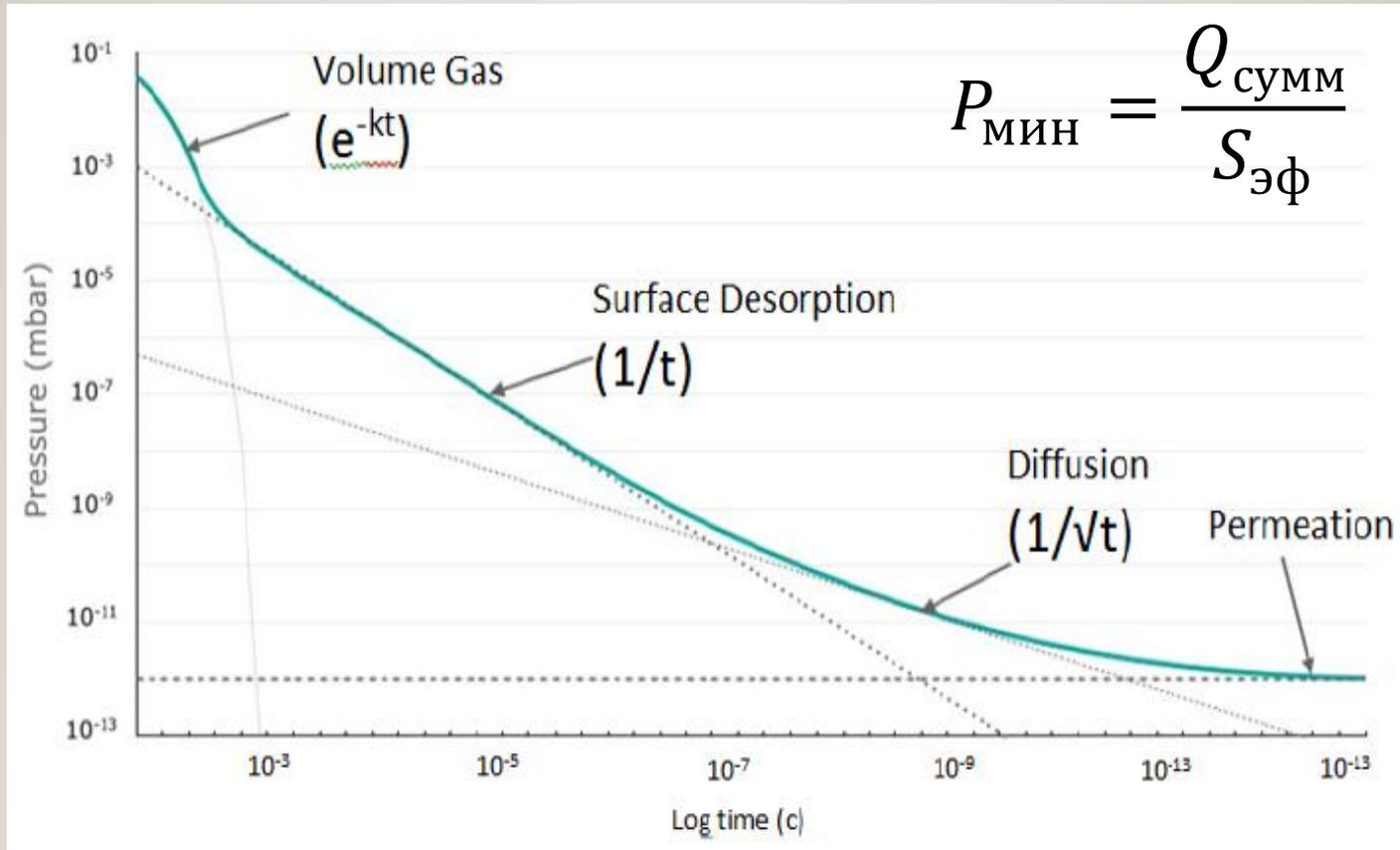
- K_p - константа проникновения [м²/с]



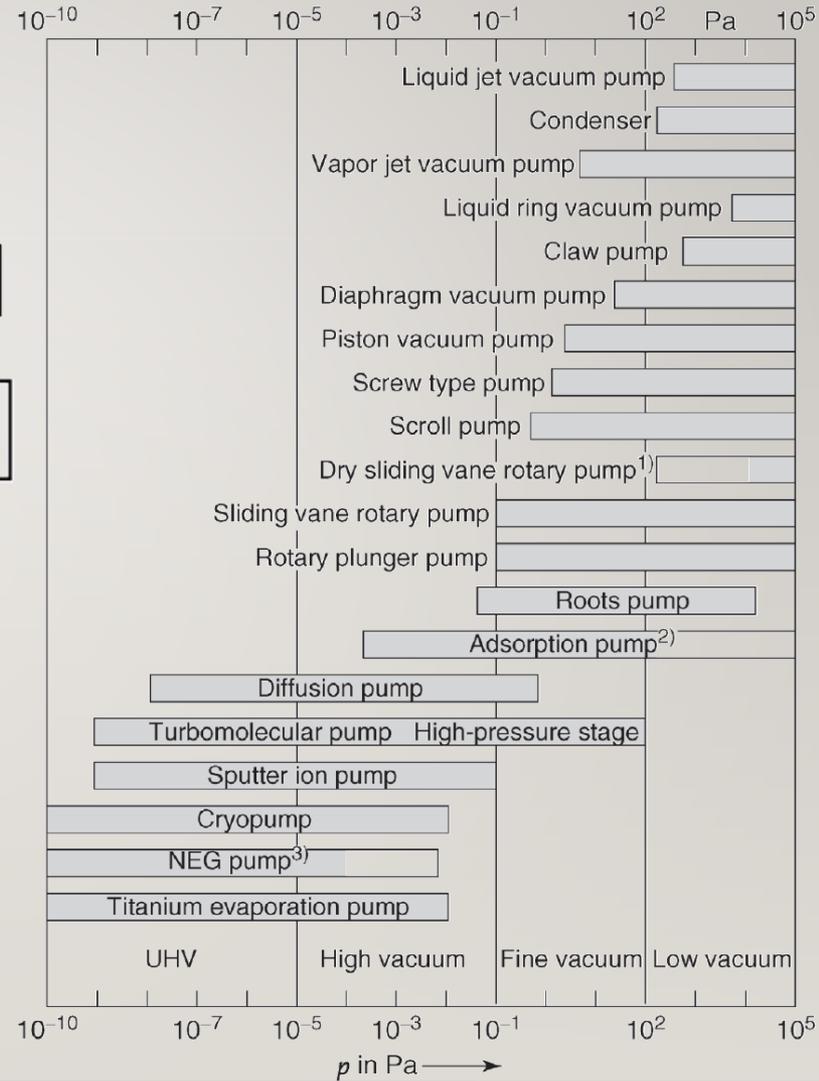
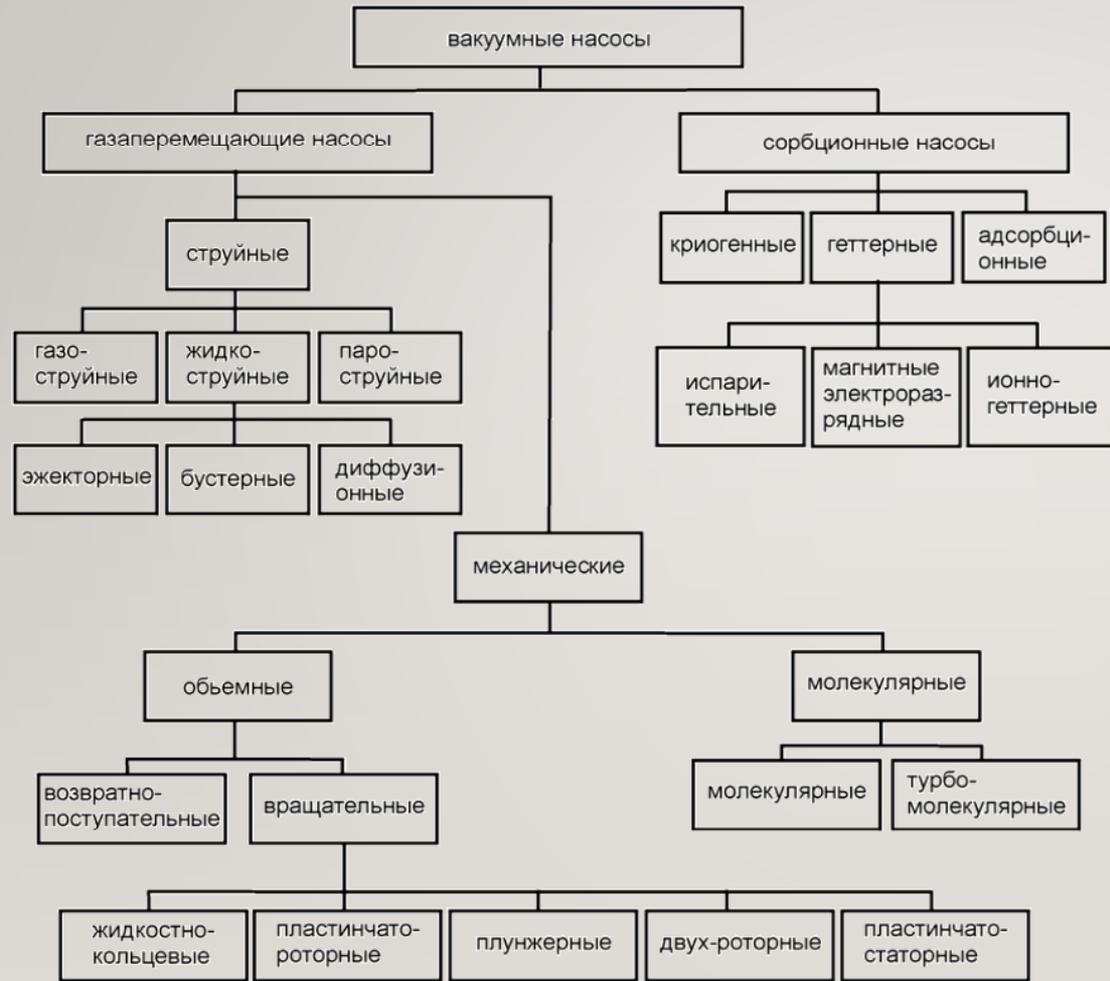
Источники газовой нагрузки

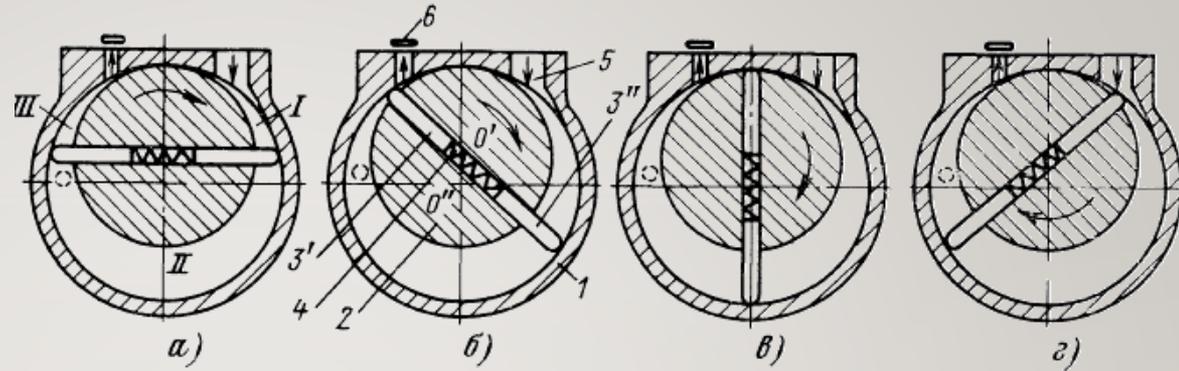
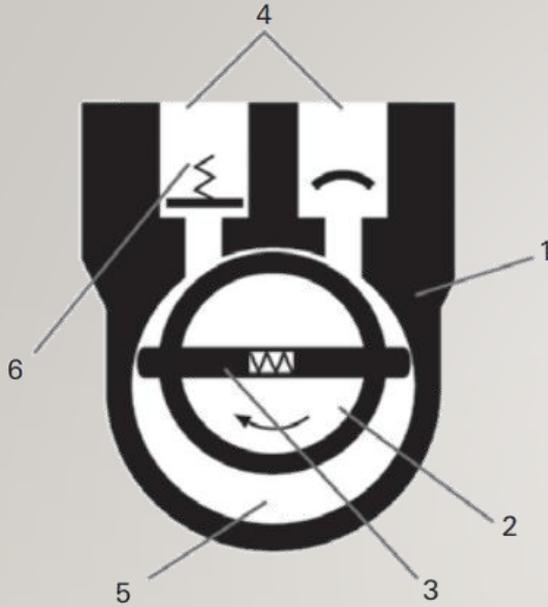


- Минимальное давление определяется отношением суммы потоков натекания и газовыделения к эффективной скорости откачки вакуумной системы

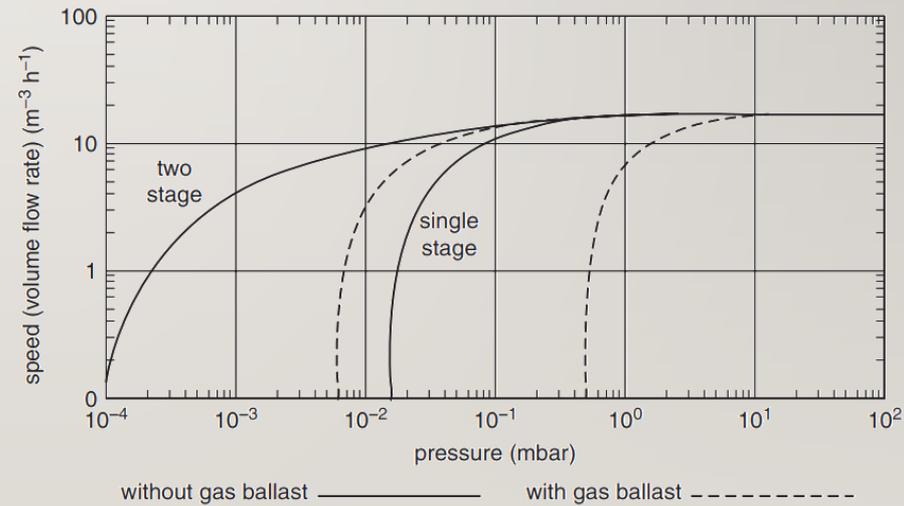


СПОСОБЫ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО ВАКУУМА

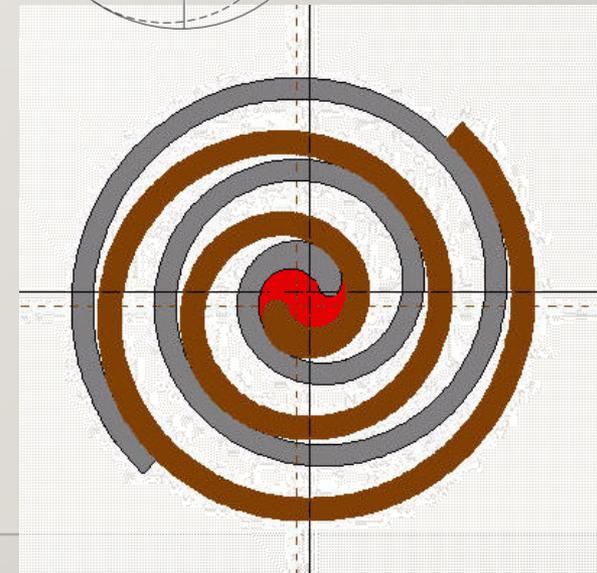
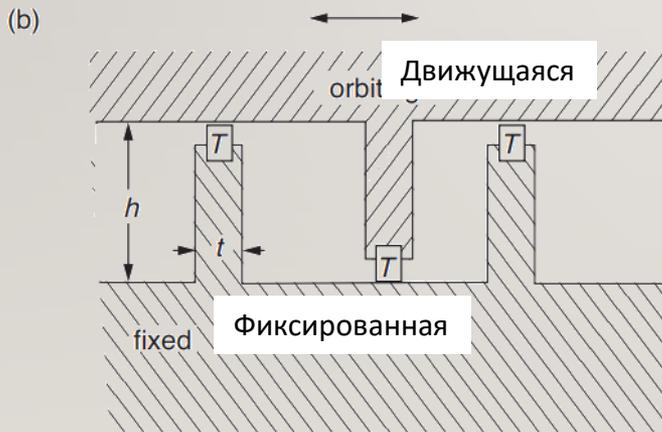
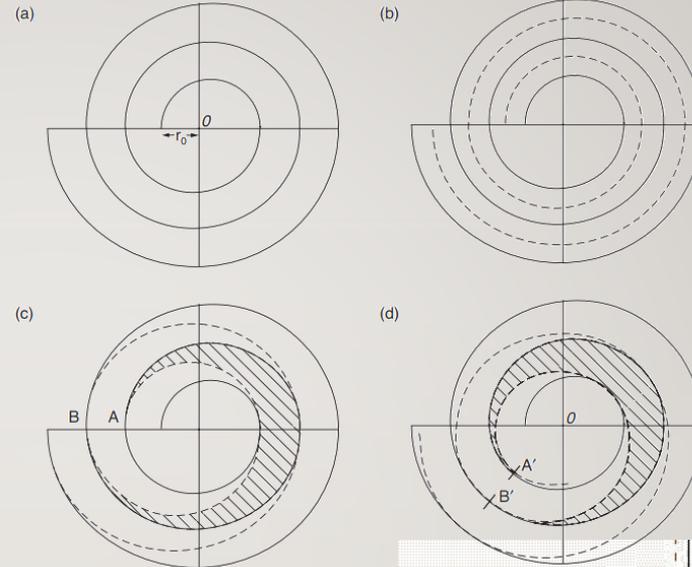




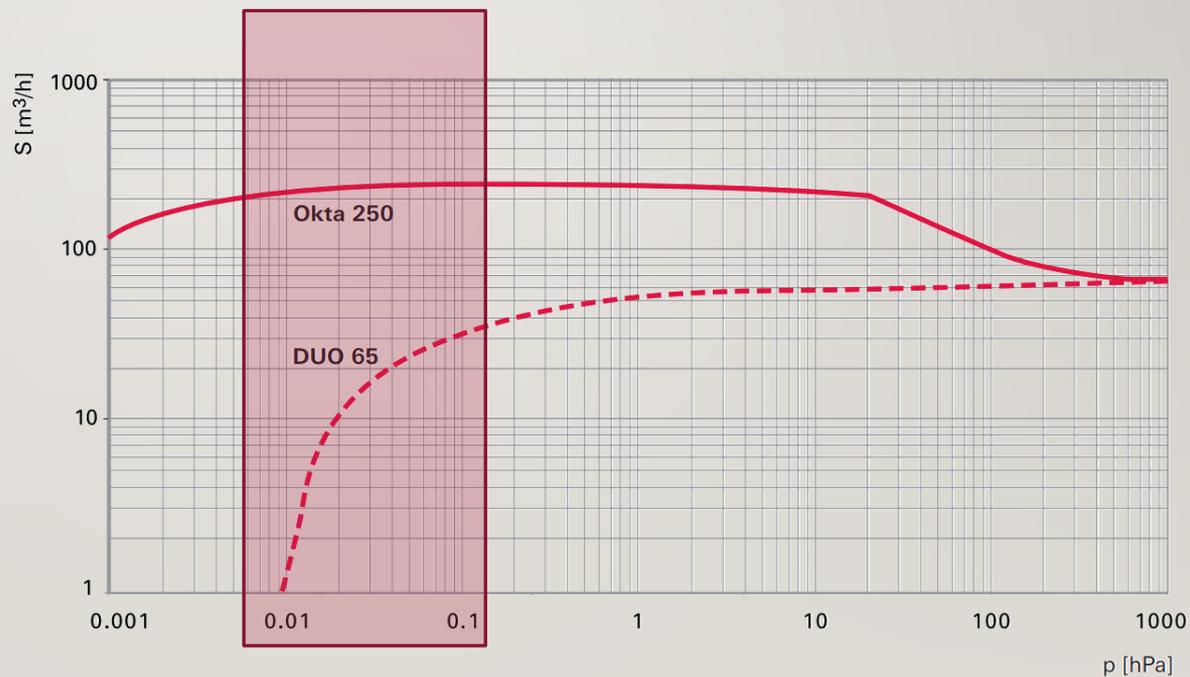
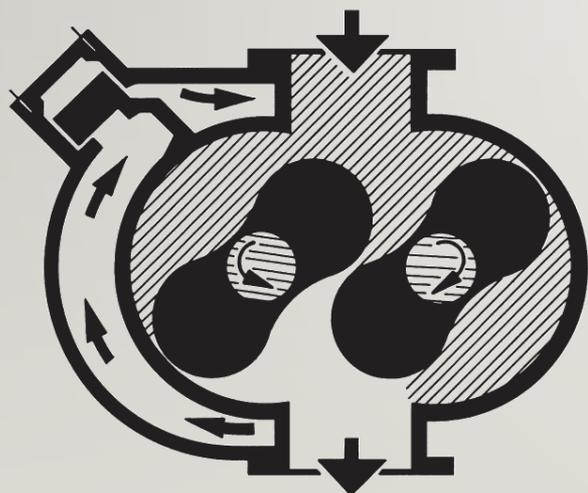
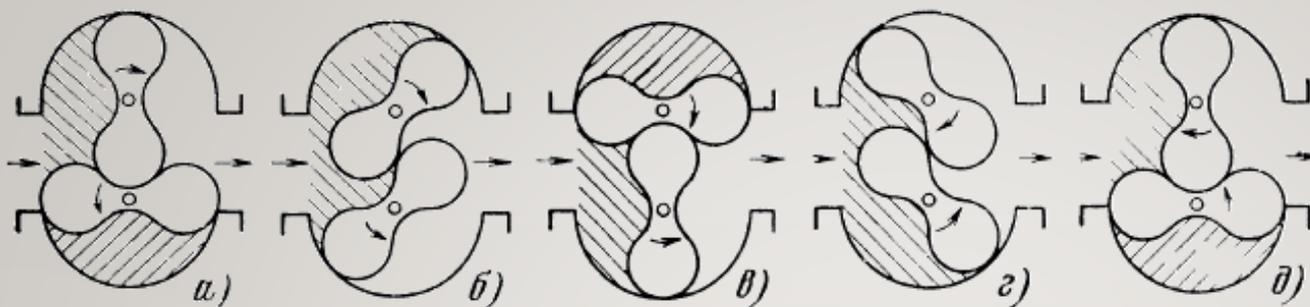
1. Неподвижный корпус;
2. Ротор;
3. Пластины;
4. Входной и выходной каналы;
5. Рабочая камера;
6. Обратный клапан



Спиральные насосы

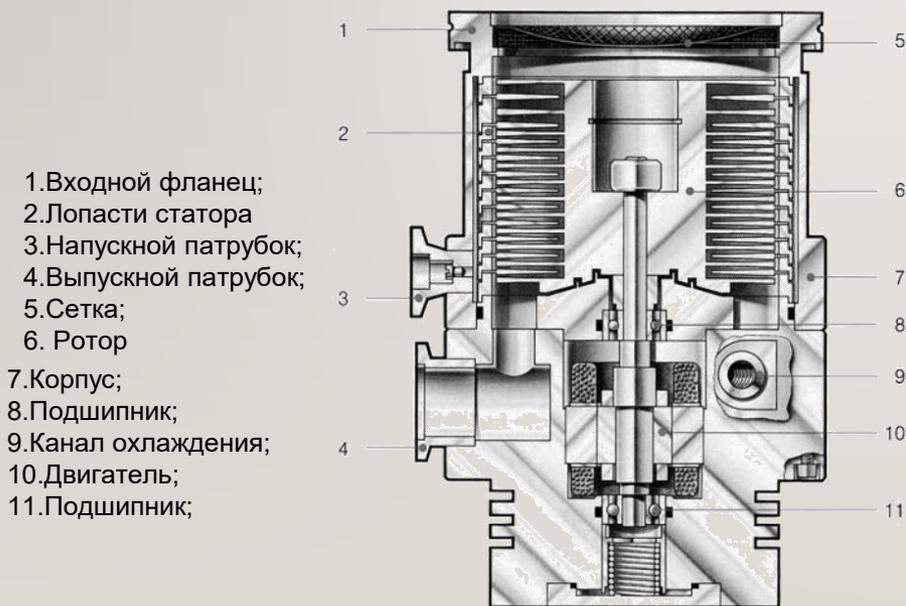
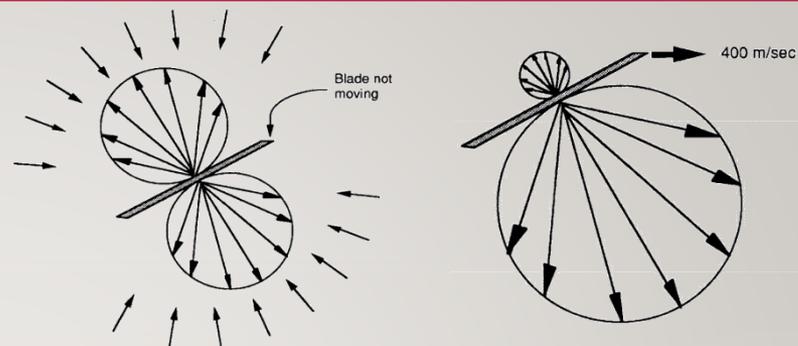


