

Вакуумная техника

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

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

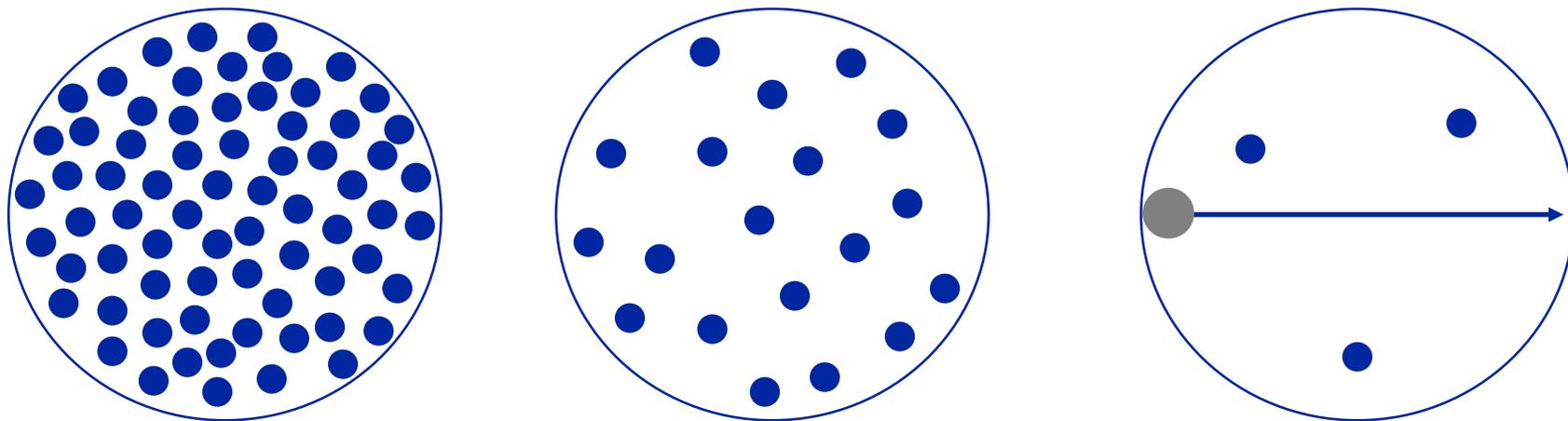
Вакуум - (от лат. vacuum - пустота), состояние газа при давлениях значительно ниже атмосферного

Единицы измерения

Атмосферное давление 1 Атм =

101 325	Паскаль (Па)
1,013	Бар
1013	миллибар (мБар), гектоПаскаль (гПа)
760	миллиметры ртутного столба
760	Торр
760 000	миллиТорр, микрон
29.9	inches of mercury
14.7	psia - pounds per square inch absolute
0	psig - pounds per square inch gage
????	“деления”, “вольты” – в зависимости от типа/характеристики измерительного прибора

Зачем нужен вакуум?



Для перемещения частиц на большие расстояния

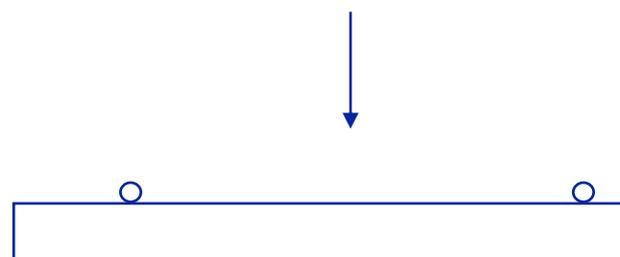
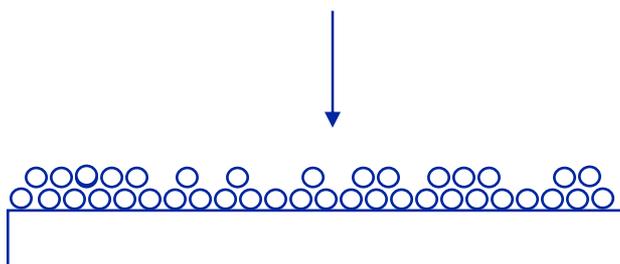
Зачем нужен вакуум?

Атмосфера

Вакуум

Загрязнения
(вода)

Чистая поверхность



Для получения чистой поверхности

Зачем нужен вакуум?



**Для удаления химически
активных веществ**

Зачем нужен вакуум?