Роторные насосы (типа Рутс)

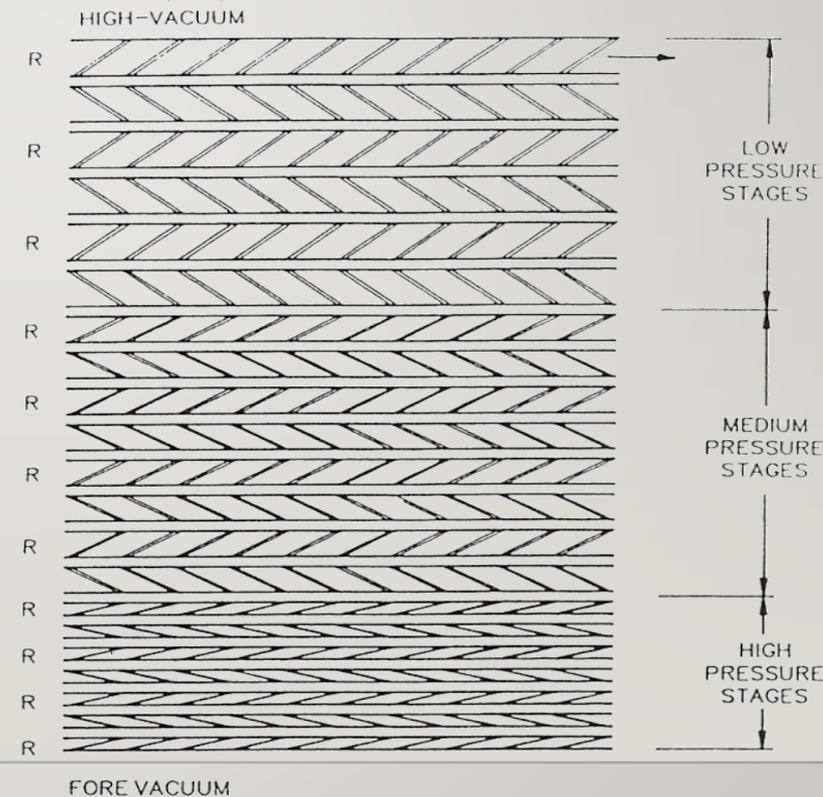


Турбомолекулярные насосы

- Вращающиеся лопасти придают ускорение молекулам в нужном направлении;
- Для достижения требуемой компрессии скорость вращения должна быть соизмерима со средней скоростью движения молекул;
- Увеличение угла наклона лопастей обеспечивает большую производительность, уменьшение – высокую компрессию
- Лопасти статора уменьшают скорость движения молекул и создают дополнительное сопротивление обратному потоку;
- Статор размещается на минимально-возможном расстоянии от ротора;
- Ротор и статор создают пару, называемой ступенью

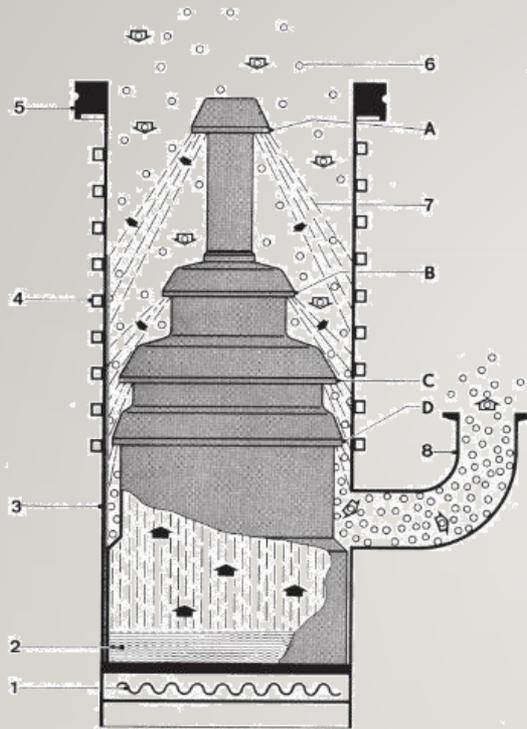


1. Входной фланец;
2. Лопасти статора
3. Напускной патрубок;
4. Выпускной патрубок;
5. Сетка;
6. Ротор
7. Корпус;
8. Подшипник;
9. Канал охлаждения;
10. Двигатель;
11. Подшипник;



| Типа насосов | Преимущества | Недостатки |
|-----------------------|---|--|
| Поршневой | Стоимость | Устарел, масло, вибрация, низкая надежность, вес |
| Мембранный | Чистый вакуум, вес, стоимость | Вибрация, низкая надежность, высокое остаточное давление |
| Пластинчато-статорный | Низкое остаточное давление; низкая стоимость; | Устарел, масло, вибрация, средняя надежность |
| Пластинчато-роторный | Низкое остаточное давление, низкая стоимость, надежность, производительность | Масло, вибрация |
| Плунжерный | Стоимость, высокая надежности, Низкое остаточное давление, производительность | Масло, вибрация, вес |
| Спиральный | «Чистый» вакуум | Низкая производительности, стоимость, средняя надежности, могут быть загрязнения |
| Винтовой | Относительно сухой вакуум, производительность, отсутствие вибрации | Стоимость, требования к чистоте газа |
| Кулачково-зубчатый | Относительно сухой вакуум, отсутствие вибрации | Стоимость, требования к чистоте газа |
| Роторный | Низкое предельное остаточное давление, низкий обратный поток масла | Стоимость, рекомендуется использования частотного регулятора, требуется охлаждение (не для всех) |
| Молекулярный | Высокий чистый вакуум | Устарел |
| Турбомолекулярный | Сверхвысокий чистый вакуум, надежность | Стоимость, прорыв атмосферы, расположение |





Четырехступенчатый диффузионный насос с водяным охлаждением

- 1 – нагреватель;
- 2 – резервуар с маслом;
- 3 – металлический корпус;
- 4 – трубки охлаждения рубашки;
- 5 – входной соединительный фланец;
- 6 – молекулы газа;
- 7 – струи паров масла;
- 8 – выходной фланец
- A, B, C, D – обратные сопла (ступени)

- Рабочий диапазон: от 10^{-1} - 10^{-6} Па;
- Молекулярный режим работы;
- Механизм удаления газа обусловлен диффузионным процессом;
- За счет разности концентраций газа в струе и над струей происходит диффузия газа в струю;
- В струе молекулы приобретают импульс в направлении движения струи;
- Пар конденсируется на стенках корпуса насоса
- Рабочие жидкости: ртуть, вакуумное масло
- Промышленные диффузионные насосы могут обеспечивать производительность до 45 000 л/с при давлении 10^{-3} Па и предельный вакуум на уровне $\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} Па;
- Рабочая жидкость постоянно циркулирует в полости насоса;
- Рабочая жидкость выбрасывается с сопел со сверхзвуковой скоростью
- Необходим форвакуумные насос

- Преимущества: отсутствие подвижных частей и, как следствие, практически неограниченный срок эксплуатации насоса при соблюдении всех необходимых рекомендаций; используется для систем откачки с низкими требованиями по чистоте откачиваемого объема.
- Недостатки: присутствие в рабочей камере масла, контактирующего с откачиваемой средой (неизбежно попадание паров в откачиваемый объем) и необходимость периодической его замены после снижения давления насыщенных паров за счет загрязнения продуктами откачки и продуктами разложения; относительно сложный и длительный процесс запуска и остановки откачки (от десятков минут до единиц часов); наличие водяного контура охлаждения. Необходимо обеспечить надежную защиту от прорыва атмосферы — резкого повышения давления за пределы рабочего диапазона (сопровождается выбросом паров и капель масла в вакуумный объём, окислением рабочей жидкости, появлением налёта из продуктов разложения на деталях, что выводит насос из строя).

- Принцип работы основан на захвате молекул рабочей поверхностью ;
- Захваченные газы могут быть химически связаны (хемосорбированы), физически связаны (криосорбированы, конденсированы, криопоглащены), или замурованы (погребены);
- Чистый вакуум;
- Отсутствуют движущиеся элементы, смазка, шум;
- Могут быть источником «вредных» частиц;
- Имеют ограниченную емкость. Длительность цикла зависит от нагрузки. Могут быть регенерированы;
- Большинству типов насосов требуется создание предварительного вакуума;
- Большой ресурс работы;
- Относительно простая эксплуатация и обслуживание

Поглотительные насосы

Магниторазрядные

- Активная откачка;
- Откачивает все газы, включая «благородные»;
- Очень большое время заполнения;
- Рабочий диапазон: от 10^{-5} - 10^{-10} Па

Сорбционные

- Пассивная откачка;
- Физическая сорбция;
- Откачивает большинство газов;
- Относительно малая емкость;
- Рабочий диапазон: от 10^5 - 10^{-2} Па

Крио-сорбционные

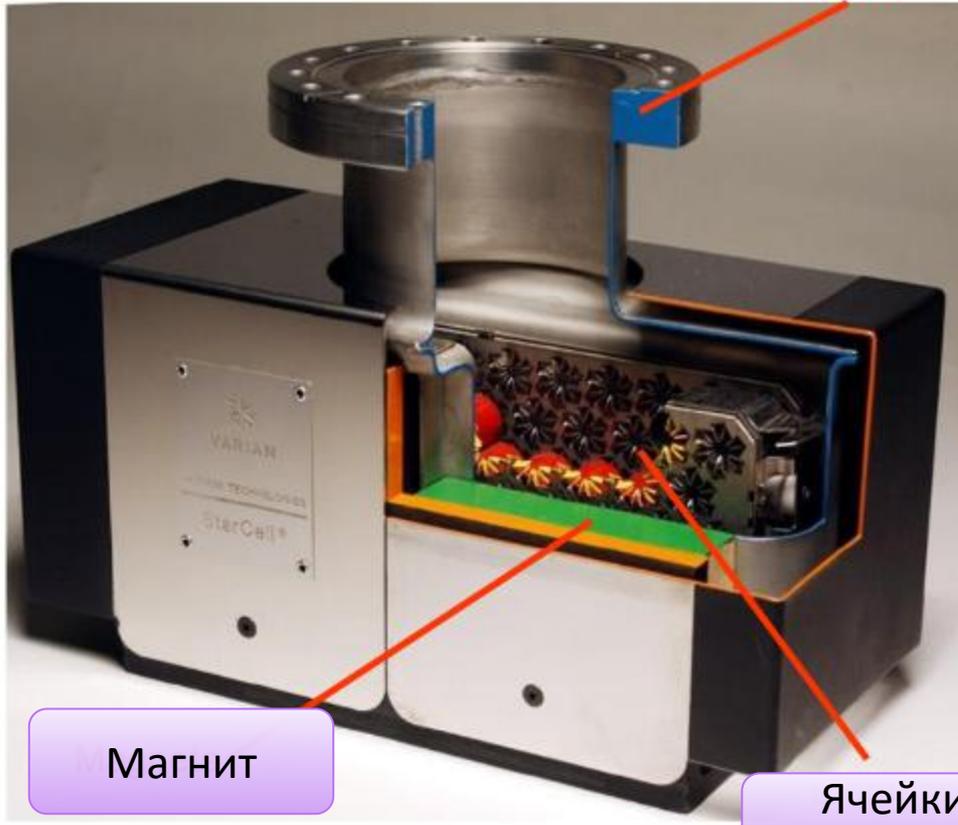
- Пассивная откачка;
- Физическая сорбция;
- Откачивает все газы, в том числе и гелий;
- Очень большая емкость;
- Рабочий диапазон: от 10^5 - 10^{-11} Па

Титановые сублимационные

- Пассивная откачка;
- Химическая сорбция;
- Откачивает преимущественно химически активные газы
- Очень большая емкость;
- Рабочий диапазон: от 10^{-4} - 10^{-10} Па

Нераспыляемые геттеры

- Пассивная откачка;
- Химическая сорбция;
- Откачивает только химически активные газы;
- Очень большое время заполнения;
- Рабочий диапазон: от 10^{-4} - 10^{-10} Па



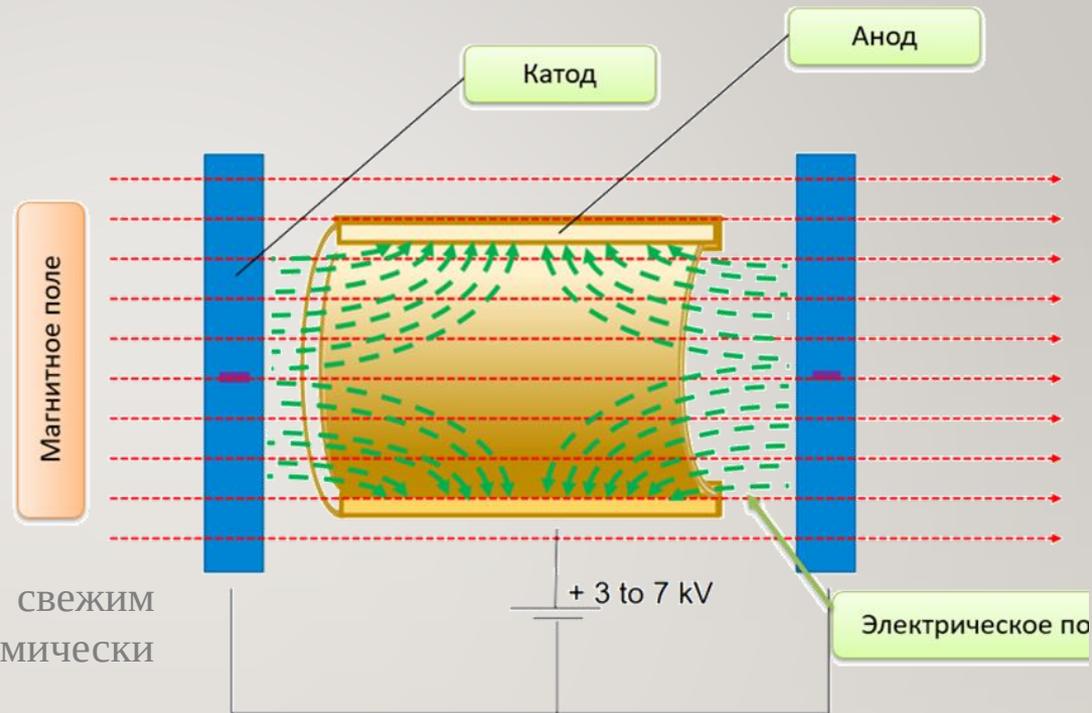
Входной
фланец

Магнит

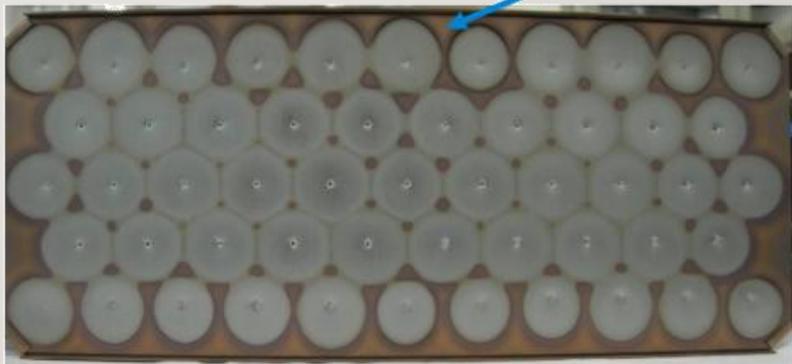
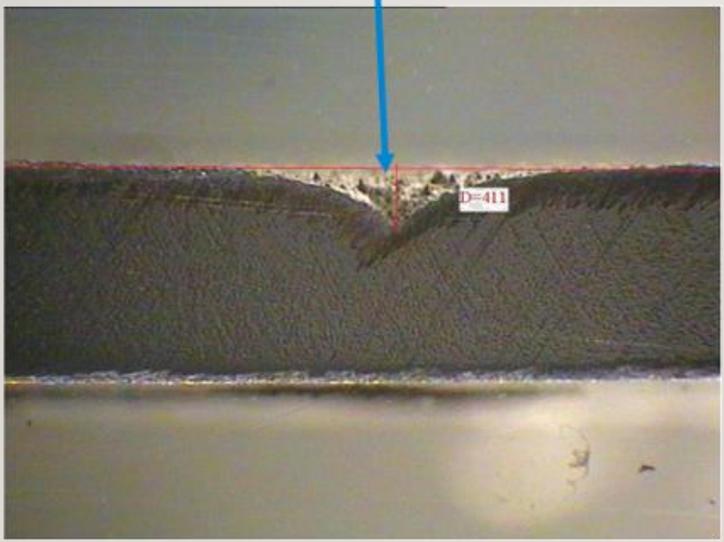
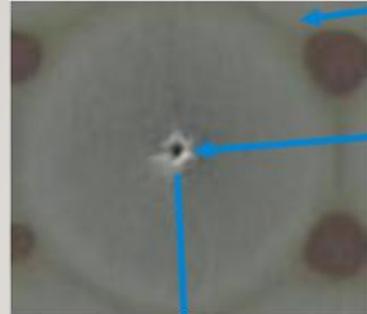
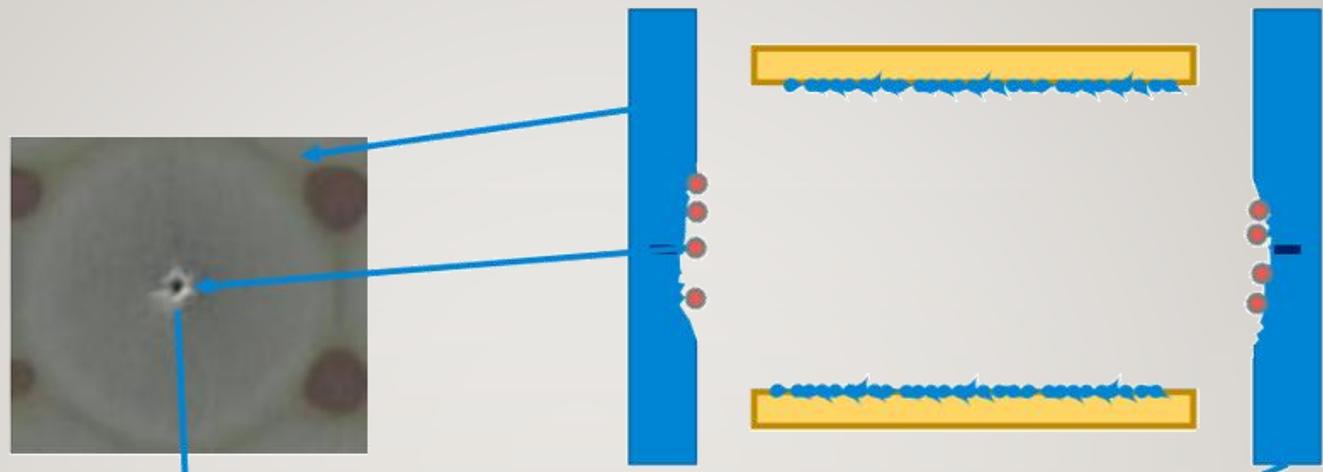
Ячейки
Пеннинга

- Откачка основана на работе ячеек Пеннинга;
- Количество ячеек определяет производительность;
- Компания Varian первой начала коммерческое использование ячеек Пеннинга
- «Чистый» вакуум;
- Широкий рабочий диапазон;
- Хороший ресурс работы;
- Требуется высокое напряжение– до 7kV

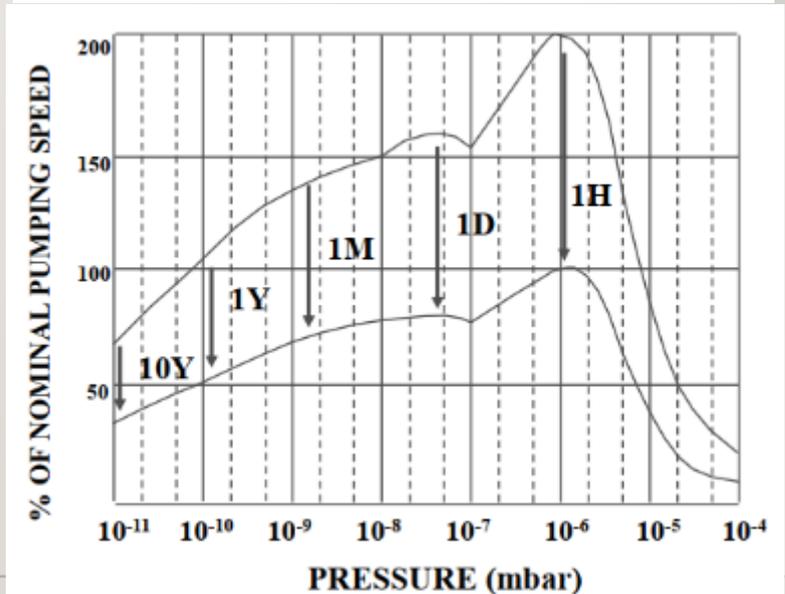
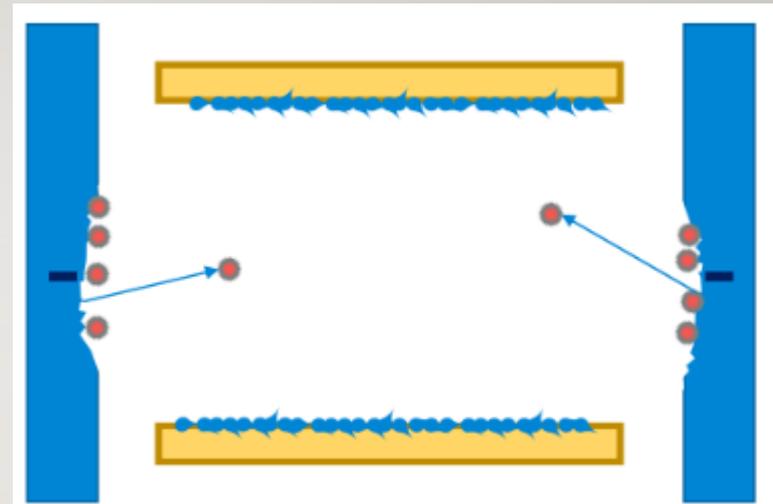
- Комбинация магнитного и электрического поля создает ловушку для электронов;
- Молекулы газа, попавшие в электронное облако могут быть ионизованы;
- В результате ион движется по направлению к катоду;
- Сталкиваясь с катодом ион выбивает часть материала;
- Молекулы газа могут столкнуться со свежим материалом катода и химически провозаимодействовать;
- Выбитые молекулы материала могут «замуровать» молекулы (физическое поглощение);
- Выбитый электрон захватывается электро-магнитной ловушкой;
- Количество ионов, попадающих в электронное облако, зависит от давления;
- Количество электронов, а, следовательно, и ток, прямо пропорционально количеству ионов;

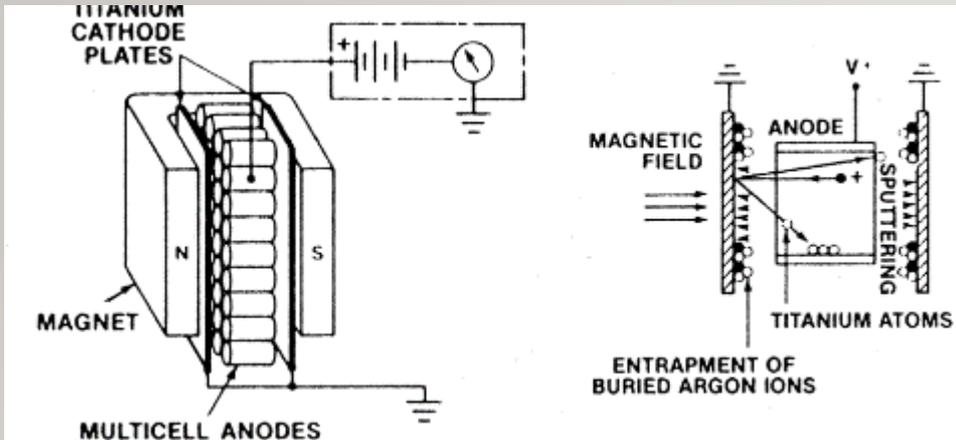


Ионные насосы: эрозия катода



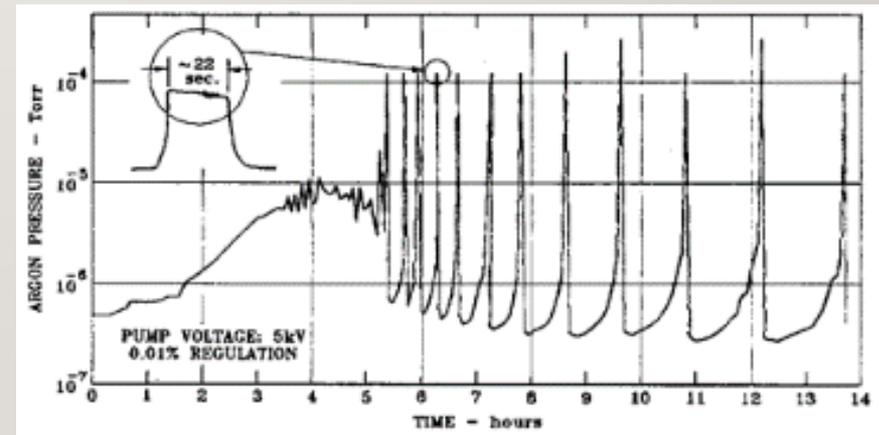
- Скорость откачки не является постоянной по причине эрозии катода
- Ранее замурованные атомы высвобождаются
- Как следствие, результирующая быстрота действия уменьшается, пока не будет достигнуто условие равновесия между замуровыванием и выходом ионов.
- Данное состояние равновесия называется «насыщенным»
- Но это не означает конец жизни насоса. Рабочие поверхности могут быть регенерированы или заменены
- Время насыщения зависит от давления
- Выше давление – выше уровень эрозии, быстрее достижения состояния равновесия

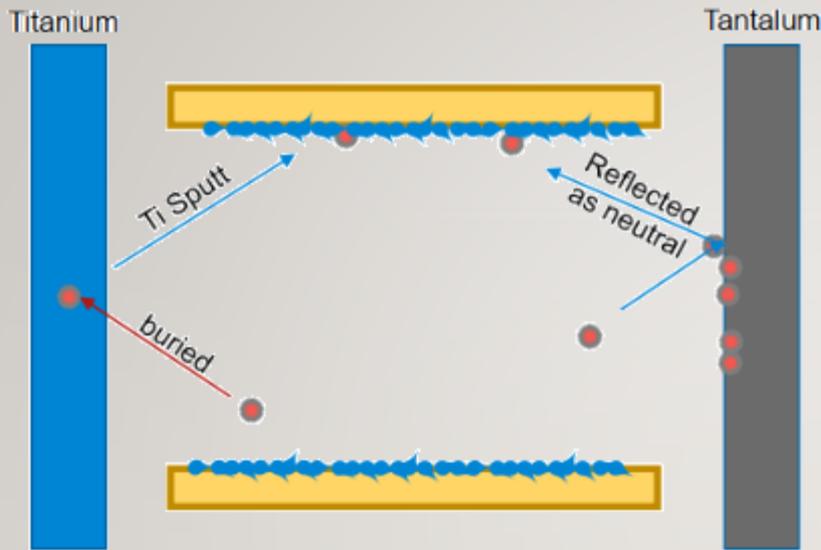




- В диодных насосах оба катода обычно сделаны из титана - из-за хорошей распыляемости и химической реактивности этого металла;
- При откачке воздуха или смеси, содержащей инертные газы, наблюдаются периодические всплески давления;

- Данный феномен называется «аргонная нестабильность», так как аргон в этих всплесках является основным газом;
- Одна из причин всплесков - замурованный аргон (или другие благородные газы) в катоде, который в определенный момент лавинно выделяется в процессе распыления.





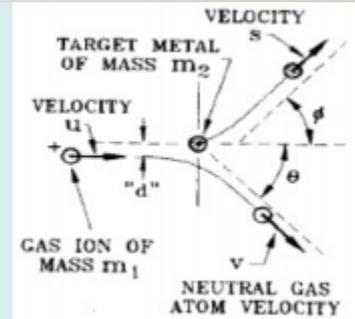
- Большая стабильность и быстрота действия по инертным газам;
- Производительность по азоту снижается на 20%;
- Уменьшается быстрота действия по водороду
- Насос более дорогой по отношению к стандартному диодному

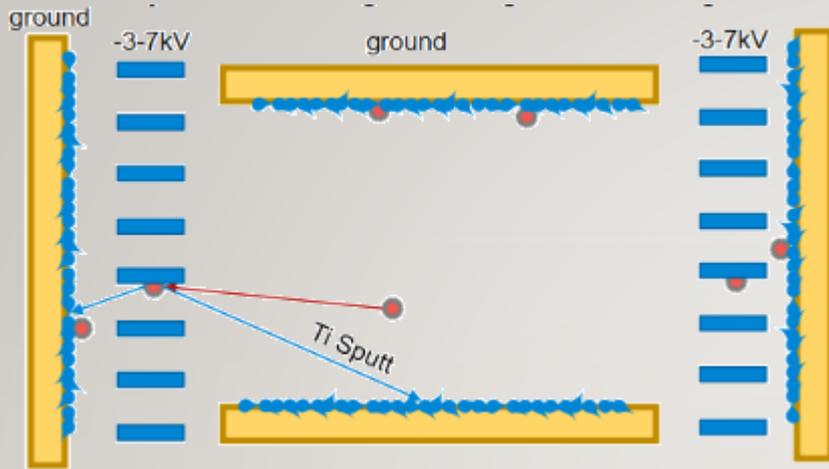
- В так называемых дифференциальных диодных насосах одна из катодных титановых пластин заменяется тяжелым металлом (обычно танталом).
- Повышение производительности откачки благородного газа объясняется так называемой нейтрализацией ионов без существенной потери энергии. Согласно теории ион аргона Ar^+ отражается от поверхности катода, а, затем, рассеивается и улетает с той же скоростью на поверхность анода, где внедряется в титановую пленку.

Fast Neutral Theory

$$\frac{v}{u} = \frac{\cos \theta + (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{R + 1}$$

$$R \equiv m_2 / m_1$$

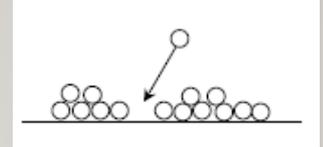




- Основная идея – сохранить производительность по благородным газам, повысить производительность по водороду;
- Катод сделан из Ti-полосок, а не плоской пластины, как в диодном насосе;
- Анод заземлен, катод находится под отрицательным напряжением, механизм ионизации Пеннинга остается таким же, как в диодном насосе;
- Новая форма катода увеличивает вероятность отражения благородных газов в виде нейтральных молекул с высокой энергией.

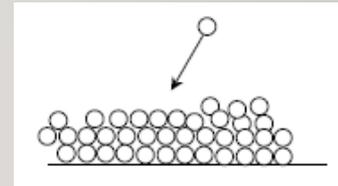
Криосорбция

- Физическая адсорбция – притяжение между молекулами газа и сорбента по средством ван-дер-ваальсовых сил;
- Энергия связи выше, чем при конденсации: 20 – 85 МэВ для водорода;
- Молекулы оказываются связанными еще до достижение состояния насыщения;
- Возможна откачка He при $T \leq 4,2\text{K}$, H_2 при $T \leq 20\text{K}$ и N_2 при $T \leq 77\text{K}$
- Среднее время пребывания на поверхности в 1ч достигается для H_2 при T : 5,2К на гладких поверхностях и 26К на пористых поверхностях;



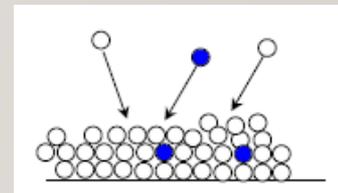
Конденсация

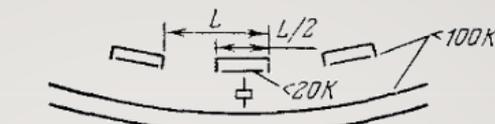
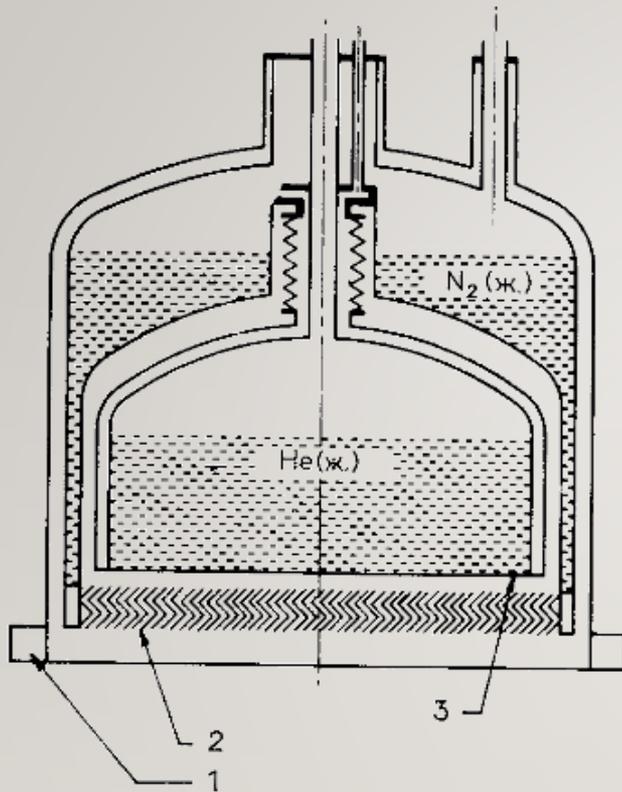
- Взаимодействие молекул газа с собственными молекулами, находящимися в твердой фазе, под действием ван-дер-ваальсовых сил;
- Энергия связи: около 9 МэВ для H_2 и около 175 МэВ для CO_2 ;
- Среднее время пребывания на поверхности в 1ч достигается при T : 2,8К для H_2 и 53,4К для CO_2 ;



Криозахват

- Замуровывание тяжело конденсируемого газа легко конденсируемым;
- Например для откачки водорода и гелия при температуре поверхности 4,2К используется аргон

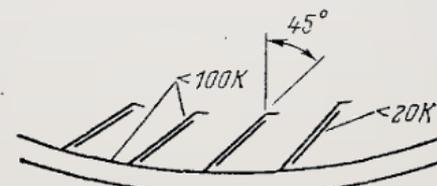




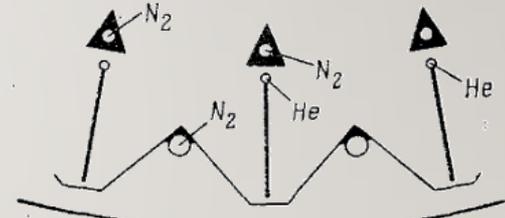
| D/L | 0,16 | 0,25 | 0,50 | a) |
|----------|-------|-------|-------|----|
| c | 0,09 | 0,122 | 0,134 | |
| α | 0,009 | 0,014 | 0,015 | |



| θ | 60° | 90° | 120° | b) |
|----------|------------|------------|-------------|----|
| c | 0,290 | 0,324 | 0,360 | |
| α | 0,020 | 0,022 | 0,022 | |



| | | |
|------------|------------------|----|
| $c = 0,36$ | $\alpha = 0,031$ | c) |
|------------|------------------|----|



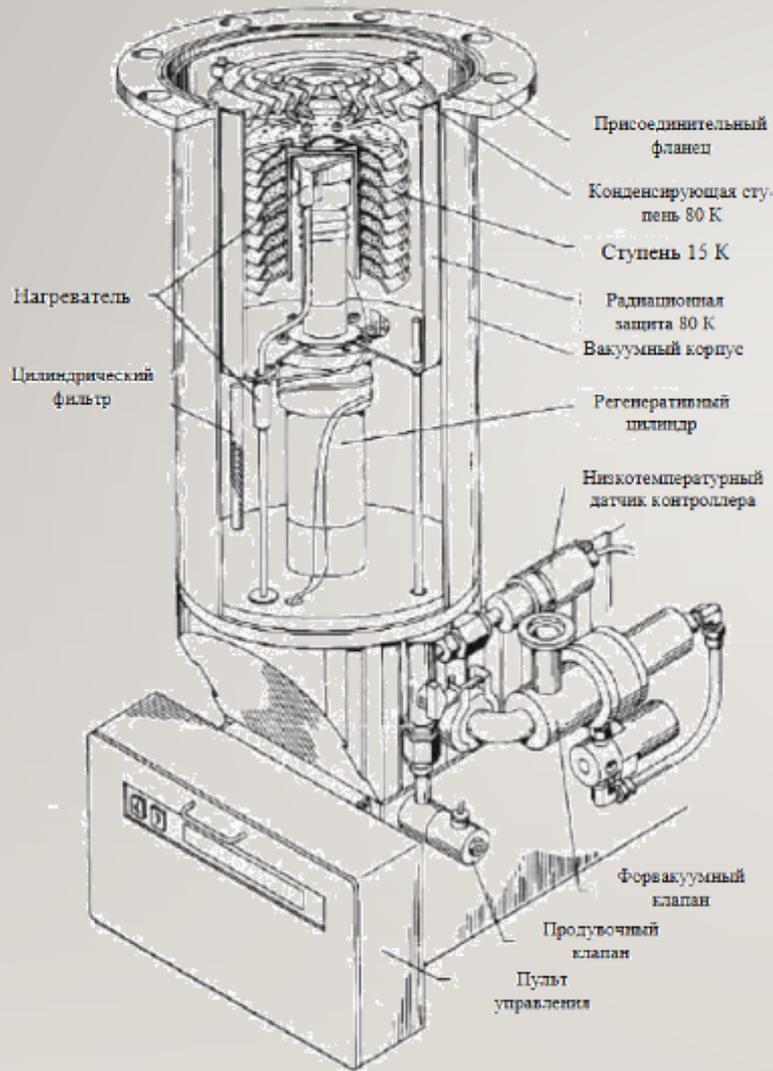
| | |
|-----------|----|
| $c = 0,5$ | d) |
|-----------|----|

Схема заливного криогенного насоса

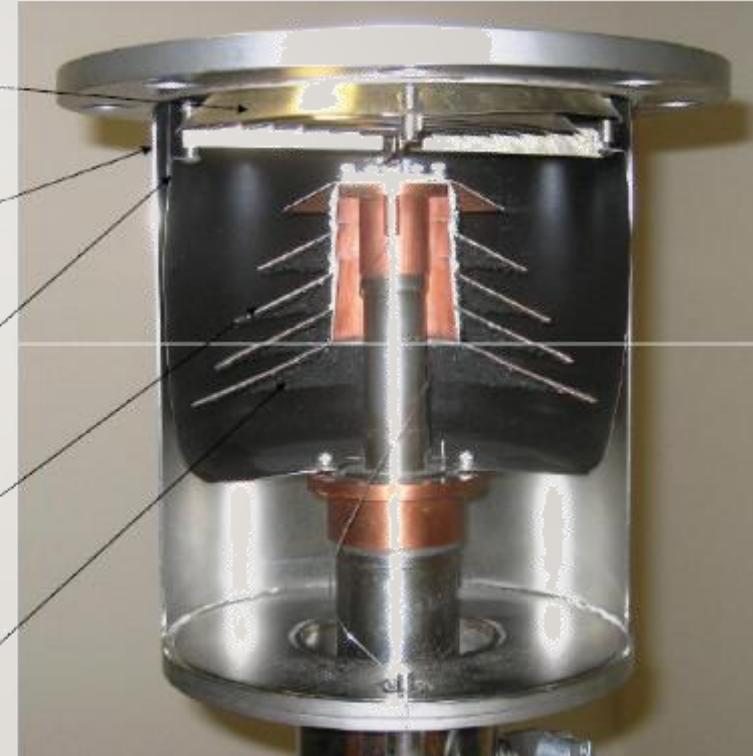
- 1 – соединительный фланец;
- 2 – шевронный экран;
- 3 – основная криповерхность

Различные варианты расположения конструктивных элементов, вероятности захвата (c) и коэффициента теплоотдачи (α) структуры крионасосов, располагающихся на цилиндрических и плоских поверхностях

Крионасосы: конструктив



- Решётка для защиты от теплового излучения
- Корпус
- 1-я ступень Откачка H_2O , тяжелых молекул
- 2-я ступень Откачка N_2 , O_2 , Ar
- Слой активированного угля Поглощение H_2 , Ne и He

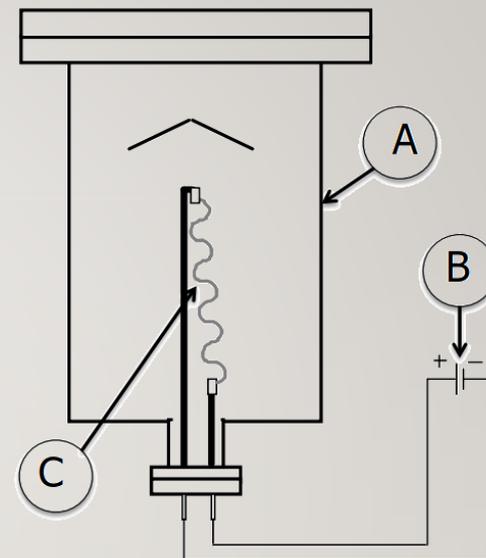


- Геттер - газопоглотитель, вещество, поглощающее и прочно удерживающее газы (кроме инертных), связывая их за счёт хемосорбции
- Нераспыляемые геттеры – поглотители, пленки которых формируются до помещения их в вакуумную систему
- Распыляемые геттеры – поглотители, пленки которых формируются непосредственно в вакуумной системе

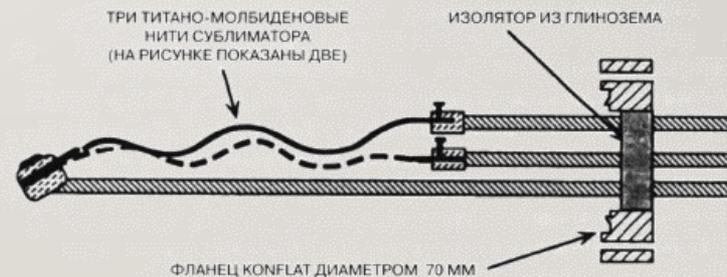
В зависимости от их взаимодействия с геттерами газы подразделяются на четыре группы, :

1. Водород и его изотопы - сорбируются обратимо;
 2. CO, CO₂, O₂ и N₂ – сорбируются необратимо;
 3. H₂O, углеводороды - сорбируются в комбинации обратимых и необратимых процессов. Углеводороды сорбируются очень медленно.
 4. Благородные газы - совсем не сорбируются
- Водород не образует стабильное соединение со сплавом геттера, но быстро диффундирует в массу геттерного материала, где он существует в виде твердого раствора. Концентрация водорода внутри геттерного сплава соответствует равновесному давлению водорода, которая сильно зависит от температуры.
 - Другие активные газы, такие как окись углерода, двуокись углерода, азот и кислород, хемосорбируются необратимо . Химические связи молекулы газа сначала разбиваются на поверхности геттера, а затем составные элементы сорбируются как атомы, образуя окислы, карбиды и нитриды. Прочность химических связей между геттером и этими элементами настолько сильны, что даже если сорбционный материал нагревается до температур порядка 1000 °С, эти газы не выбрасываются в вакуум. Наоборот, высокая температура ведет к диффузии газовых соединений в материал геттера и очистке поверхности для последующей сорбции.
 - NEG хорошо сочетается с ионными насосами

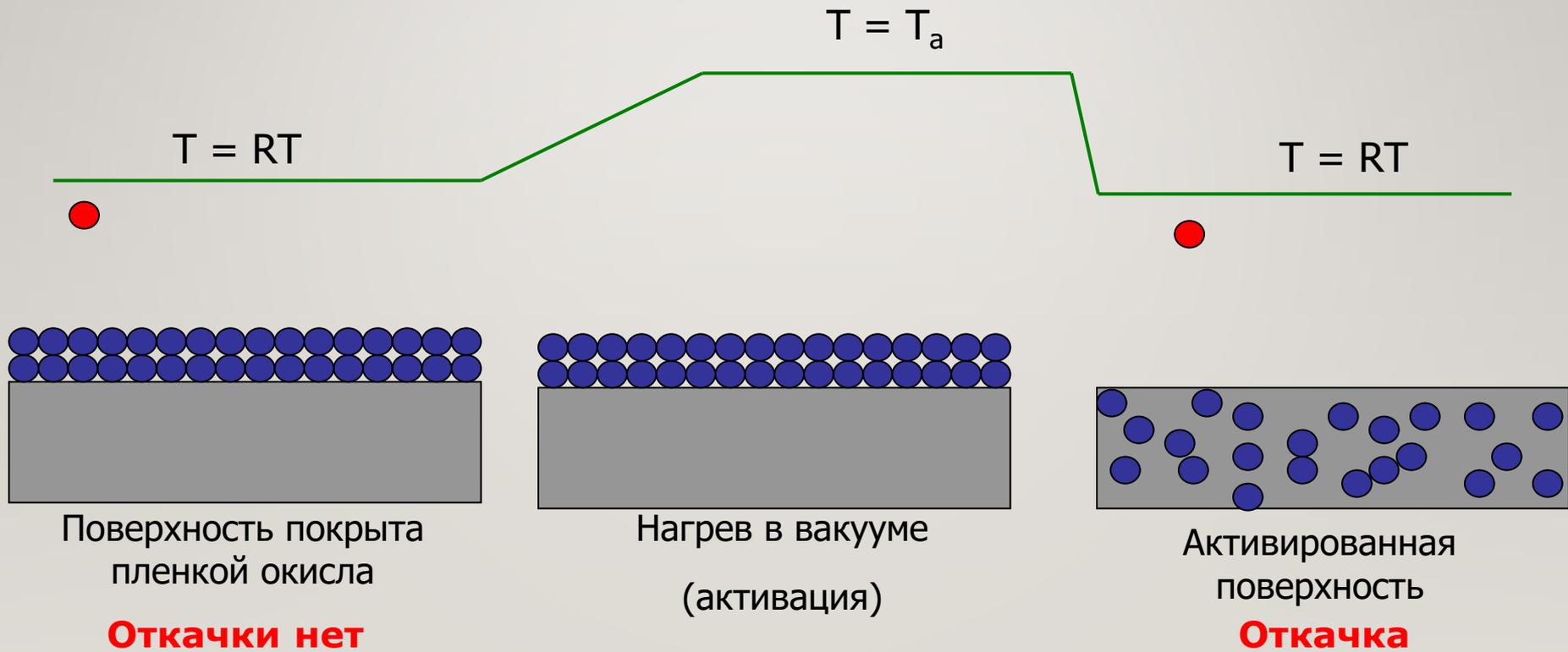
- TSP состоит из трех основных элементов:
- Источник геттера – титан-молибденовая нить (C);
- Блок питания для прогрева проволоки (B) – обычно 50А
- Поверхность, на которую титан может быть распылен (A) Удельная быстрота действия – 3 (H_2) и 9 (O_2) л/(с · см²) для чистых пленок титана;
- Снижение температуры увеличивает быстроту действия от 2 до 5 раз;
- Типичная температура сублимации титана составляет приблизительно 1550 °С;
- Скорости сублимации равна, приблизительно, 0,05 г/ч
- Ресурс - 1г

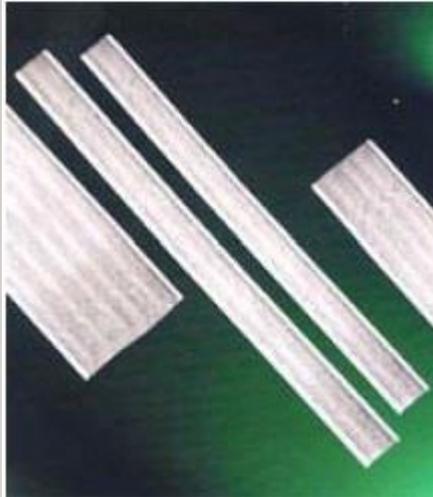


Filament Cartridge

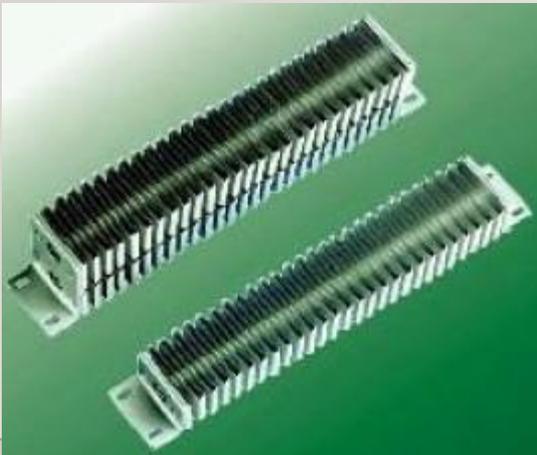


- Процесс откачки газов NEGом осуществляется с помощью химической реакции. Активные молекулы газа, падают на чистую металлическую поверхность сорбционного материала. Чистой металлической поверхностью считается поверхность, без окислов или карбидов, которые образуются, когда сорбционный материал подвергается воздействию воздуха при производстве или вскрытии на атмосферу

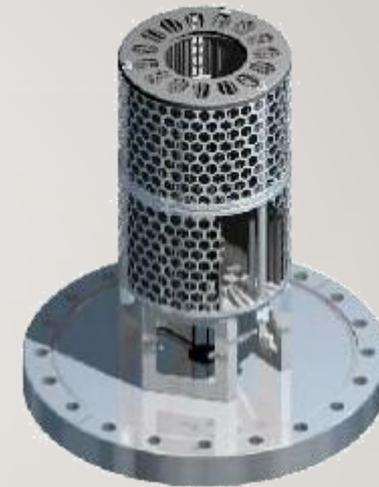




St707 Полосы с геттером
толщиной γ около
70 мкм с каждой
стороны полосы



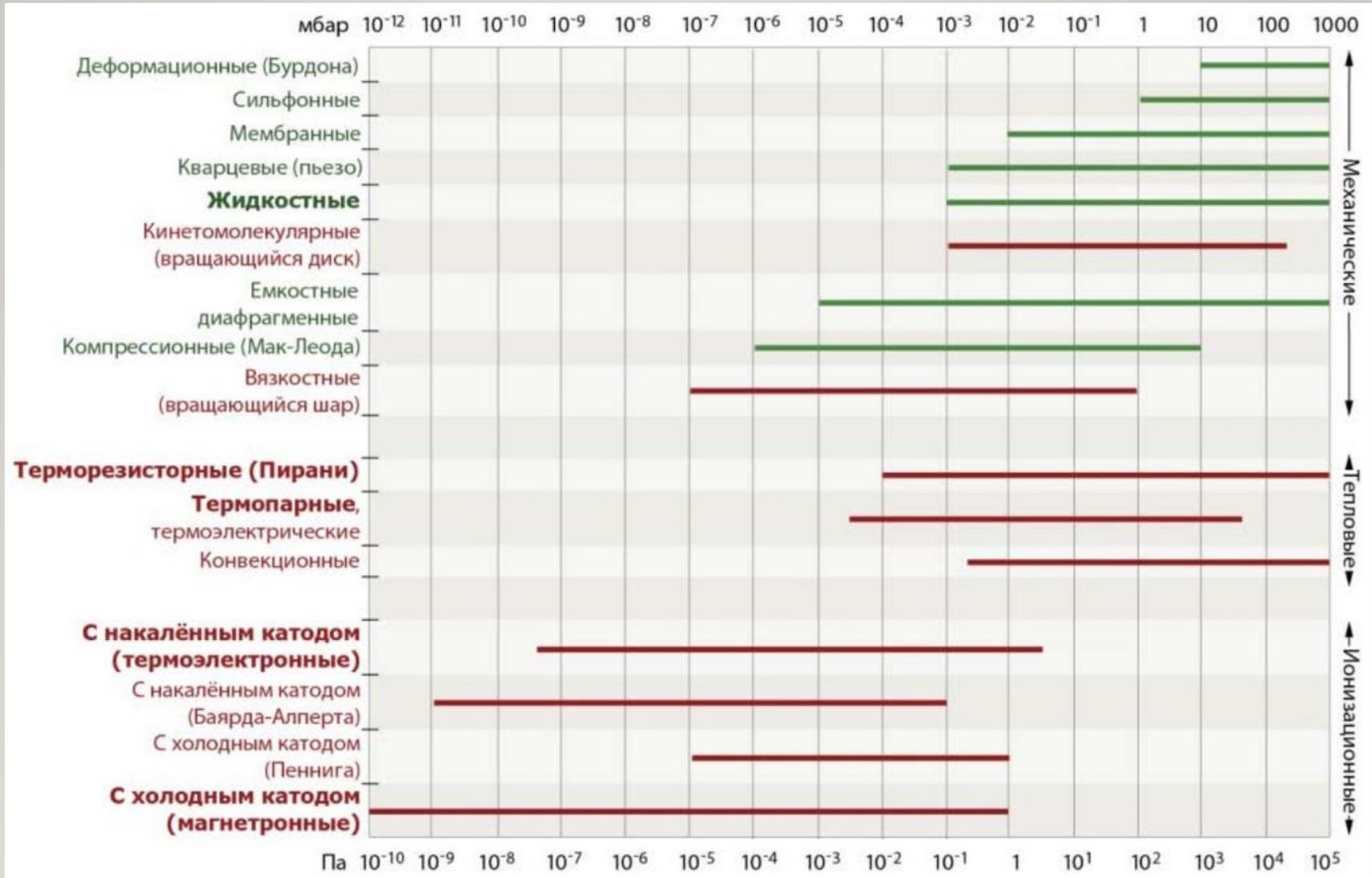
Геттерные
модули
(предназначе
нные для
максимиза
ции откачки
водорода.



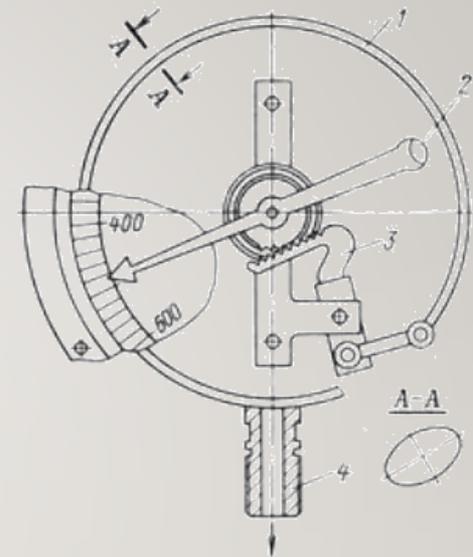
Насосы-катриджи
смонтированные на CF
фланцах

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВАКУУМА

- Манометры – общее название приборов, предназначенные для измерения давления.
- Вакуумметры - манометры, предназначенные для измерения давления ниже атмосферного.
- Различают вакуумметры прямого действия и косвенного действия
- **Вакуумметры прямого действия** - измерение непосредственно давление, как отношение силы к площади
 - Жидкостные
 - Деформационные
 - Грузопоршневые
- **Вакуумметры косвенного действия** – основаны на использовании зависимости некоторых физических процессов от давления. Эти приборы измеряют параметры, связанные с давлением определенной функциональной зависимостью. Их показания зависят от рода газа. Диапазон измерений и вид градуировочной характеристики устанавливают по результатам градуировки для определенного газа.
 - Тепловые
 - Ионизационные
 - Вязкостные



- Давление определяется по деформации упругого элемента под действием разности давлений
- Чувствительный элемент – тонкостенная металлическая или кварцевая трубка круглого или прямоугольного сечения, свернутая в спираль.
- Деформация трубки приводит к движению стрелки, которая связана с концом системой передач.
- Диапазон измерения от 10^2 до 10^5 Па при точности 1% и времени запаздывания 0.2 с.
- Используется при высоких температурах



Деформационный вакуумметр с С-образной трубкой Бурдона:

- 1 — труба эллиптического сечения;
- 2 — стрелка;
- 3 — зубчатый сектор;
- 4 — соединительный штуцер

- Вакуумметры косвенного действия - измерение параметров (ионного тока, резистивного тока, вязкости), связанные с давлением определенной функциональной зависимостью.
- Состоят из преобразователя давления (датчика), герметично присоединенного к вакуумной камере и измерительного блока
- Зависимость от рода газа



- Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.
- Преобразователь теплового вакуумметра - баллон, внутри которого расположен нагреваемый электрическим током чувствительный элемент (обычно - металлическая нить).
- Температура нити накала зависит от тепловых потерь в результате теплопроводности газа, которые тем больше, чем выше давление.
- Измерения температуры нити или мощности, необходимой для поддержания этой температуры постоянной, позволяют определить давление.
- В стационарном состоянии при установившейся температуре нити имеет место баланс мощностей:

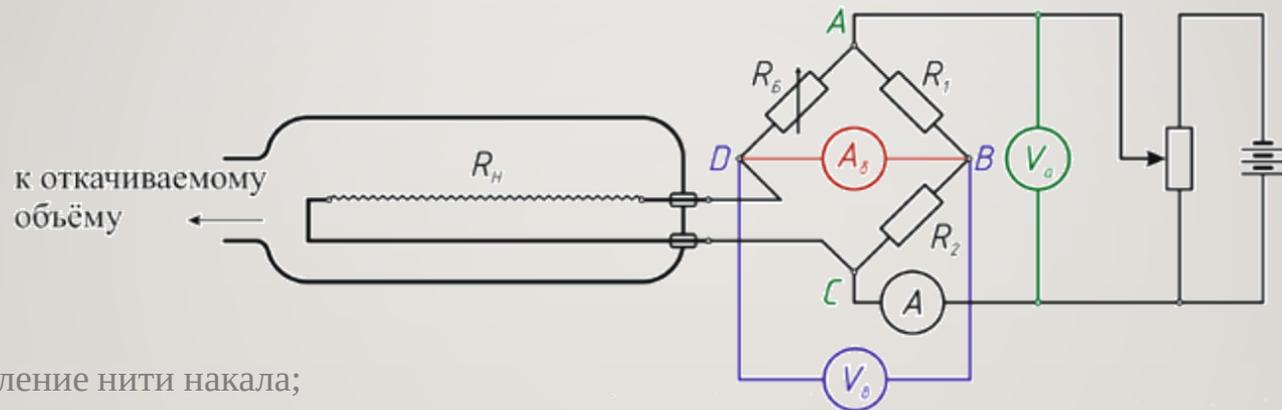
$$Q_{эл} = Q_k + Q_m + Q_l$$

- $Q_{эл}$ -электрическая мощность, подведённая к нити
- Q_k — мощность теплоотвода по конструктивным элементам манометра;
- Q_m — мощность, отводимая от нити соударяющимися с ней молекулами;
- Q_l — мощность, отводимая излучением.

- Поскольку с ростом давления коэффициент теплопроводности газа увеличивается, то и увеличиваются Q_m и температура нити.
- При постоянной электрической мощности, подведённой к нити $Q_{эл}$, температура нити зависит от давления.

Терморезистивный датчик

- Температуру нити определяется путем измерения ее сопротивления
- Рабочий диапазон: от 10^{-2} до 10^4 Па;
- Три режима работы: 1 – поддержка постоянного сопротивления (температуры) нити; 2 – поддержка постоянного напряжения на клеммах А,С; 3 – поддержка постоянного тока через мост



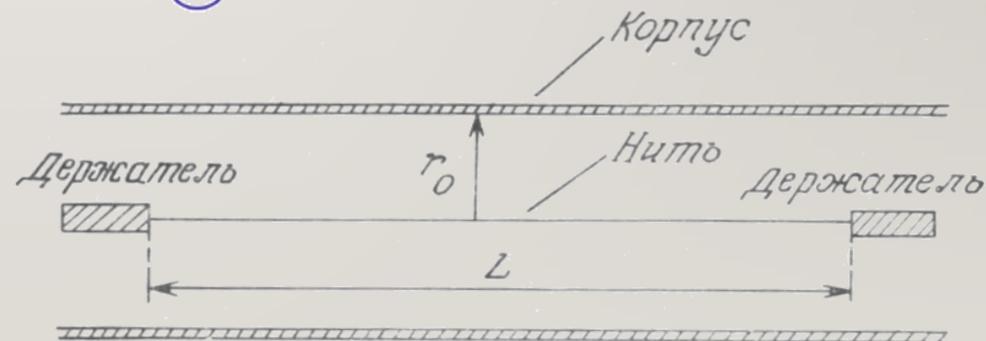
R_H —сопротивление нити накала;

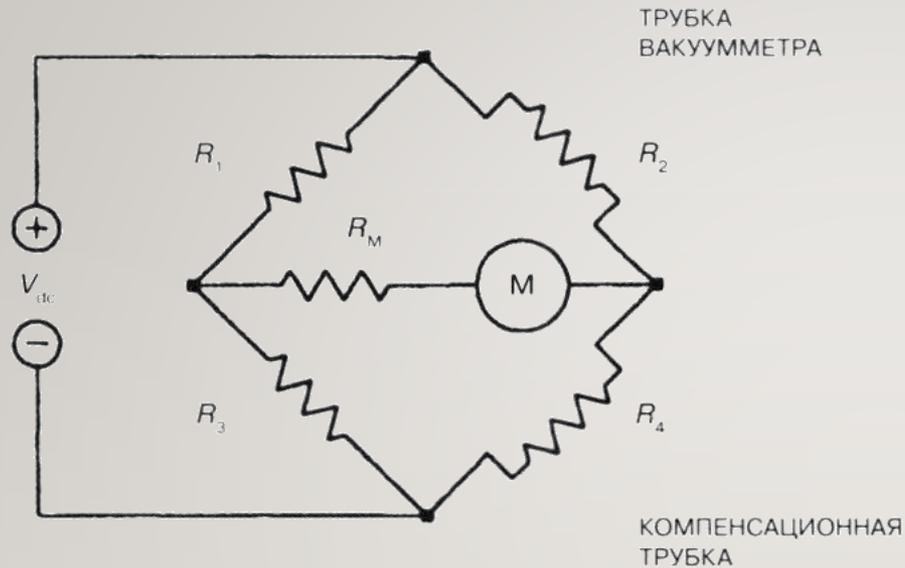
R_B —сопротивление балансировки;

V_a и A_δ — вольтметр и амперметр для измерения напряжения на клеммах А, С и D, В в режиме (1);

A — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (2);

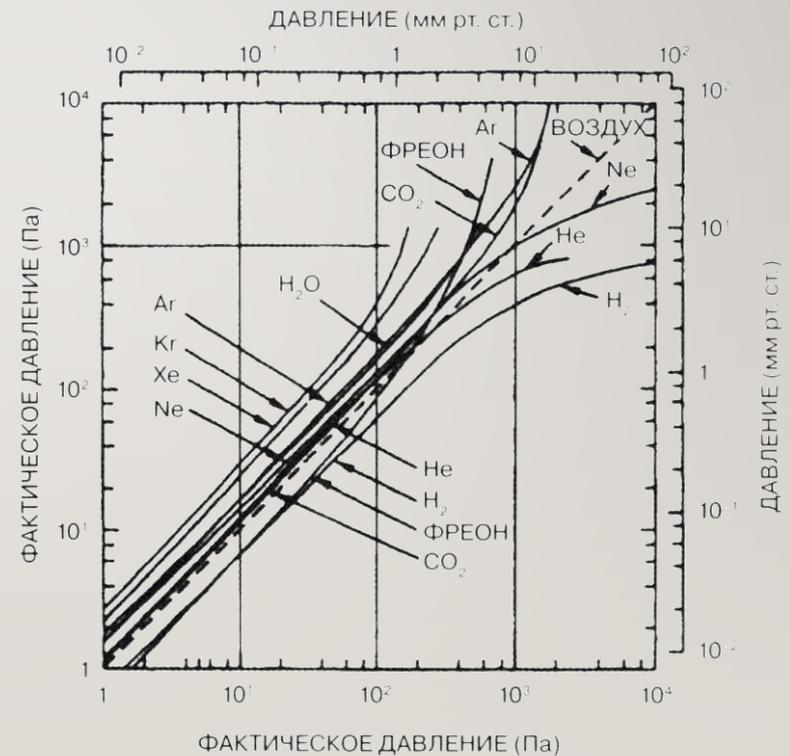
V_b — вольтметр для измерения напряжения на клеммах В, D в режиме (3)





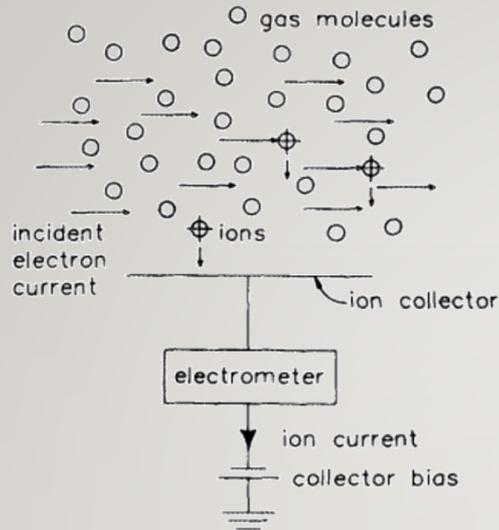
- Мост Уитстона с измерительной нитью в качестве одного плеча и со сравнительной нитью в качестве другого плеча
- Возможно работа в двух режимах:
 1. Постоянная температура
 2. Постоянное напряжение

- Усовершенствованные терморезистивные преобразователи со сравнительной нитью для снижения влияния температуры окружающей среды и увеличения скорости реакции датчика.



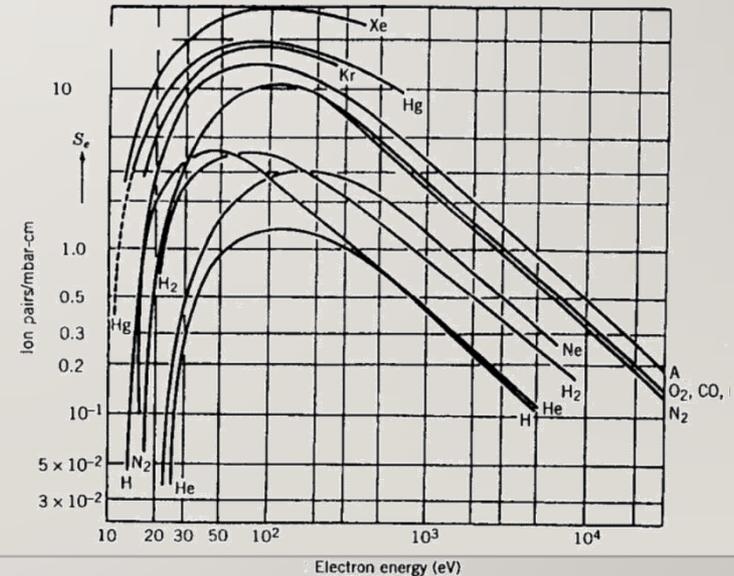
- Калибровочные кривые для различных газов

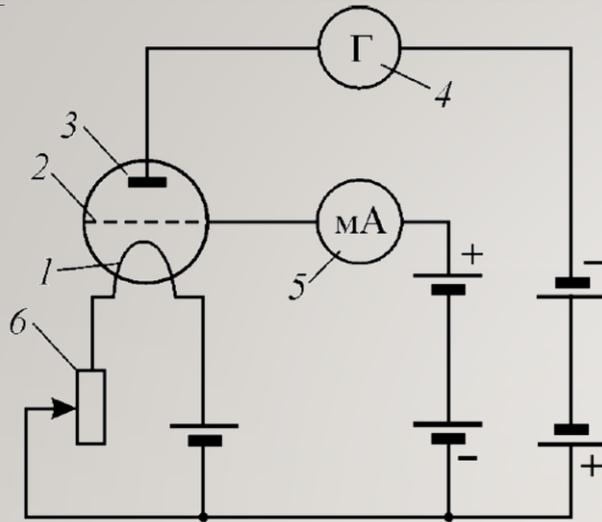
- При давлении менее 10^{-3} Па прямое измерение давления весьма затруднено;
- Тепловые датчики в этом диапазоне достигают своего рабочего предела и выходят на плато (теплопередача определяется излучением);
- Основным способом измерения в диапазонах от 10^{-3} до 10^{-10} Па я- ионизационный метод измерения
- Принцип их действия основан на ионизации молекул газов электронами, эмитированными катодом, и измерении ионного тока, величина которого зависит от давления газа.
- Существуют два основных типа преобразователей:
 - Электронные ионизационные (с горячим катодом), в которых ионизация газа осуществляется ускоренными электронами
 - Магнитные электроразрядные (с холодным катодом) – в которых ионизация газа осуществляется при электрическом разряде в магнитном поле (датчик Пеннинга).



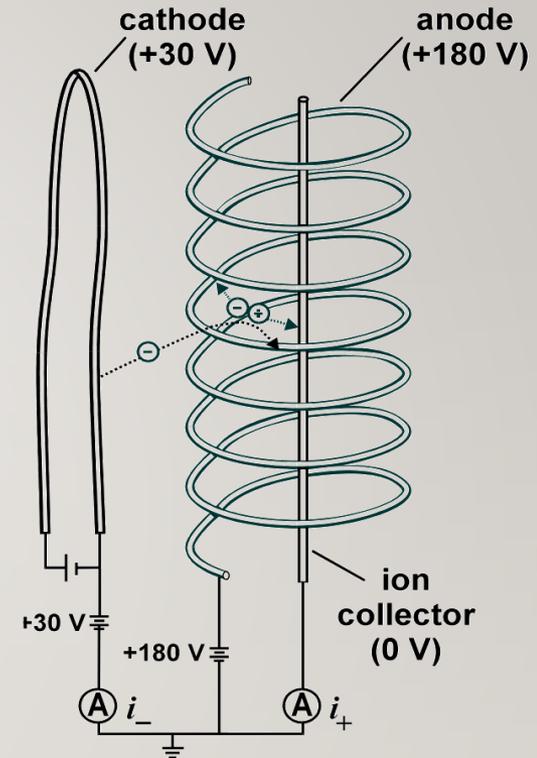
- Для большинства газов пиковая скорость ионизации достигается при 50 ~ 200 эВ.
- Для приборов с «горячим» катодом электроны испускаются в результате термоэлектронной эмиссии и ускоряются электрическим полем.
- Для датчиков с «холодным» катодом электроны «вытягиваются» из тела катода необходимой разностью потенциалов, затем захватываются и ускоряются поперечным электро-магнитным полем

- Нейтральные частицы могут быть «ионизированы» посредством электронного удара
- Ионы, будучи положительно заряженными, могут управляться магнитным и электрическим полями
- Ионный ток обычно пропорционален плотности газа
- Вероятность ионизации зависит от типа молекулы и энергии сталкивающегося электрона.
- Ионные датчики зависят от рода газа





- Вольфрамовый катод при нагреве испускает электроны, которые под действием электрического поля ускоряются по направлению к аноду, создавая электрический ток.
- Анод выполнен в виде сетки или проволоки. Значительная часть электронов пролетает его насквозь, тормозится в электрическом поле, возвращается обратно и цикл повторяется до тех пор, пока электрон не столкнется либо с сеткой, либо с компонентами остаточного газа.
- Образующиеся положительные ионы ускоряются к коллектору ионов, создавая в его цепи ионный ток.



- Упрощенная схема включения ионизационного преобразователя:
 - 1 – катод;
 - 2 – анод (сетка);
 - 3 – коллектор ионов;
 - 4 – прибор для измерения ионного тока;
 - 5 – миллиамперметр;
 - 6 – реостат

- Для всех ионных датчиков ионный ток всегда состоит из значения, зависящего от давления и фонового тока (i_r), который не связан с давлением газа.

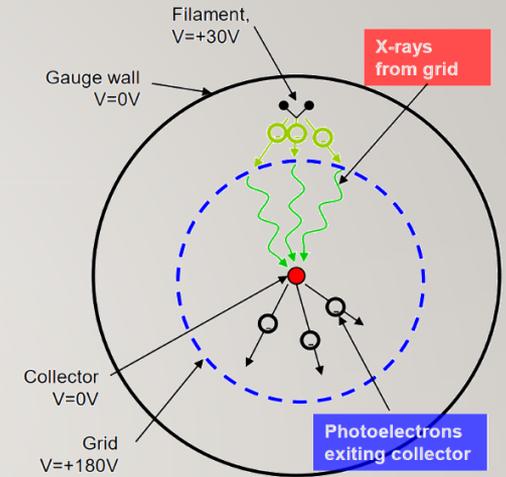
$$i_i = K \cdot i_e \cdot P + i_r$$

Мягкое рентгеновское излучение

- Некоторые электроны, испускаемые горячим катодом, сталкиваются с сеткой и индуцируют тормозное излучение в рентгеновском диапазоне
- Рентгеновское излучение воздействует на коллектор и вызывает эмиссию фотоэлектронов
- Выходящие фотоэлектроны = положительные ионы, поступающие на коллектор
- Фотоэлектронный ток добавляет ионный ток, создавая ошибку в показаниях давления
- Уменьшение толщины нити коллектора. В современных датчиках используется нить ионного коллектора с минимальной толщиной, что позволяет снизить предел измерения до 10^{-9} Па

Электронно-стимулированная десорбция

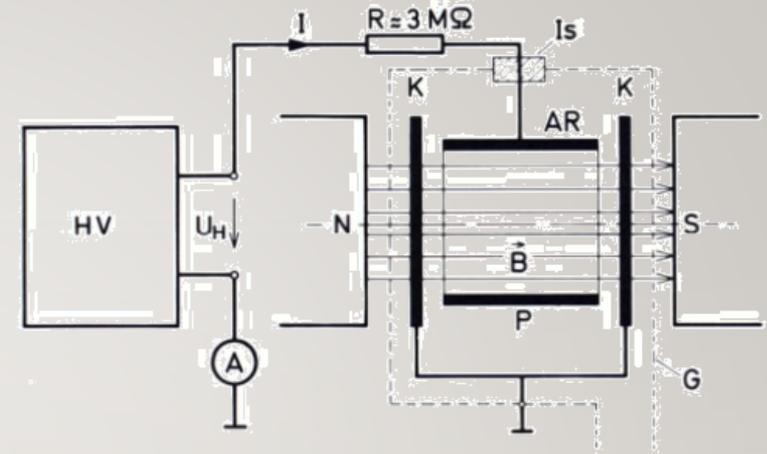
- Молекулы газа адсорбируются на поверхности сетки.
- Электроны, испускаемые с катода, ударяются о решетку и десорбируют молекулы газа.
- Электроны ионизируют часть молекулы газа в сетке, когда они десорбируются.
- Дополнительные молекулы газа и положительные ионы способствуют увеличению показаний манометрического давления
- Обезгаживание поверхностей



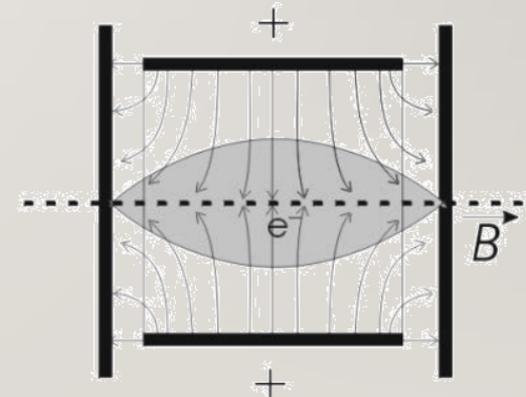
Термодесорбция газа с поверхностей

- Горячая нить нагревает соседние поверхности;
- В результате нагрева газ десорбируется со стенок и попадает в зону ионизации;
- Обезгаживание поверхностей
- Размещение датчика таким образом, чтобы соседние стенки испытывали минимальное влияние теплового излучения от катода.

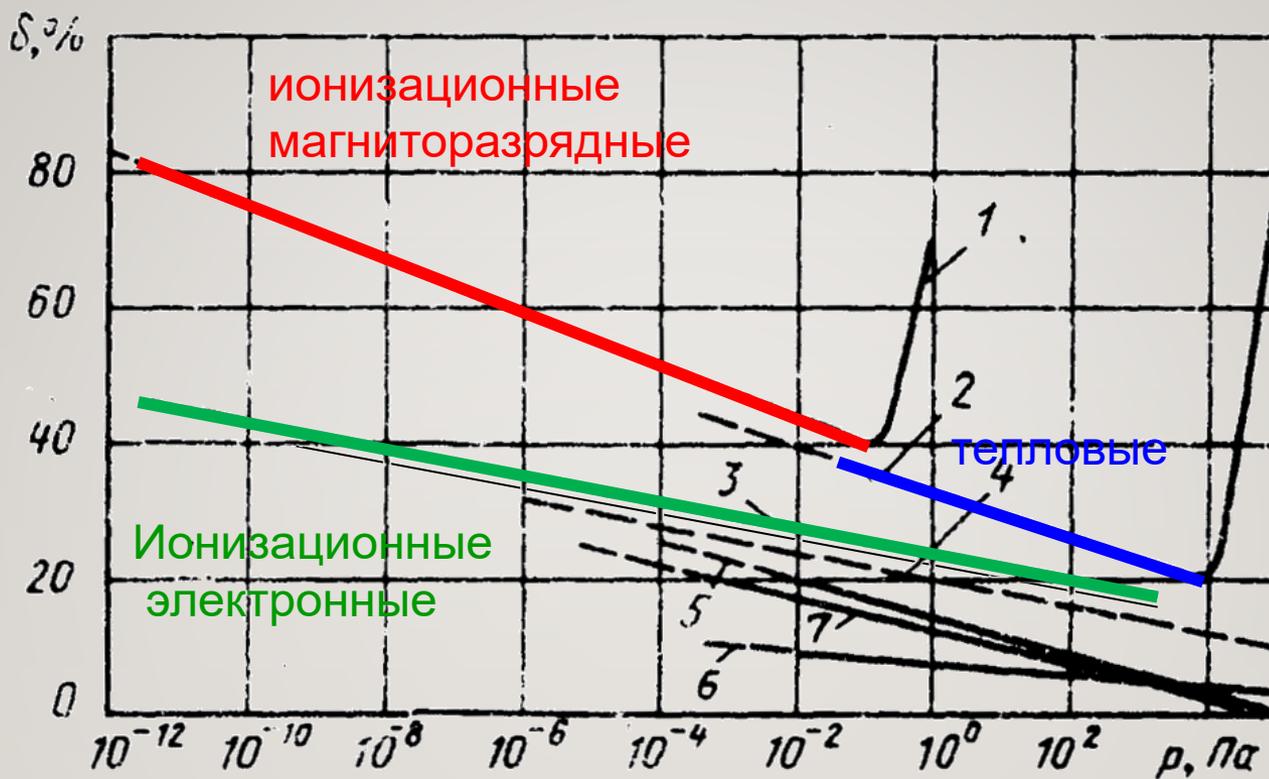
- При высоком напряжении между парой электродов в вакууме происходит разряд.
- Ток разряда зависит от давления (нелинейно). Однако устойчивый разряд прекращается при давлении около 1 Па.
- В датчиках с холодным катодом перпендикулярно к электрическому полю добавляется магнитное поле (таким образом создается кросс-поле).
- Электроны попадают в «ловушку» кросс-поля и, двигаясь циклически, приобретают достаточную для ионизации энергию.
- Датчики с холодным катодом зависят от рода газа также, как и датчики с горячим катодом.
- При низком давлении ($<10^{-2}$ Па) плотность ионов значительно ниже, чем плотность электронов в облаке. В осевой зоне ячейки создается стабильное электронное облако.
- При высоком давлении высокая плотность ионов вызывает дестабилизацию электронного облака, приводящая к колебаниям плазмы или разрядам.
- Ионный ток связан с давлением как: $i_g = K \cdot P^n \quad n = 1.0 \sim 1.4$



AR – анодное кольцо;
 К – катодное кольцо;
 G – объем датчика

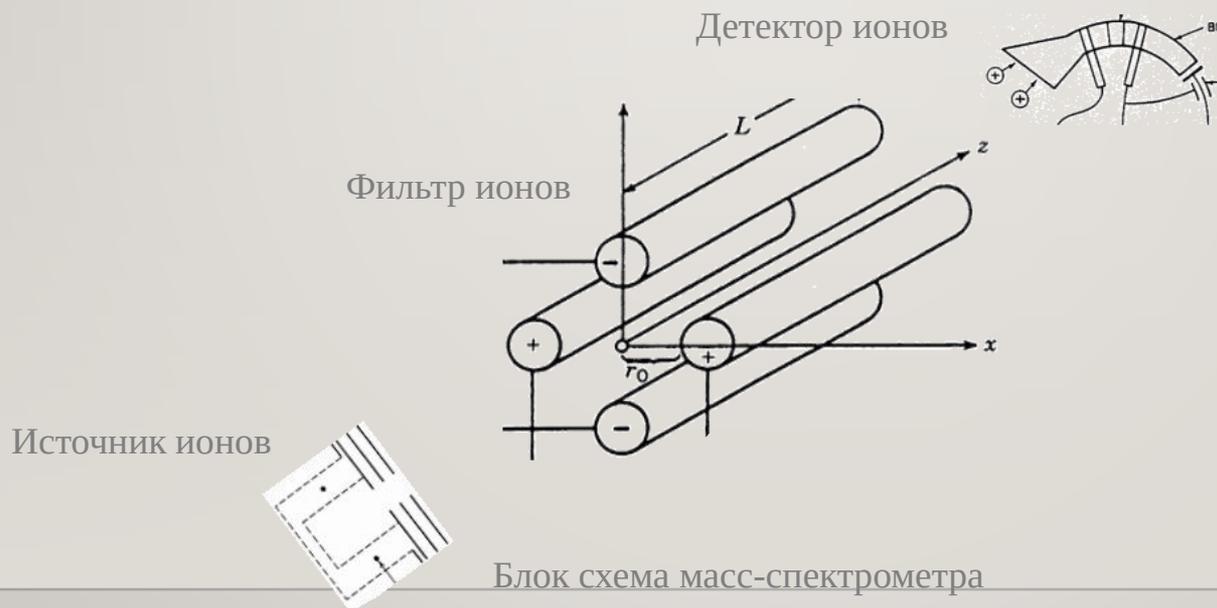


Ячейка Пеннинга

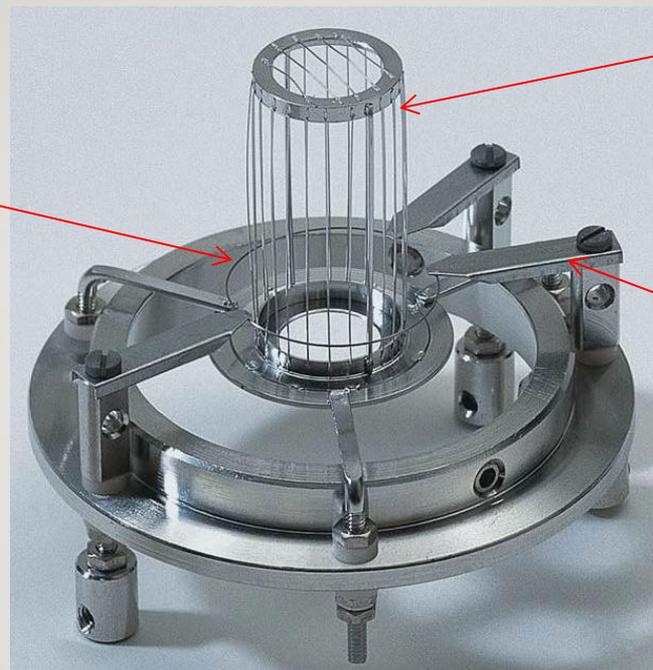


- 1 – ионизационные магнитные электроразрядные
- 2 – тепловые
- 3 – ионизационные электронные
- 4 – вязкостные
- 5 – деформационные
- 6 – жидкостные

- Все датчики, которые обсуждались ранее, измеряют общее давление или плотность газа, информация о составе газа отсутствует.
- Для измерения состава остаточного газа используют приборы, называемы массовыми анализаторами.
- Анализаторы остаточных газов обычно включаются в вакуумную систему в качестве вакуумного диагностического прибора.
- В большинстве случаев качественного масс-спектрального анализа достаточно для измерения как полного, так и парциального давления газов;
- Масс-спектрометр измеряет относительные сигналы как отношение массы к заряду (m/e). Измерения представляются в единицах а.е.м (атомная единица массы). ($\text{а.е.м} = 1/12 \text{ }^{12}\text{C}$)



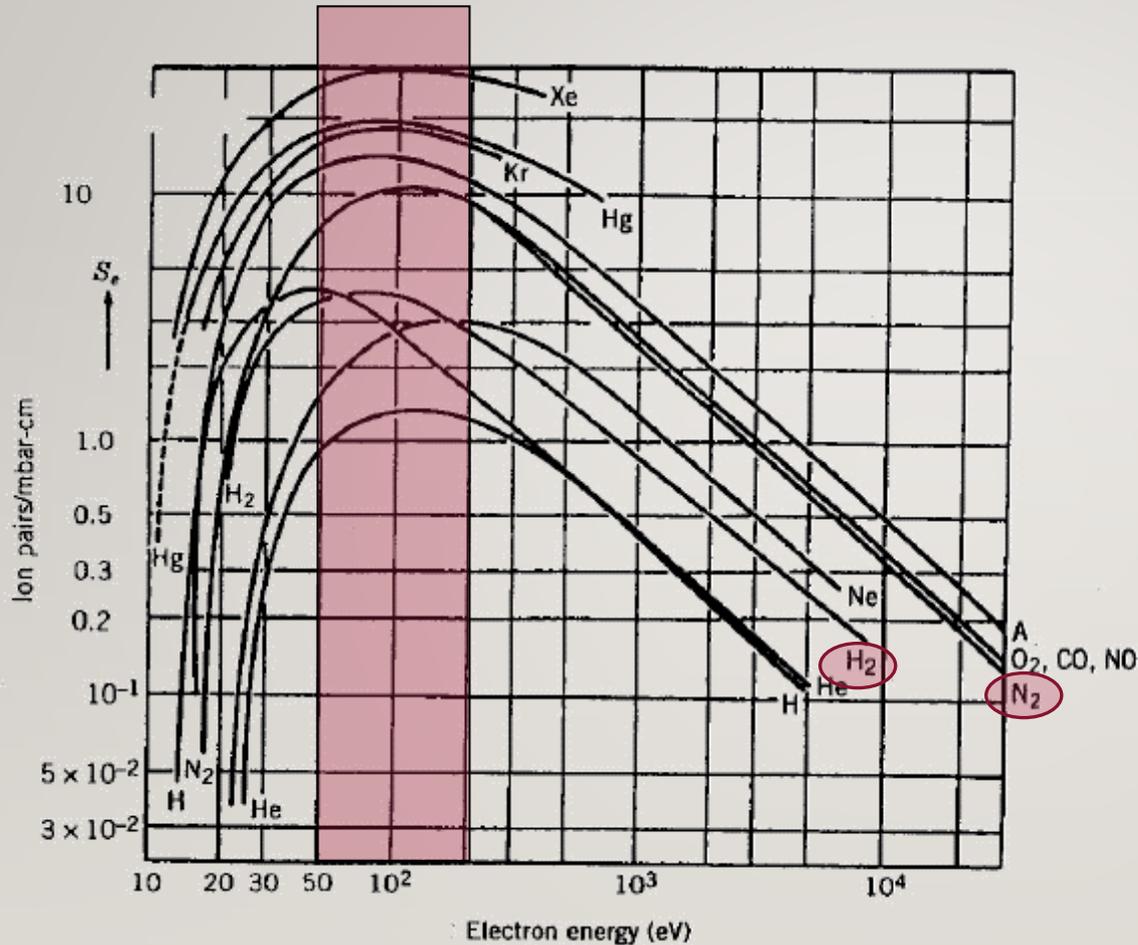
Две вольфрамовые
нити



Pt-Ir сетка

Молибденовые
держатели

Количество ионов, образующихся в сетке, пропорционально плотности газа и току электронов. Но при сильном электронном токе может возникнуть пространственный заряд. В этом случае положительные ионы могут быть захвачены в сетке и их скорость рождения может уменьшиться. Обычно работают с токами 1 или 2 мА.



- Максимум сечения ионизации находится в диапазоне от 50 до 200 эВ энергии электронов
- Как правило, в масс-спектрометрах энергия электронов установлена на уровне 70 эВ.
- При ионизации происходит фрагментация:
 - $\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO}_2^+ + 2e$
 - $\rightarrow \text{CO}^+ + \text{O} + 2e$
 - $\rightarrow \text{C}^+ + \text{O}_2 + 2e$
 - $\rightarrow \text{O}^+ + \text{CO} + 2e$
 - $\rightarrow \text{CO}_2^{++} + 3e$
 - $\rightarrow \text{CO}^{++} + \text{O} + 3e$
 - \rightarrow и тд.

Два основных типа:

- Магнитно-секторный

Используется обычно в течеискателях и в больших аналитических масс-спектрометрах

- Квадрупольный

Общепромышленное и лабораторное применение

$$R = \frac{144}{H} \sqrt{MU}$$

R - радиус траектории движения иона, см;

H - напряженность магнитного поля, Э;

U - ускоряющая ионы разность потенциалов, В;

M - эффективная масса иона, равная отношению его массового числа к числу зарядов;

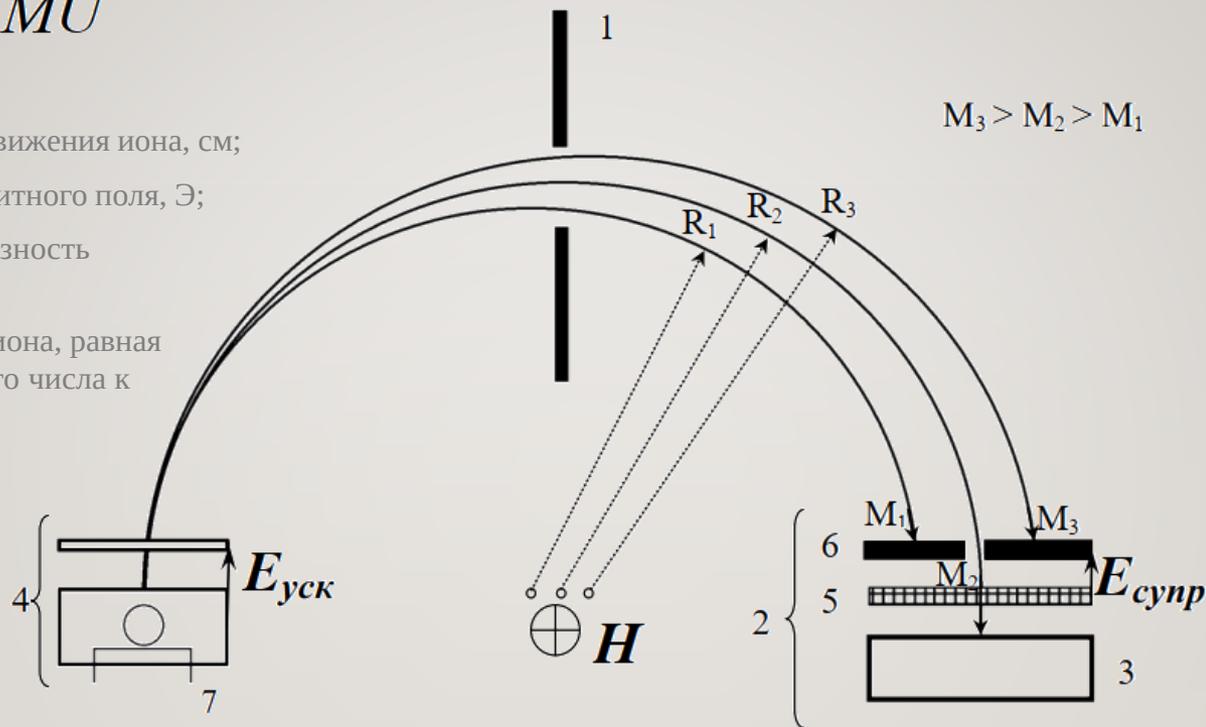
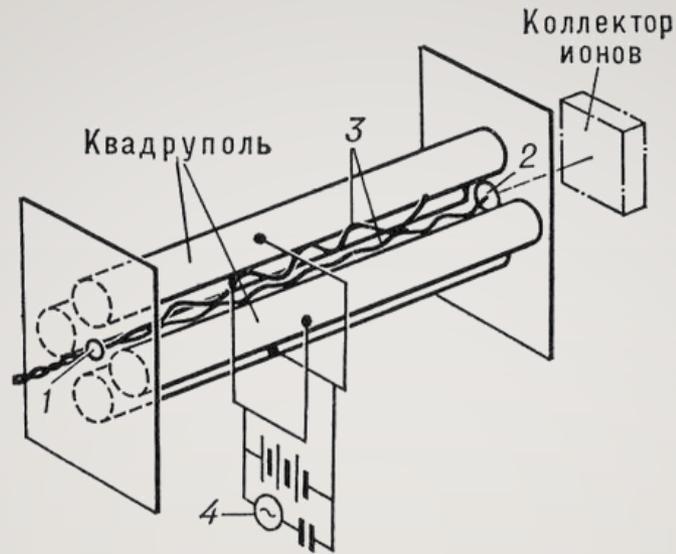


Схема масс-спектрометрической камеры.

Показаны траектории ионов различной эффективной массы ($M_3 > M_2 > M_1$). 1 - диафрагма; 2 - приемник ионов; 3 - коллектор; 4 - источник ионов; 5 - супрессорная сетка коллектора ионов; 6 - входная диафрагма коллектора ионов; 7 - катод



- 1 и 2 — входное и выходное отверстия анализатора;
- 3 — траектории ионов;
- 4 — генератор высокочастотного напряжения.

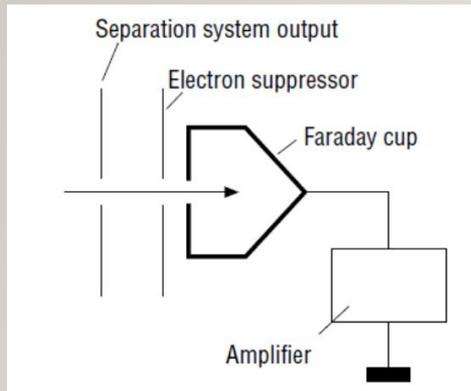
Высокочастотное (несколько мегагерц) переменное и постоянное электрическое напряжение вида:

$$U = V + U_0 \cos \omega t,$$

подаваемое на систему четырех электродов, вынуждает ионы совершать колебательное движение в такт с частотой этого поля. При определенных U_0 , V , ω во входное отверстие масс-анализатора будут проходить ионы только с определенной массой. Все ионы с отличными массами будут двигаться с нарастающими амплитудами колебаний, что приводит к их нейтрализации на стенках электродов. Путем изменения амплитуды U_0 или ω масс-анализатор настраивают на регистрацию ионов требуемой массы.

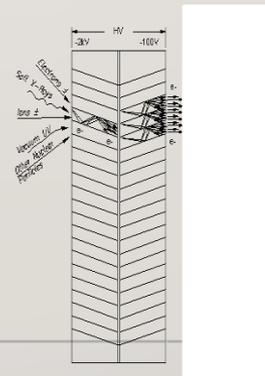
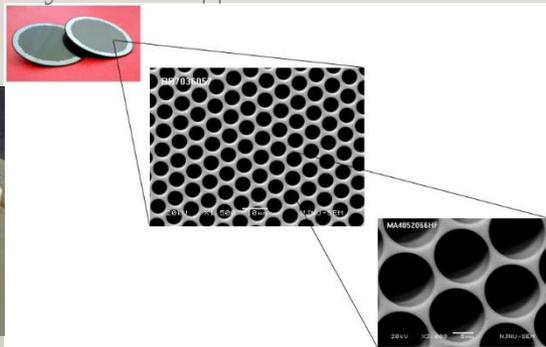
Чаша Фарадея

- Используется в высоком вакууме (10^{-3} до 10^{-7} Па)



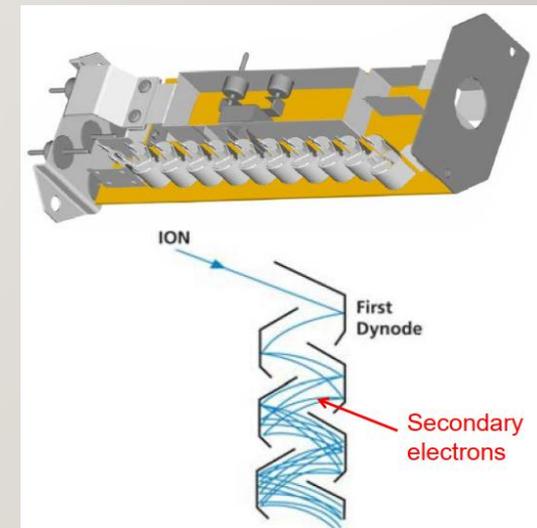
Умножитель на мультиканальных пластинах

- Одна микроканальная пластина имеет коэффициент усиления от 10^3 до 10^4 ;
- Для повышения коэффициента усиления используют пару МКП. Таким образом можно добиться усиления до $10^6 \dots 10^8$

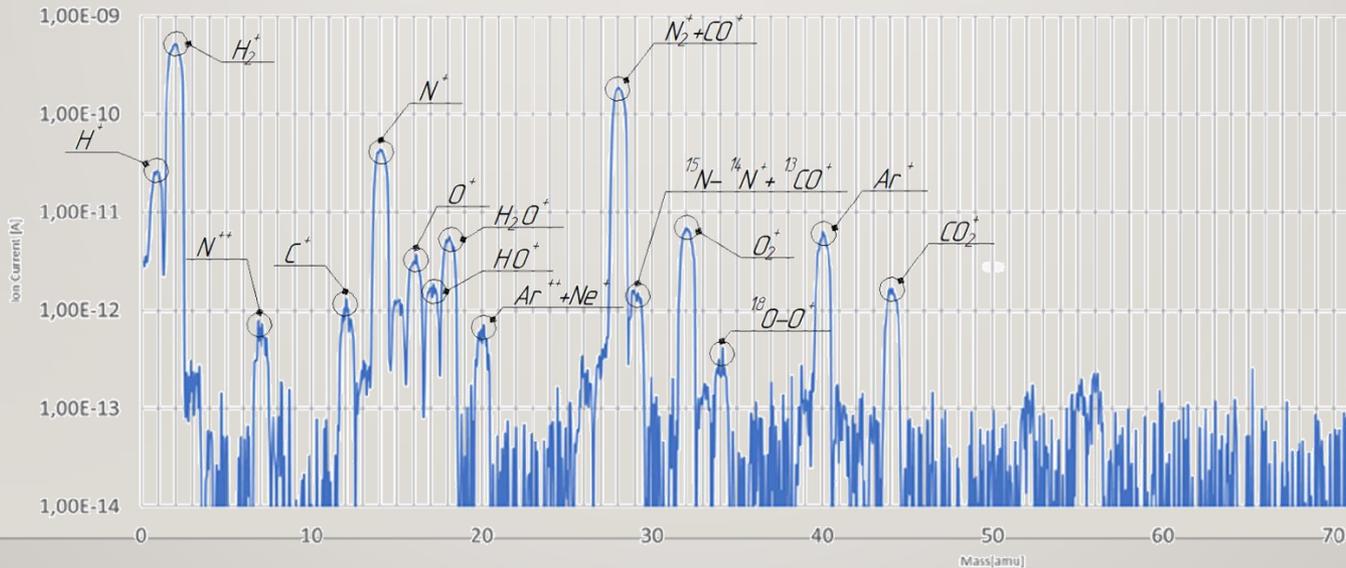
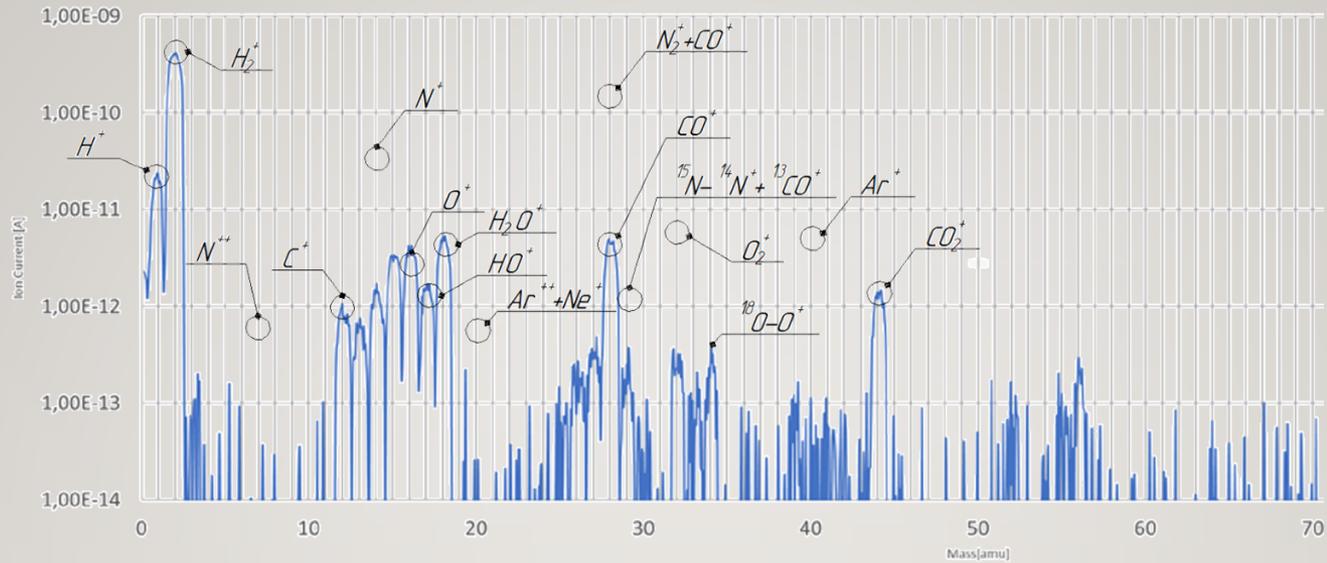


Электронный умножитель

- При работе в диапазоне сверхвысокого вакуума ионный ток становится слишком низким, чтобы его можно было измерить непосредственно чашей Фарадея.
- Используются покрытия с высоким выходом вторичных электронов.
- Для достижения высокого коэффициента усиления используются несколько ступеней.
- Коэффициент усиления от 10^5 до 10^8



ПРИМЕР МАССОВОГО СПЕКТРА



ПОСТРОЕНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ



Откачка от атмосферы 10^5 Па до давления 10^{-1} Па.

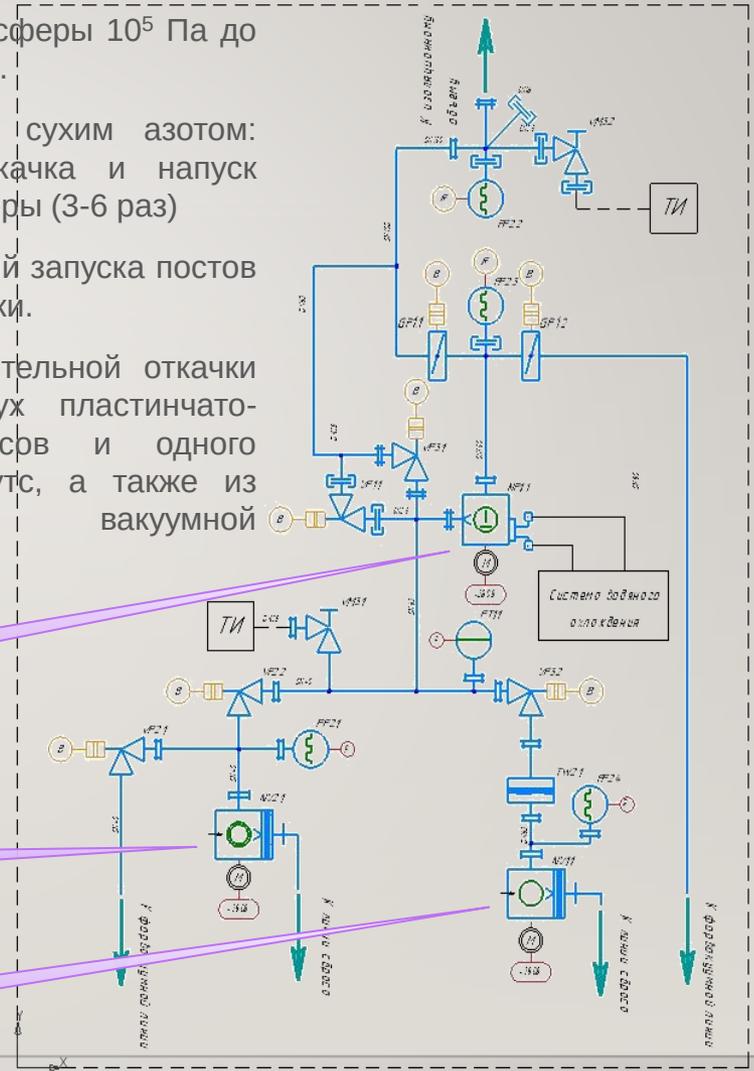
Промывка/сушка сухим азотом: циклическая откачка и напуск азотной атмосферы (3-6 раз)

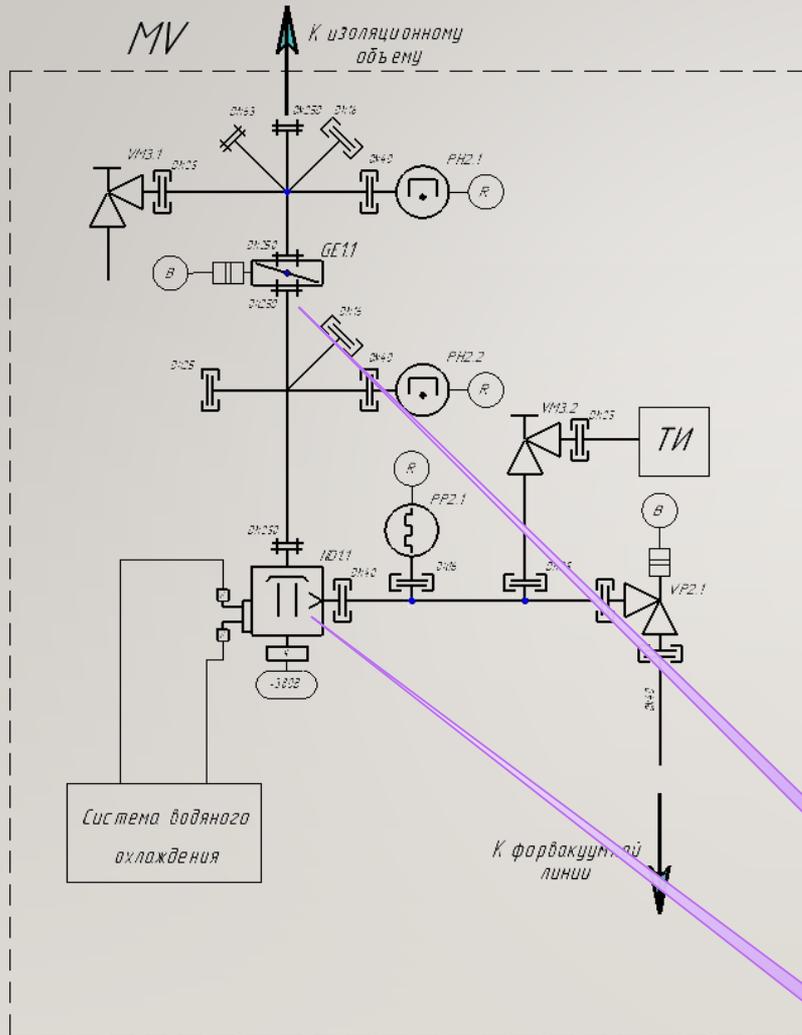
Создание условий запуска постов финишной откачки.

Посты предварительной откачки состоят из двух пластинчатороторных насосов и одного насоса типа Рутс, а также из управляющей арматуры.

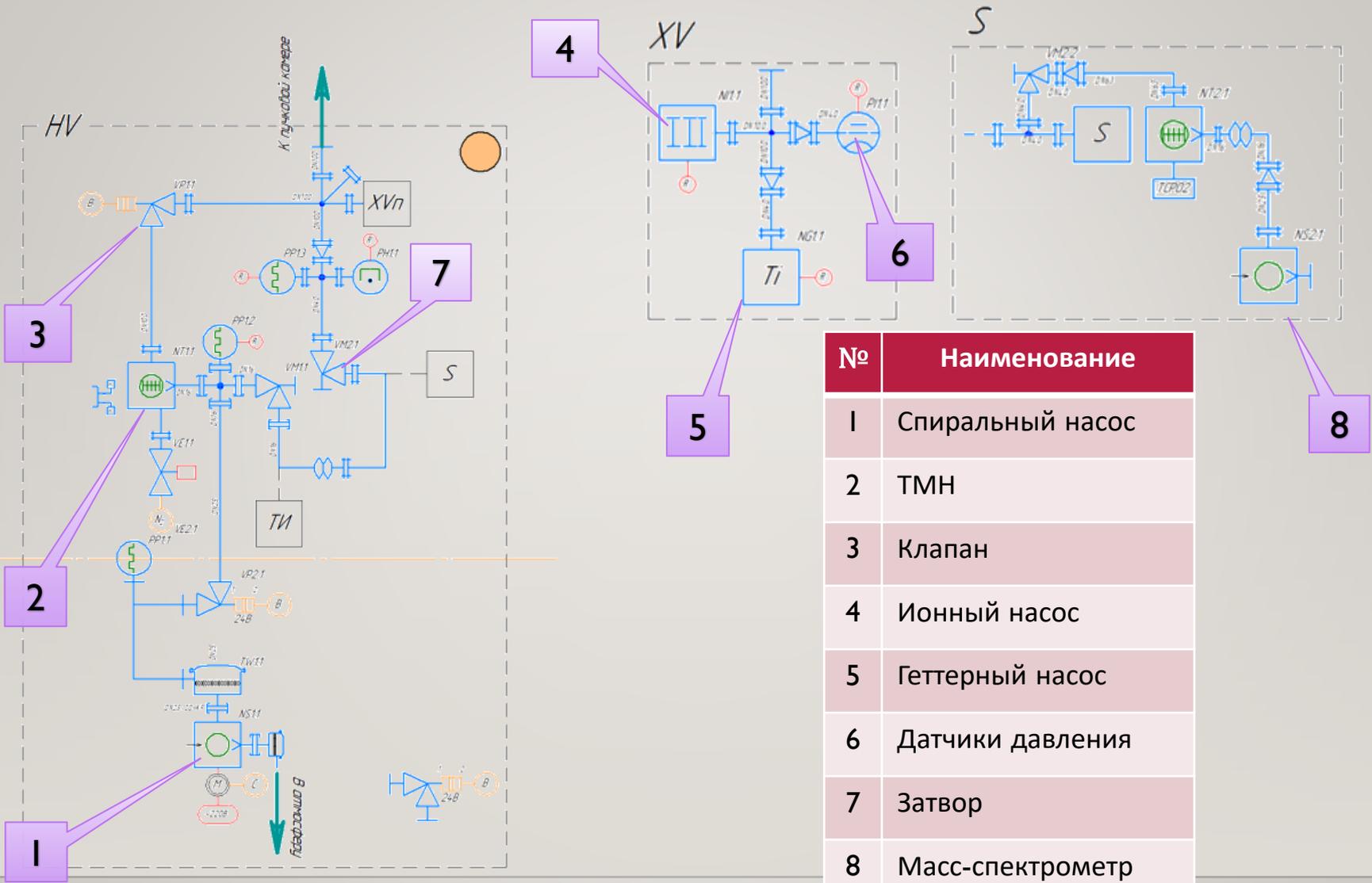
- 3
- 2
- 1

LV

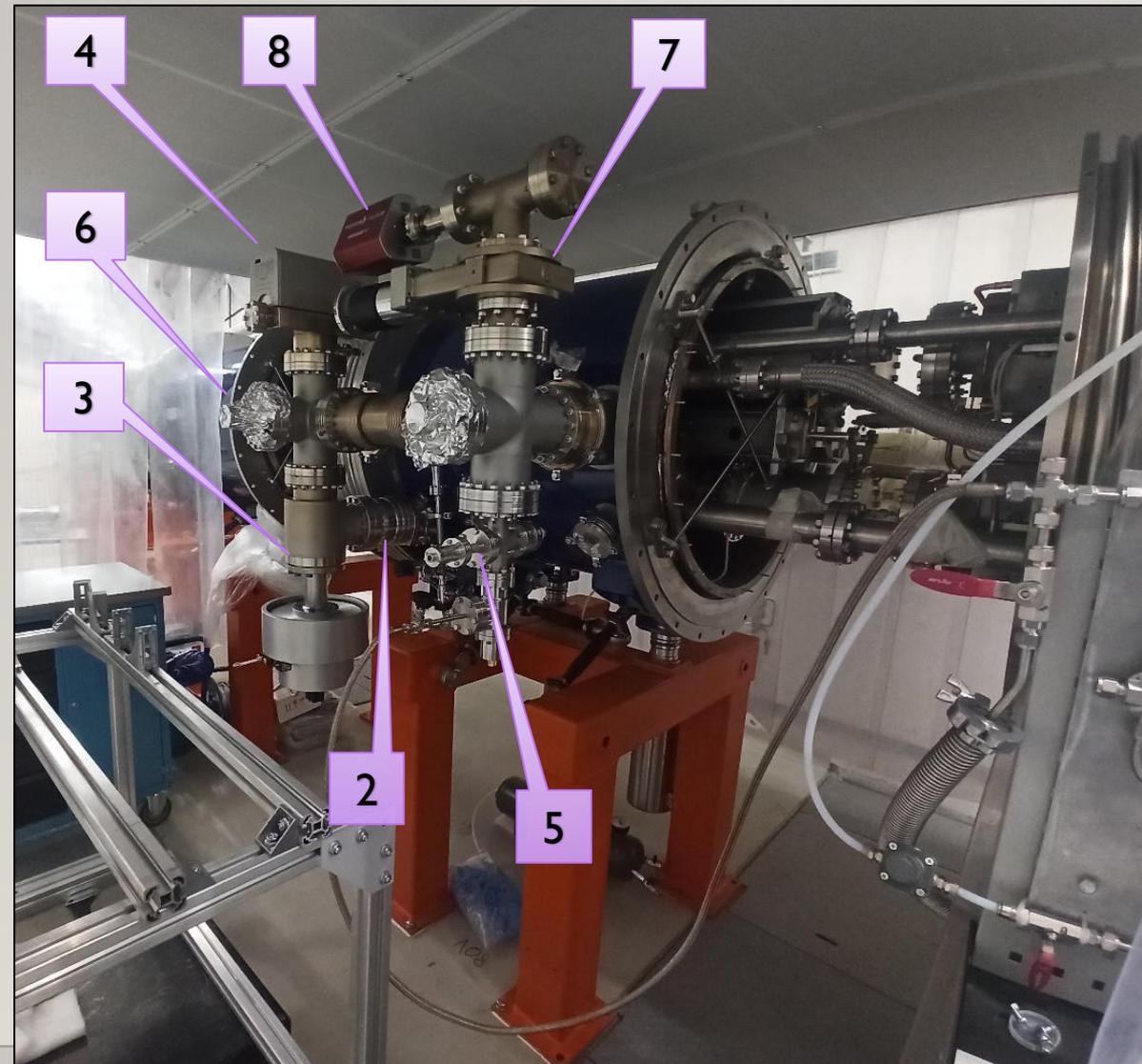




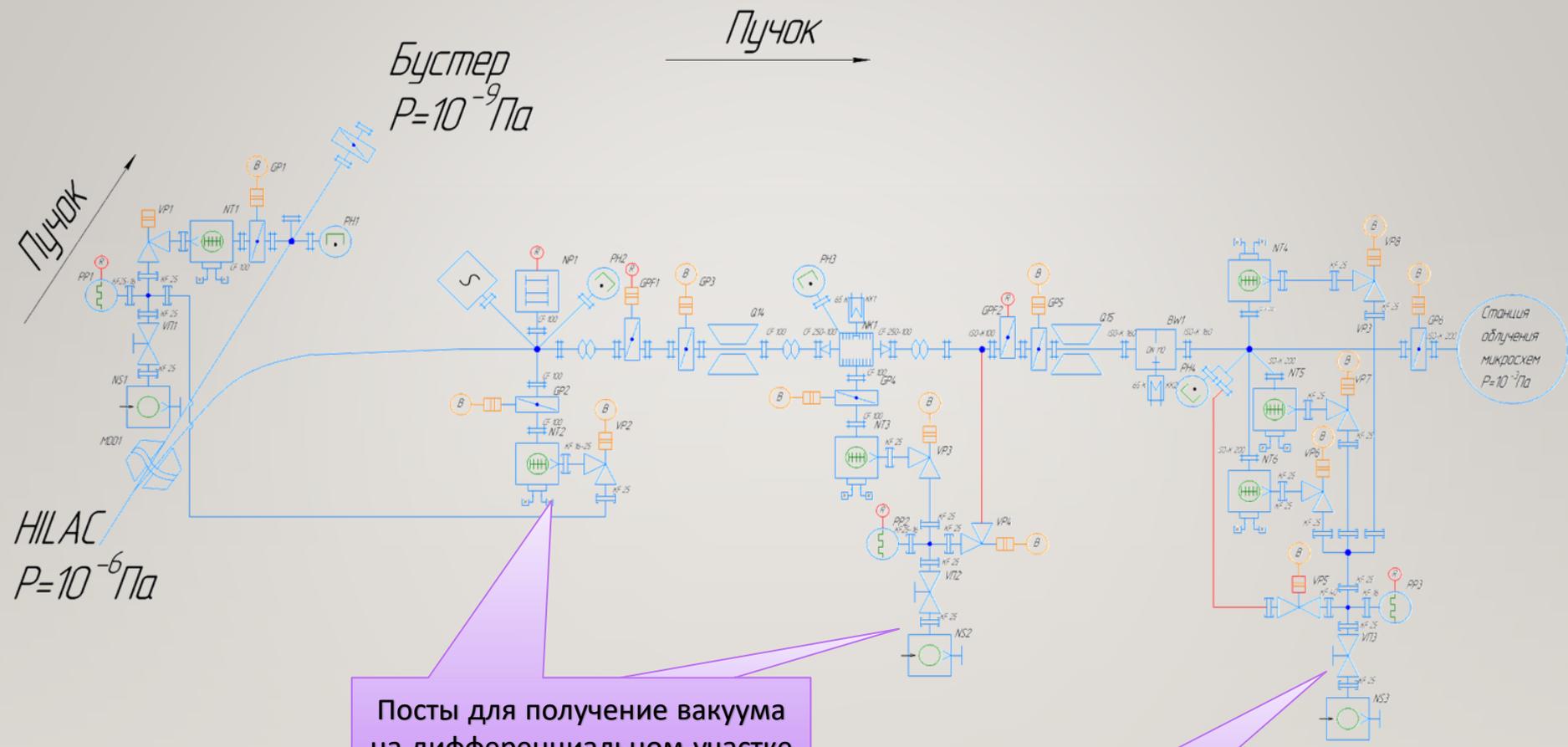
- 3
- I
- I

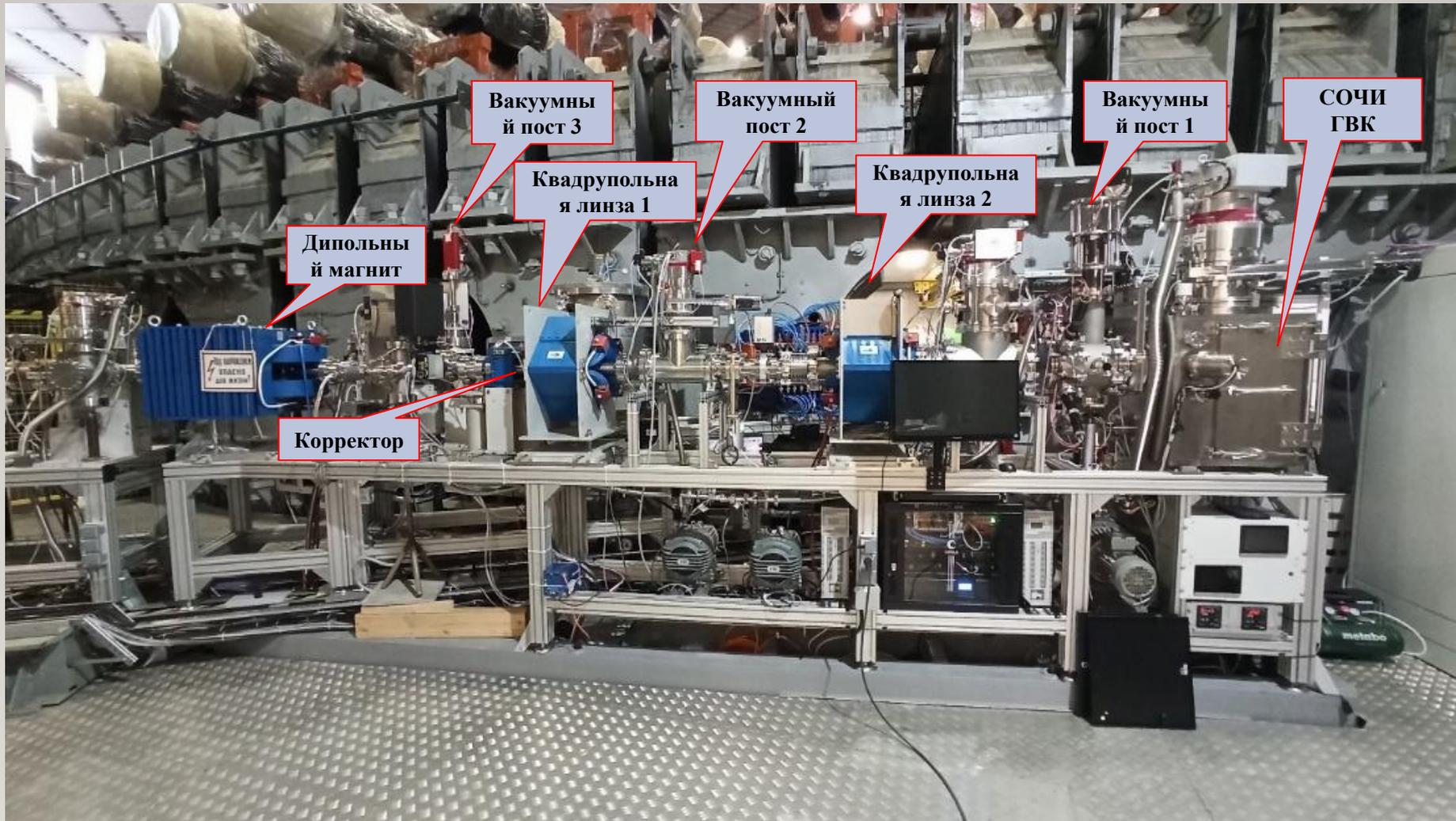


| № | Наименование |
|---|------------------|
| 1 | Спиральный насос |
| 2 | ТМН |
| 3 | Клапан |
| 4 | Ионный насос |
| 5 | Геттерный насос |
| 6 | Датчики давления |
| 7 | Затвор |
| 8 | Масс-спектрометр |



| № | Наименование |
|---|------------------|
| 1 | Спиральный насос |
| 2 | ТМН |
| 3 | Клапан |
| 4 | Ионный насос |
| 5 | Геттерный насос |
| 6 | Датчики давления |
| 7 | Затвор |
| 8 | Масс-спектрометр |





Пучок →

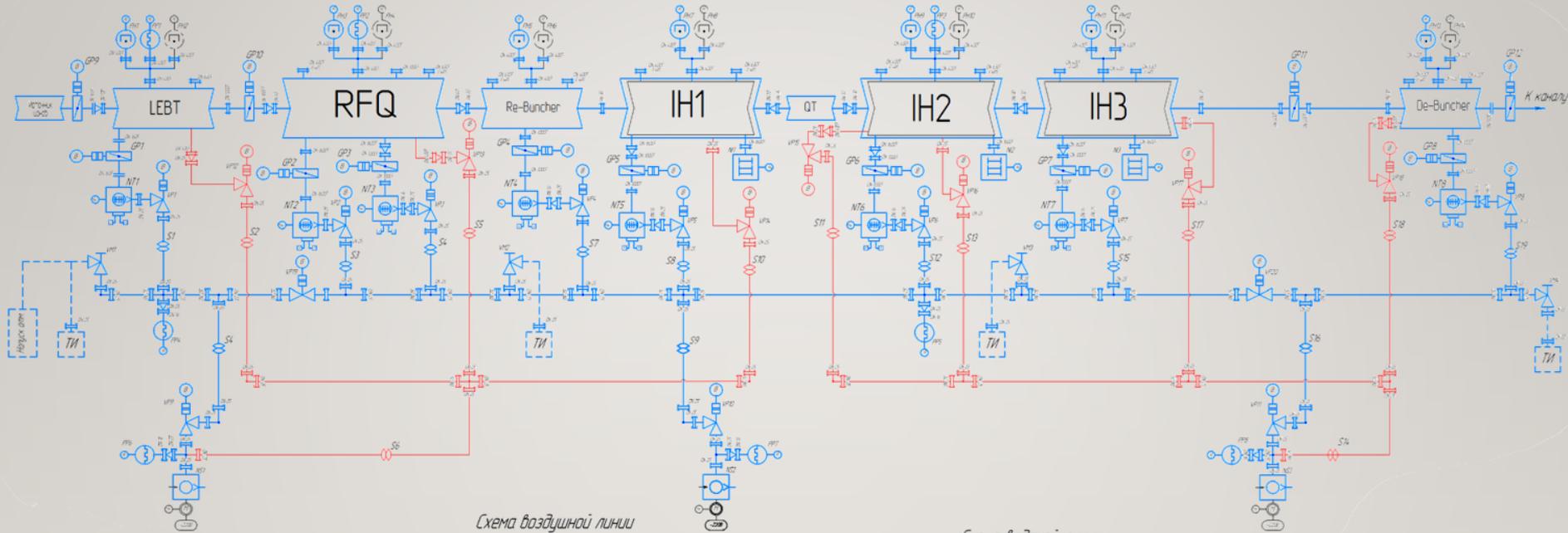


Схема воздушной линии

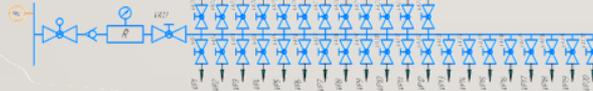


Схема водяной линии



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ГЕРМЕТИЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

- Уплотнение – средство предотвращения натекания через соединение



- Вакуумное соединение не может быть идеально герметичным
- Существуют соединения, герметичность которых выше чувствительности прибора, которые измеряется эта герметичности
- Максимальная величина натекания, допускаемая в каждом отдельно случае, определяется предельным разрежением, которое должно быть достигнуто в вакуумном объеме, с учетом скорости удаления газа из объема
- Допустимая скорость натекания для динамической вакуумной системы
- Допустимая скорость натекания для статической вакуумной системы

- Передача тока



- Передача движения



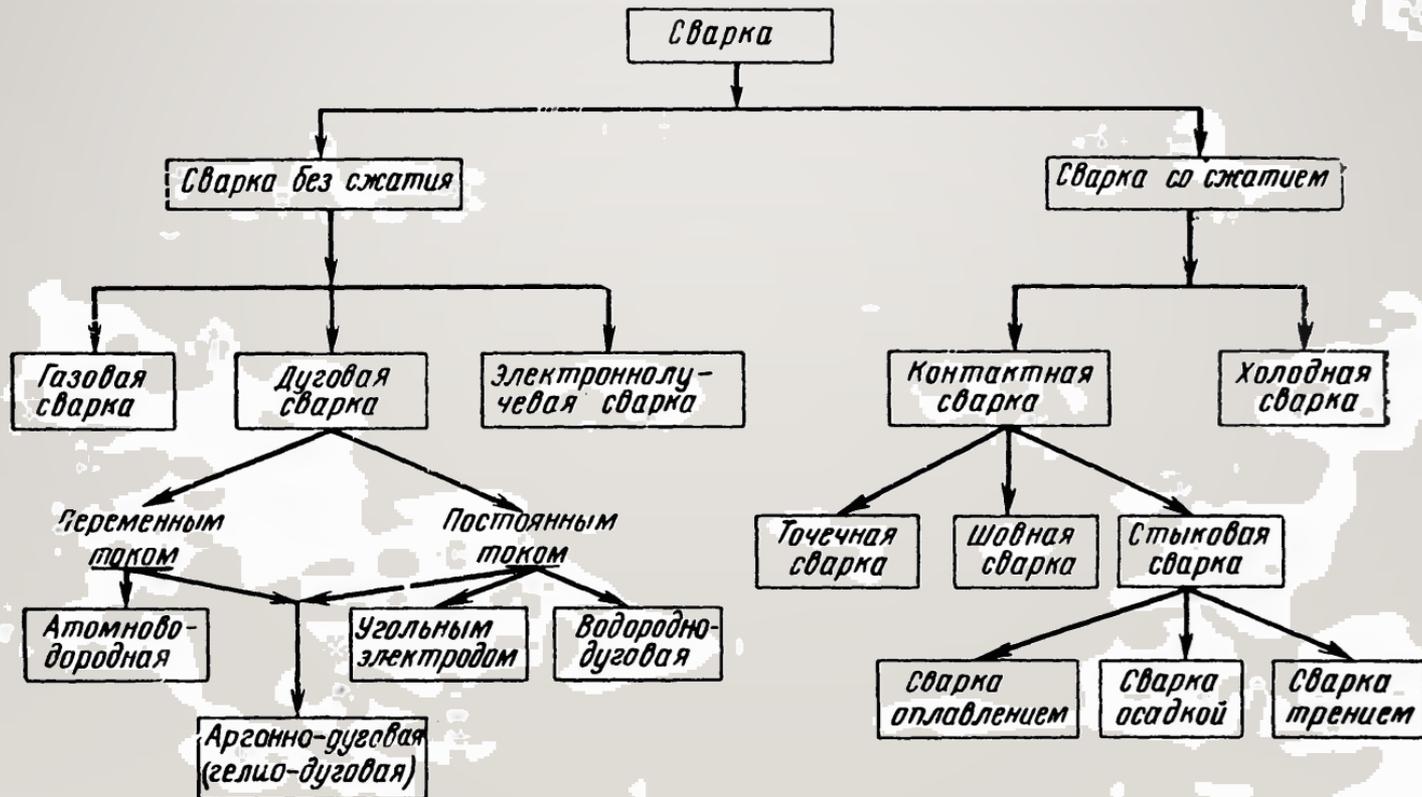
- Перенос материалов



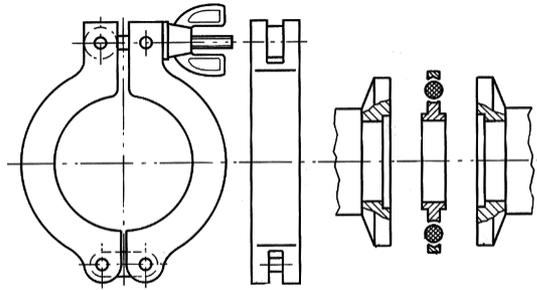
- Перенос излучения



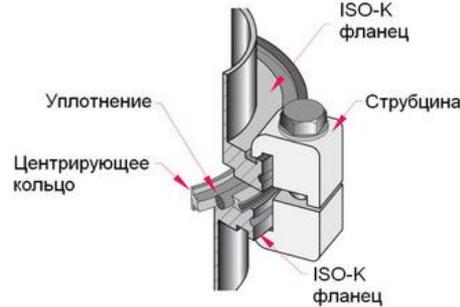
- Сварка металлов - технологический процесс соединения при таком нагреве и/или давлении, в результате которого получается непрерывность структуры соединяемого(ых) металла(ов).;



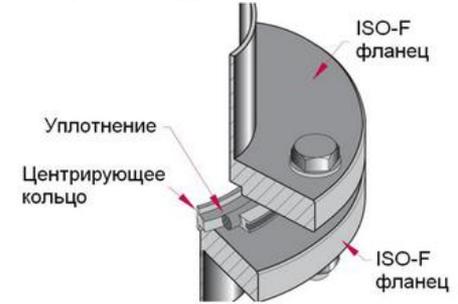
- По средствам смазок и смол
 - Зазор между сопрягаемыми материалами заполнен густыми не затвердевающими материалами
- Шлифованные и притертые уплотнения
 - Зазор между материалами нивелируется за счет снижения шероховатости поверхности и их плотного прижатия
- Жидкостные
 - Зазор между сопрягаемыми материалами заполнен каким либо жидким материалом
- При помощи прокладок (металлических и неметаллических)
 - Герметизация производится за счет заполнения неровностей материалом упругой или пластически деформируемой прокладки



Фланцевое соединение ISO-K



Фланцевое соединение ISO-F

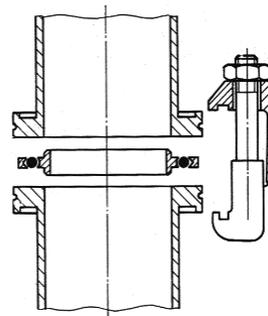
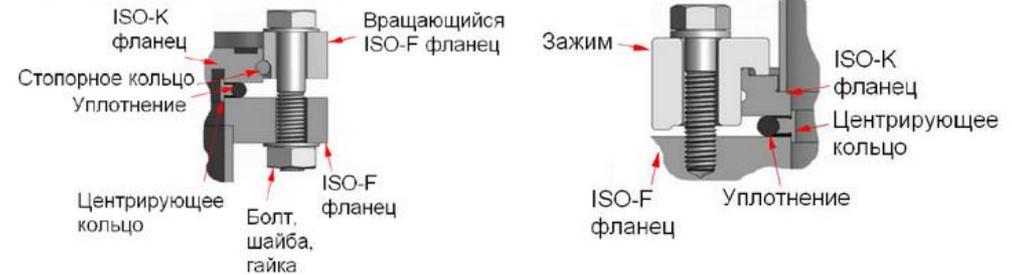


$P = 10^{-8}$ мбар
 $T = \text{от } -10 \text{ до } 200 \text{ } ^\circ\text{C}$

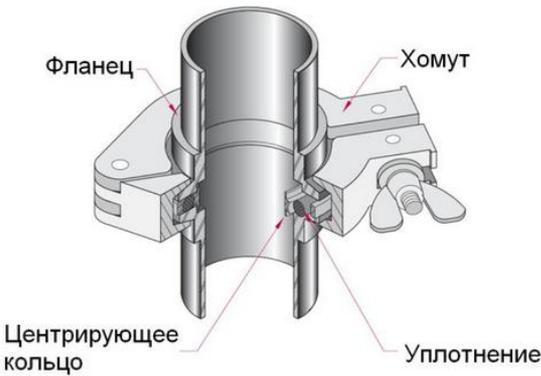
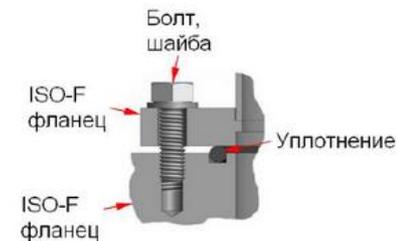
Варианты ISO соединений

Номинальные диаметры:

- DN63
- DN100
- DN160
- DN200
- DN250
- DN320
- DN400
- DN500
- DN630
- ...

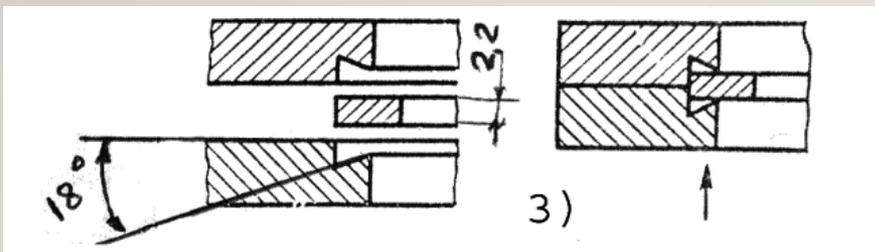
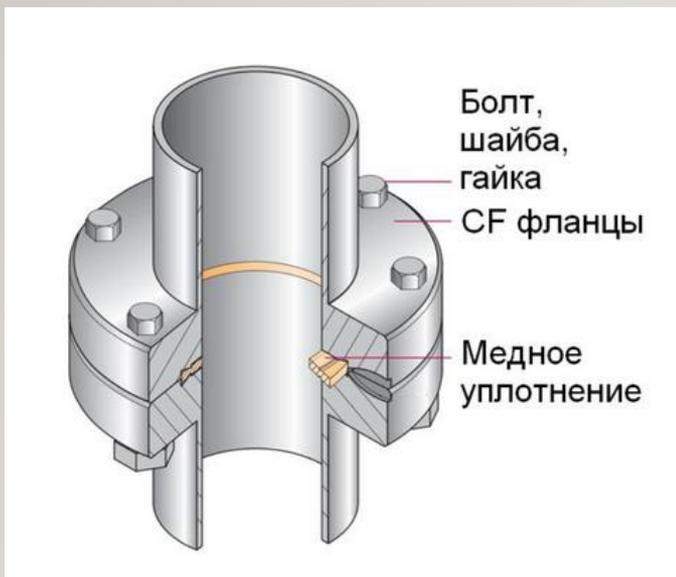


ISO-K/F

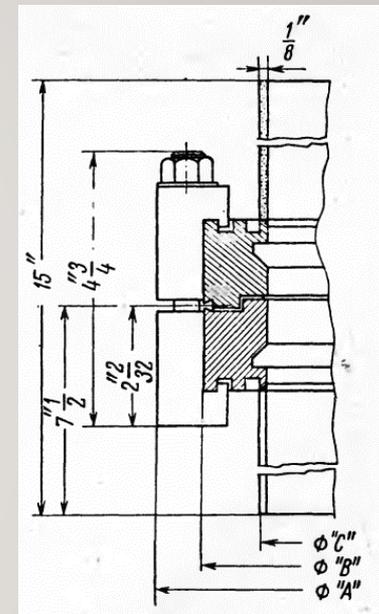
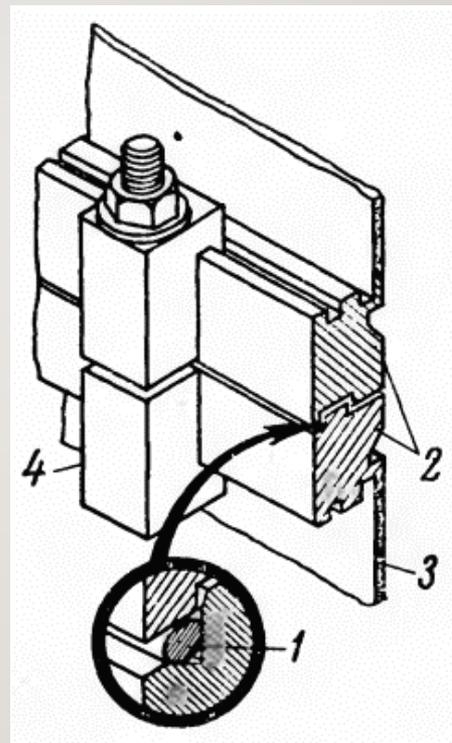


ISO-KF

DN16
 DN40
 DN63
 DN100
 DN160
 DN200
 DN250
 DN320



Соединение типа ConFlat (CF-F)



Соединение типа Уилера
 1 – проволочная прокладка; 2 – фланцы; 3 – обечайка; 4 - трубина

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

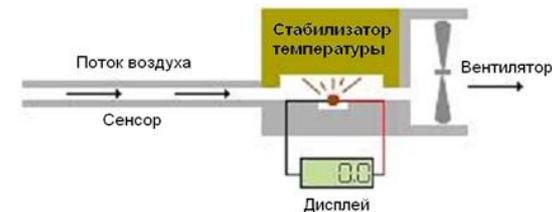
- Контроль проникающими веществами (капиллярный и течеискание) – вид неразрушающего контроля основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта (ГОСТ 18353-73)



- Разновидностью катарометрических течеискателей является тепловой течеискатель.
- Данный тип течеискателей использует свойство теплопроводности в качестве главного критерия определения газа. Течеискатель оборудован нагреваемым термистором (бусинкой термистора), который передает тепло блоку материалов, находящийся при постоянной температуре. Т.к. через детектор камеры проходит воздух, то постоянное количество тепла будет проходить от термистора к блоку. Газы, отличные от воздуха, будут оказывать влияние на скорость передачи тепла от термистора к блоку.

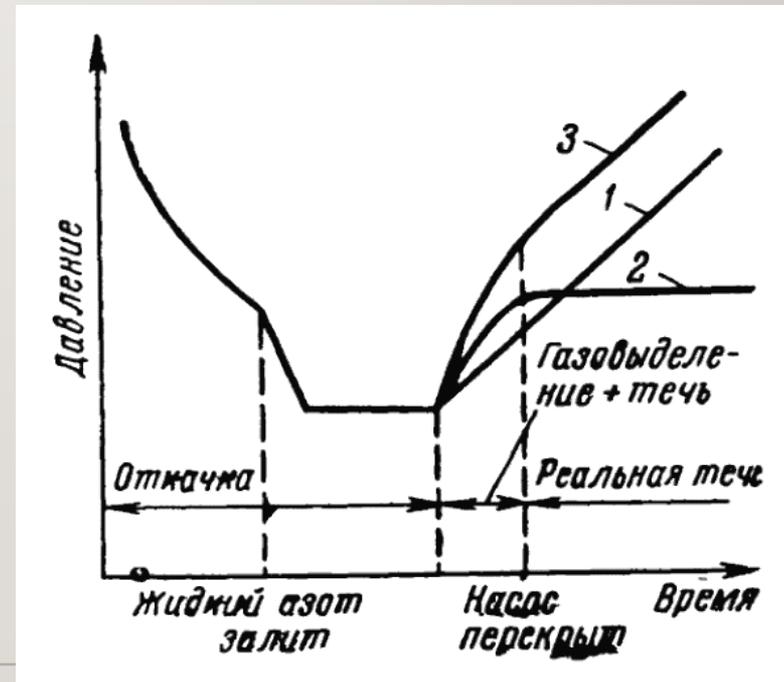


| Газ | Химическая формула | Минимальная чувствительность для серии G, Па · м ³ /с |
|------------------|--------------------|--|
| Водород | H ₂ | 7,7 · 10 ⁻⁷ |
| Гелий | He | 1,0 · 10 ⁻⁶ |
| Фреон R12 | R12 | 2,7 · 10 ⁻⁶ |
| Фреон R1301 | R1301 | 2,4 · 10 ⁻⁶ |
| Гексафторид серы | SF ₆ | 2,2 · 10 ⁻⁶ |
| Углекислый газ | CO ₂ | 4,0 · 10 ⁻⁶ |
| Метан | CH ₄ | 2,9 · 10 ⁻⁶ |
| Аргон | Ar | 3,5 · 10 ⁻⁶ |
| Кислород | O ₂ | 2,9 · 10 ⁻⁵ |

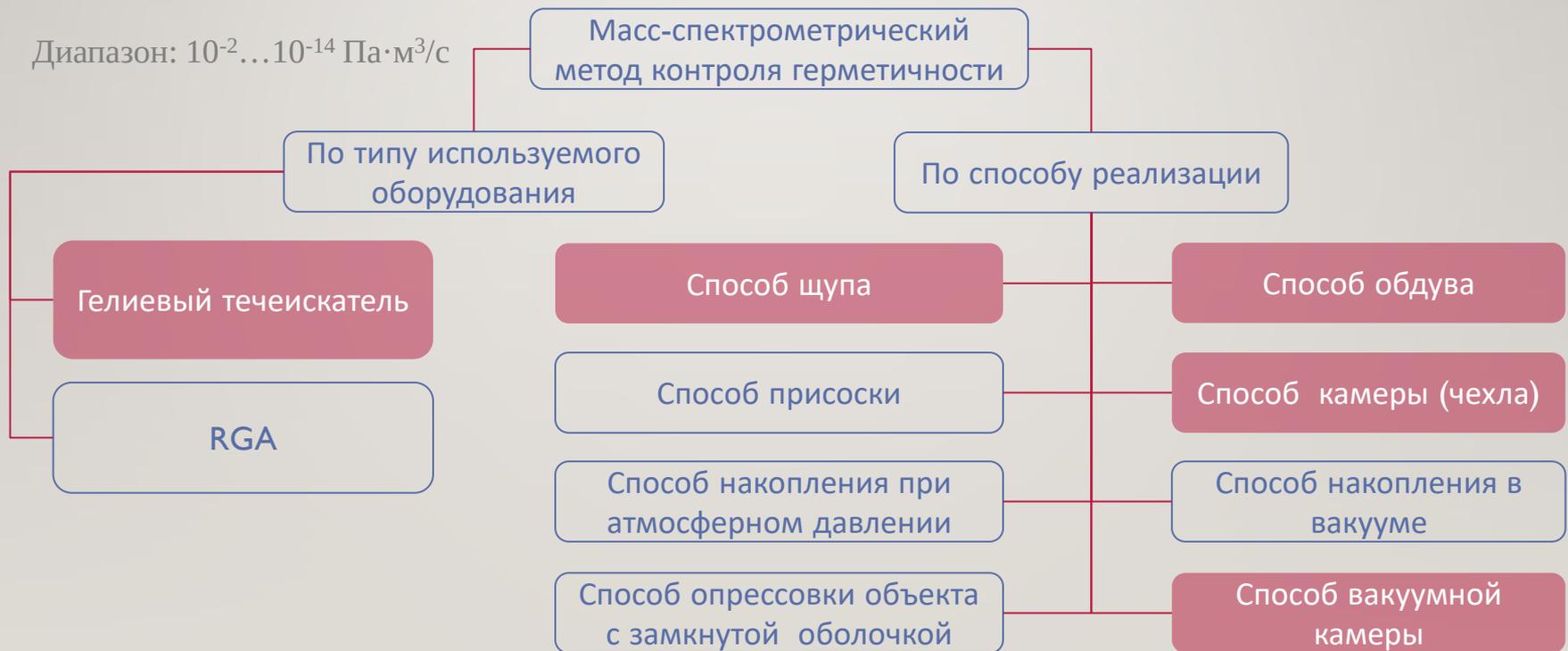


Течеискатель GasCheck 3000, Ion Science Ltd

- Манометрический метод наиболее прост и удобен для оценки степени герметичности вакуумной системы, имеющей собственные средства откачки и измерения давления, так как не требует специального оборудования;
- Для контроля герметичности может быть использован любой манометрический преобразователь, имеющийся в системе;
- Методом может быть определено суммарное натекание в систему и могут быть выявлены единичные течи.
- Минимальная величина течей, выявляемых манометрическим методом, зависит от общего давления в системе, которое в данном случае является фоном
- Кривая 1 – изменение давления при наличии истинных течей;
- Кривая 2 – изменение давления при наличии кажущихся течей
- Кривая 3 – при одновременном присутствии в системе как истинных так и кажущихся течей
- Скорость натекания – $Q_L = V \frac{\Delta p}{\Delta t}$



- Масс-спектрометрический метод течеискания – метод неразрушающего контроля проникающими веществами (ГОСТ 28517-90);
- Основан на обнаружении пробного вещества в смеси веществ, проникающих через течи, путем ионизации молекул веществ с последующим разделением ионов по отношению их массы к заряду под действие электрического и магнитного поля;
- Диапазон: $10^{-2} \dots 10^{-14}$ Па·м³/с



$$R = \frac{144}{H} \sqrt{MU}$$

R - радиус траектории движения иона, см;

H - напряженность магнитного поля, Э;

U - ускоряющая ионы разность потенциалов, В;

M - эффективная масса иона, равная отношению его массового числа к числу зарядов;

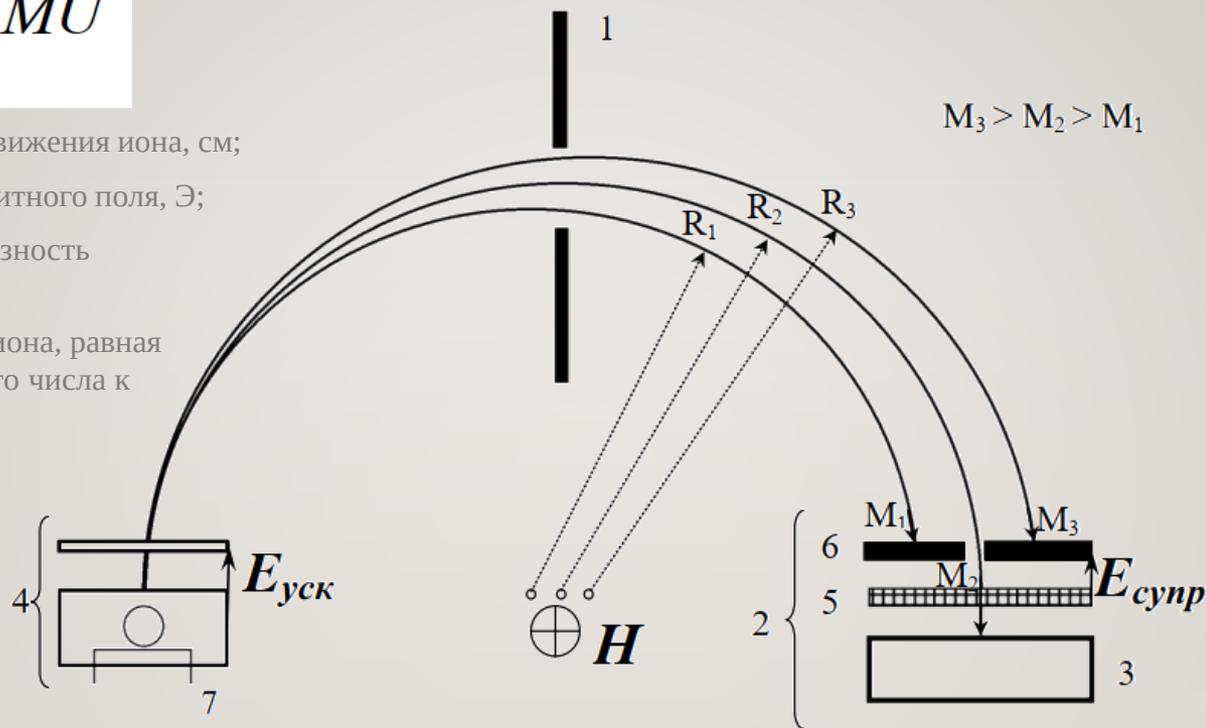


Схема масс-спектрометрической камеры.

Показаны траектории ионов различной эффективной массы ($M_3 > M_2 > M_1$). 1 - диафрагма; 2 - приемник ионов; 3 - коллектор; 4 - источник ионов; 5 - супрессорная сетка коллектора ионов; 6 - входная диафрагма коллектора ионов; 7 - катод

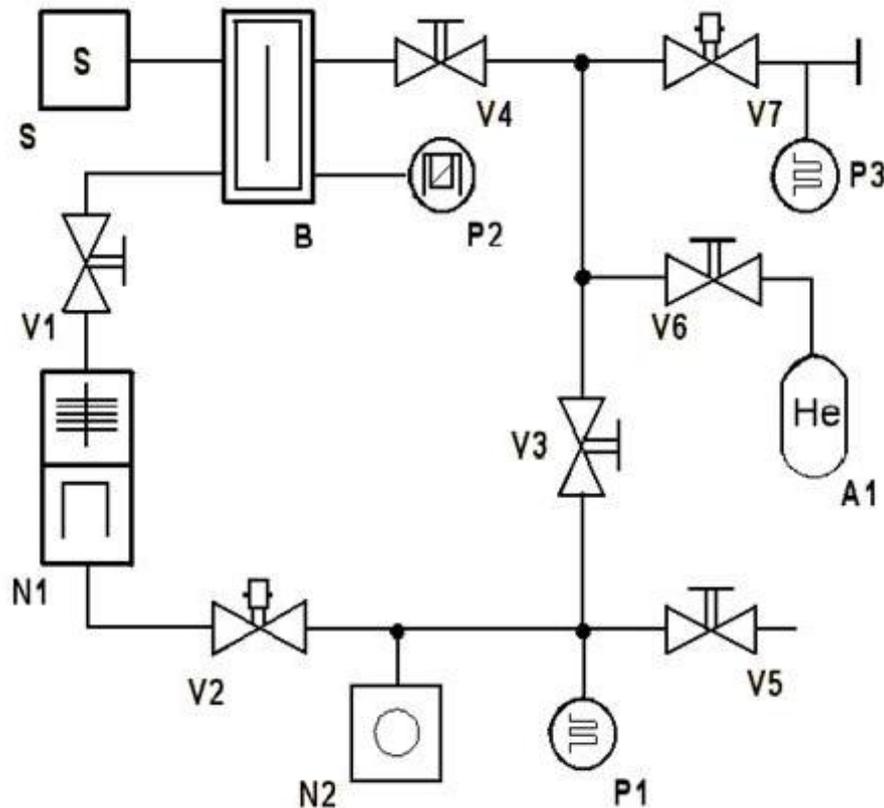


Схема вакуумной системы гелиевого СВ-ТН (завод-измеритель).

S - анализатор масс-спектрометрический; V1, V3, V4, V6 - клапан с ручным приводом; N1 - турбомолекулярный насос; V2, V5, V7 - клапан электромагнитный; N2- насос пластинчато-роторный; A1 - течь гелиевая; B - ловушка азотная; P1, P2 - преобразователь манометрический; P2 - преобразователь манометрический магнитный

- Требования

- Низкая концентрация в воздухе
- Инертность
- Низкая токсичность
- Приемлемая стоимость
- Малый размер
- Мобильность
- Уникальность массы

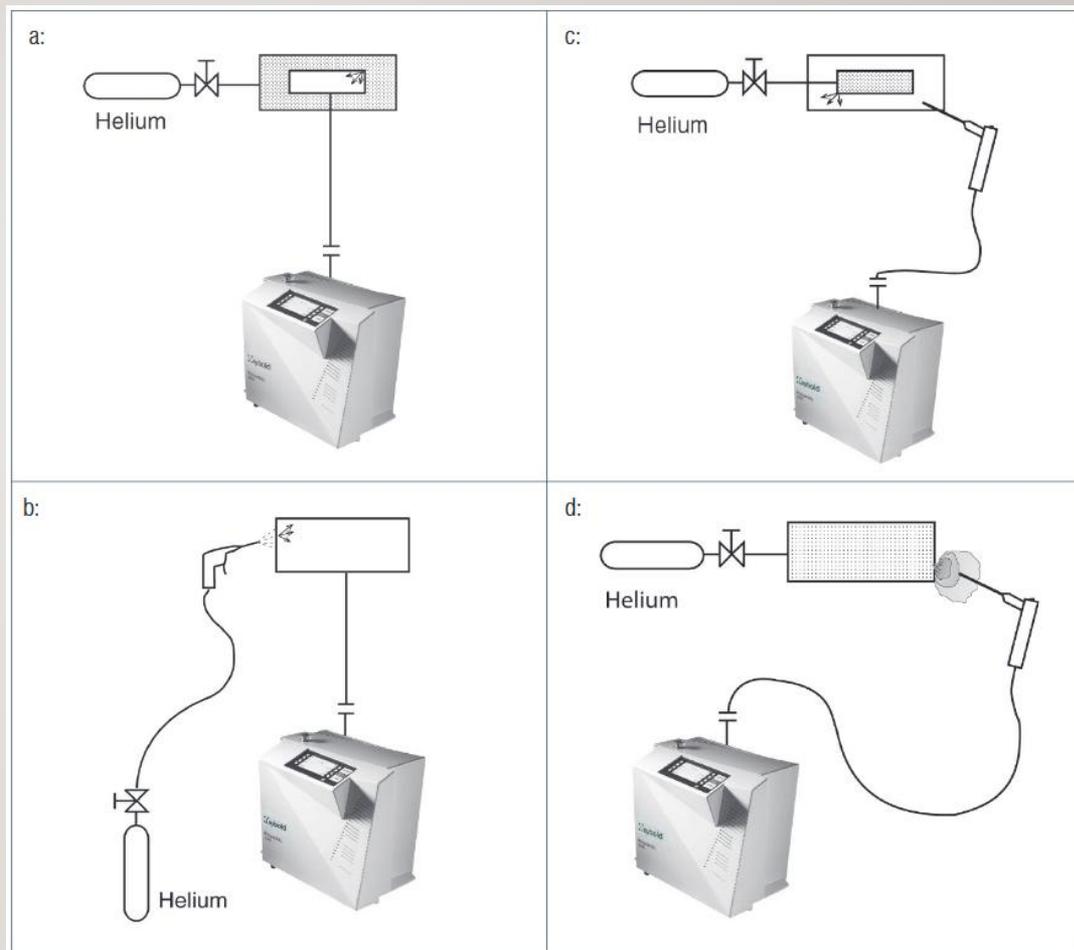
- Идеальный пробный газ ^4He
• Отсутствие диссоциации при ионизации

- Содержание в воздухе $5,27 \cdot 10^{-4} \%$ по объёму, $7,24 \cdot 10^{-5} \%$ по массе
- Нетоксичен
- Инертен
- Высокая стоимость
- Масса – 4,... а.е.м

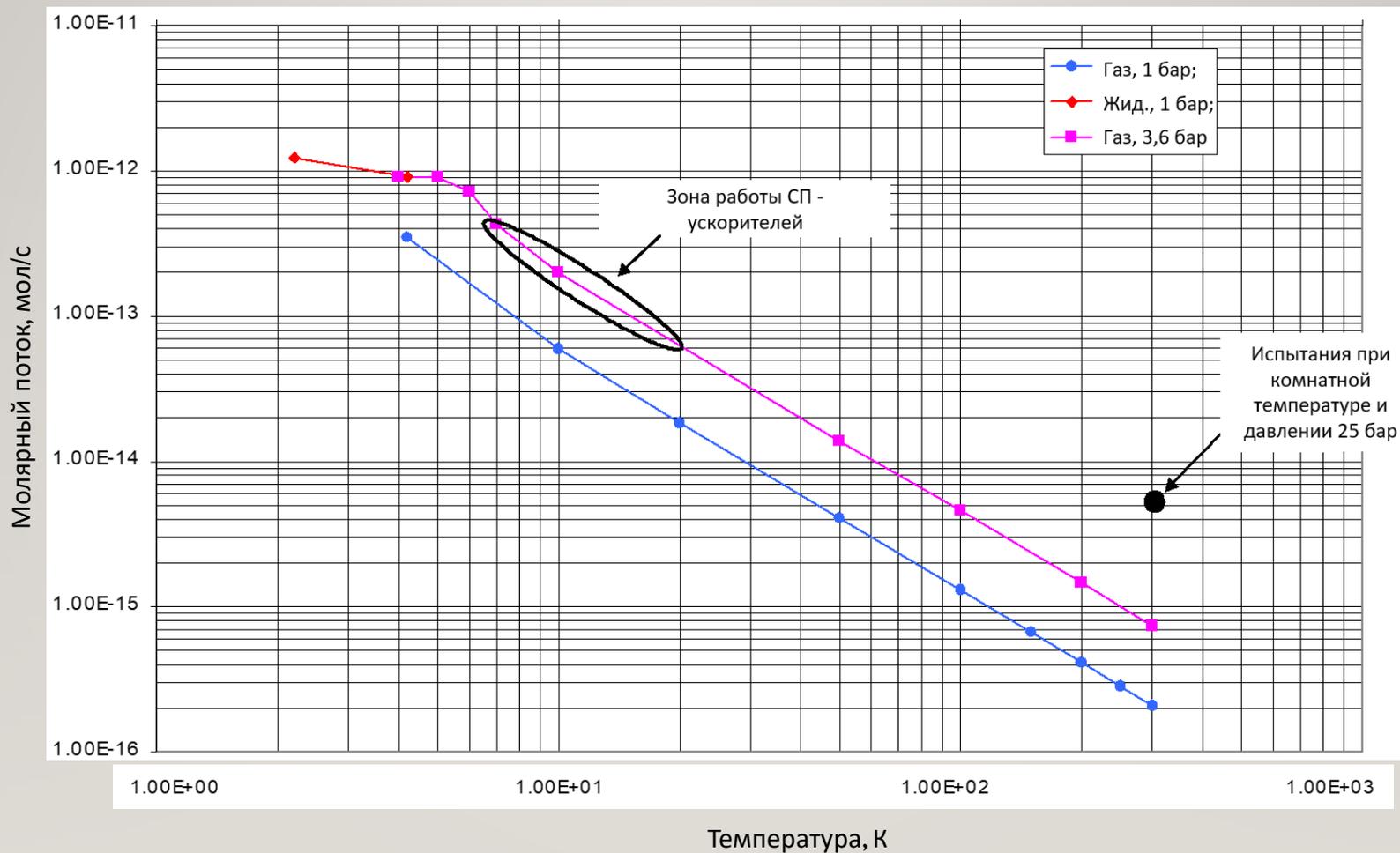


^4He

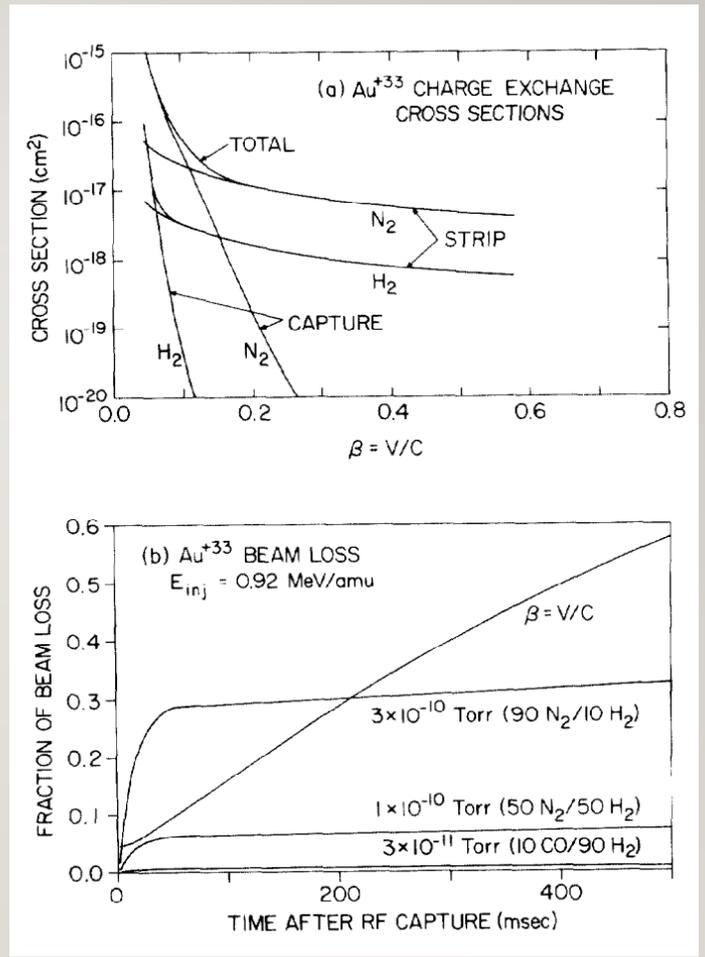
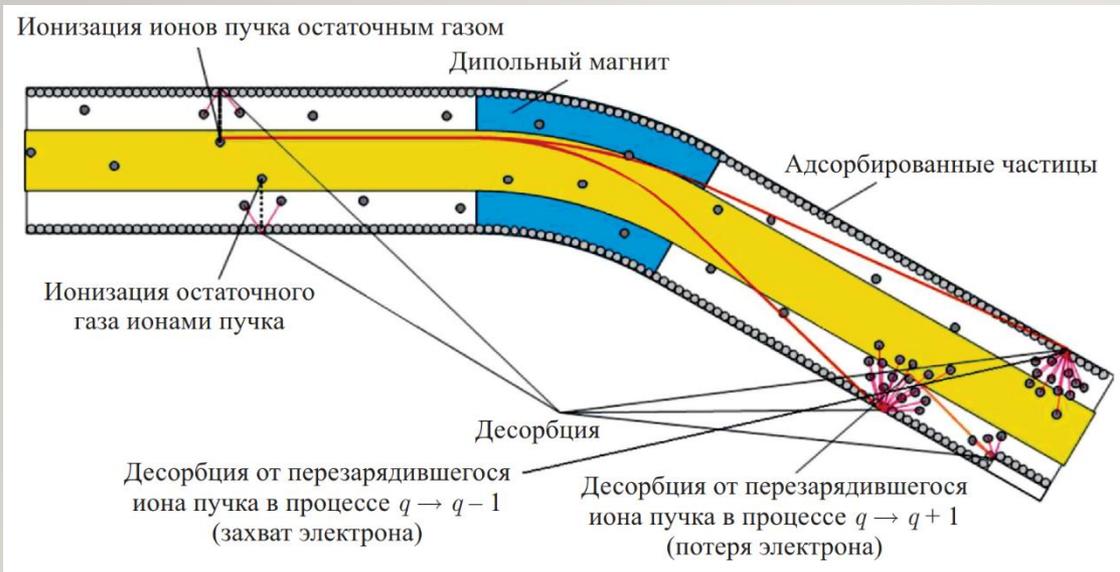
- А) Способ камеры (чехла)
- В) Способ обдува;
- С) Способ вакуумной камеры;
- D) Способ щупа
- Чувствительность: до 5×10^{-13} Па \cdot м³/с



Влияние температуры на уровень течи



Механизм потери пучка на остаточном газе в ионных ускорителях



А.Б. Кузнецов и др., Рост потерь пучка ионов золота в бустере NICA при десорбции остаточного газа, 2016
 H.S. Hseuh, The ultra high vacuum system of the AGS Booster, 1989

- Bello I, Vacuum_and_UHV physics and technology, 2018;
- Hoffman, Handbook of Vacuum Science and Technology, 1997;
- Розанов Л.Н., Вакуумная техника, 1990г.;
- Уэстон Дж, Техника СВВ, 1988г.;
- Фролов Е.С., Вакуумная техника, 1995г.
- Gross, Mass Spectrometry, 2011
- Глазков И.И., Вакуум электрофизических установок и комплексов, 1985г.;
- CERN-ACC-2020-0009 Vacuum in accelerators, 2020
- Хэфер Р., Криовакуумная техника, 1983;
- Кузнецов В.И., Эксплуатация ВО, 1978