Термоядерный реактор

$n_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ - 0,2 Па

Влияние примесей:

- Увеличение радиационных потерь
- Снижение концентрации топлива
- Потери на ионизацию
- Уменьшение проводимости, увеличение переноса

Характеристика количества примесей
в горячей плазме – эффективный
заряд Z_{eff}

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{n_e}$$

Тормозное излучение

$$W_{\text{торм}} = 1.6 \cdot 10^{-25} \cdot \sum_k Z_k^2 n_{Z_k} n_e \cdot \sqrt{T_e [\text{эВ}]} = 1.6 \cdot 10^{-25} \cdot Z_{\text{eff}} n_e^2 \cdot \sqrt{T_e [\text{эВ}]} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \cdot \text{сек}}$$

Частота столкновений

$$f_i = 1/\tau_i [\text{мкс}] = \Lambda \cdot n_e [\text{см}^{-3}] \cdot Z_{\text{eff}} / (2.95 \cdot 10^7 \cdot T_i^{1.5} [\text{эВ}])$$

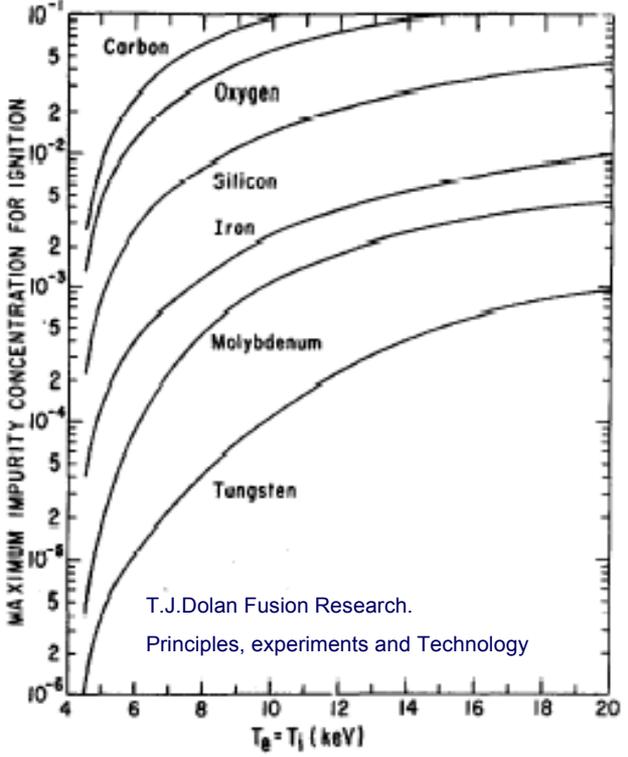
Мощность термоядерных реакций

$$P \sim n_i^2 \sim \frac{n_e^2}{Z_{\text{eff}}}$$

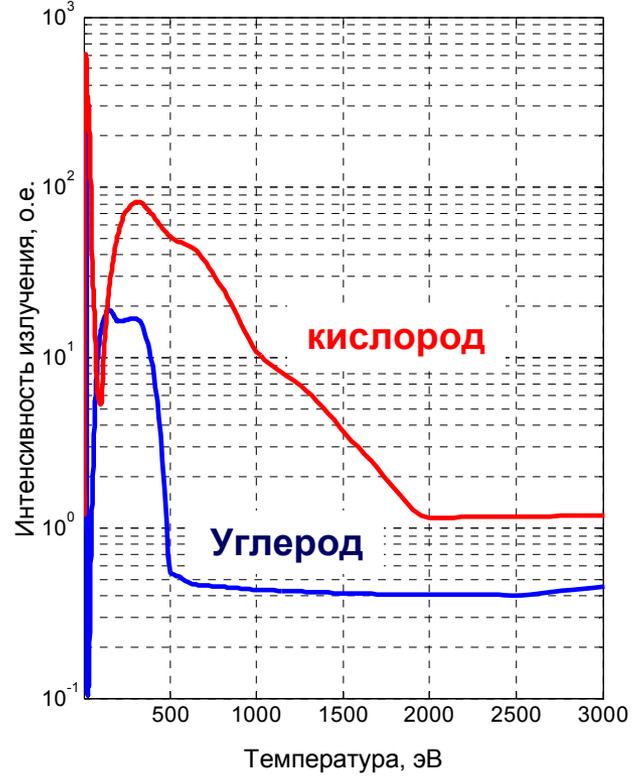
Зачем нужен вакуум?

Термоядерный реактор

Максимально допустимое содержание примесей в реакторе



Интенсивность излучения примесей



В реакторе необходим вакуум 10^{-5} Па

Режимы течения газа

$Kn = \lambda / D$ – число Кнудсена

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma (1 + C/T)}$$

λ – длина свободного пробега

D – характерный размер системы

n – концентрация газа

C – постоянная Сюзерленда (Воздух 122 К)

σ – газокинетическое сечение

Воздух, 293 К $\lambda[\text{м}] = 0,0068 / P_{[\text{Па}]}$

$\lambda \ll D$ вязкостный режим

– низкий вакуум

$D \sim 10$ см $P > 100$ Па

$\lambda \sim D$ переходный режим

– средний вакуум

$P = 0,1 - 100$ Па

$\lambda \gg D$ молекулярный режим

– высокий вакуум

$P = 10^{-6} - 10^{-1}$ Па

сверхвысокий вакуум

$P < 10^{-6}$ Па

Атмосферное давление (10^5 Па), нормальные условия:

$n = 2,7 \cdot 10^{19}$ частиц/см³ – число Лошмита

Космос 10^{-14} Па

ЦЕРН ускоритель ISR (2 км) 10^{-9} Па

место встречи пучков 10^{-11} Па

ЛНС 10^{-9} Па в объеме 6500 м³

ВЭПП-4 10^{-8} Па

Методы расчета вакуумных систем

Параметры:

Q [м³Па/с] – поток газа из объема,

$$Q = V \frac{\partial p}{\partial t} = kT \frac{\partial N}{\partial t}$$

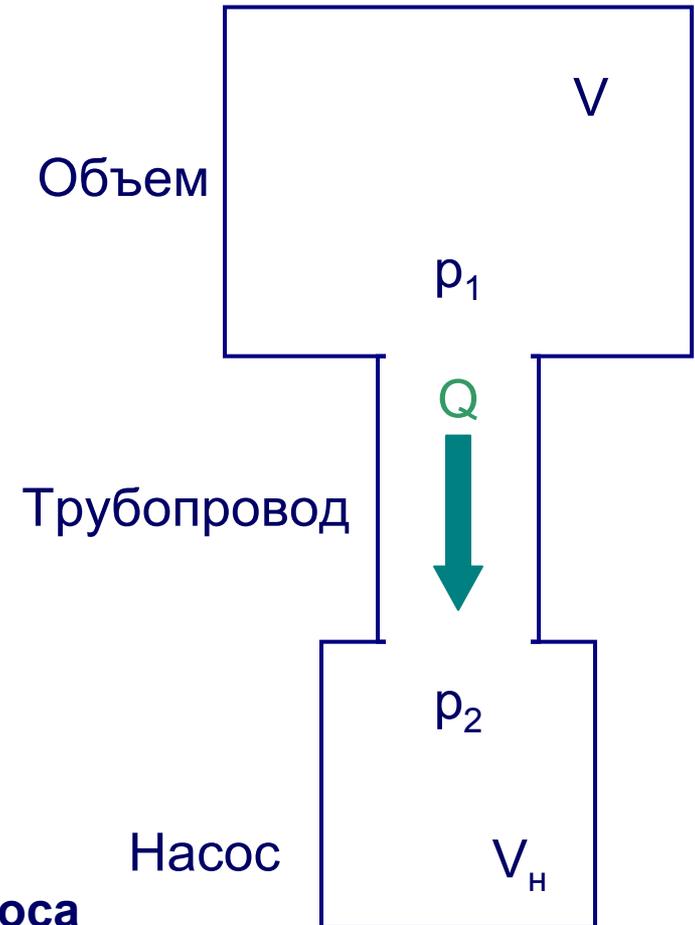
В молекулярном режиме

$$Q \sim n \cdot v_T = \frac{p}{kT} \cdot v_T = S \cdot p \quad \underline{\mathbf{S}} - \text{ скорость откачки}$$

$$Q = V \frac{\partial p}{\partial t} = S_n \cdot p$$

$$S_n = \frac{V}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial N}{\partial t}$$

S_n - быстродействие насоса



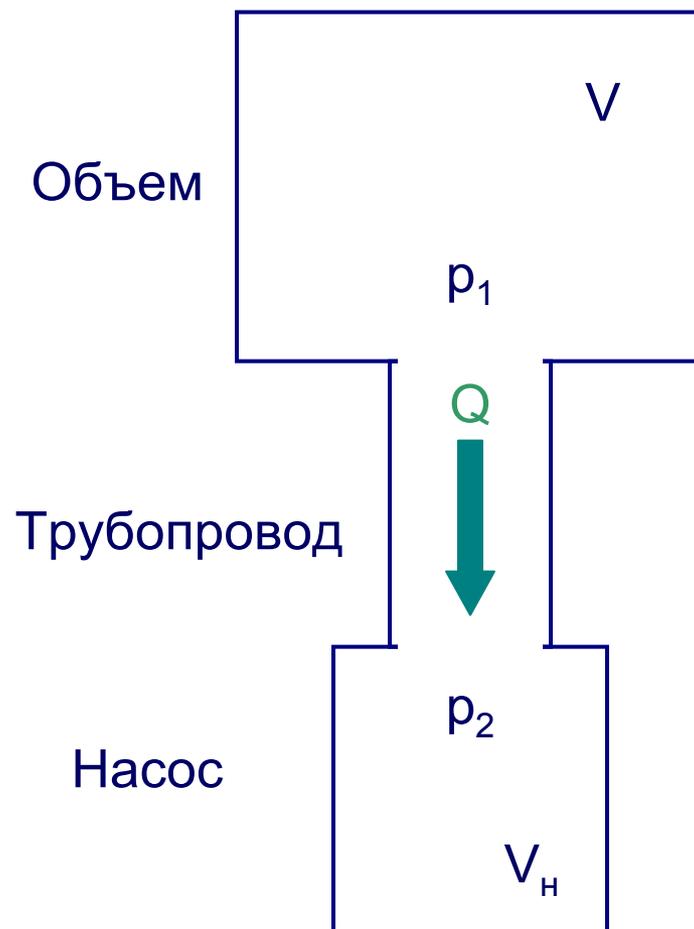
$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2} \quad \text{Проводимость трубопровода}$$

Сохранение потока:

$$Q = p_1 \cdot S = p_2 \cdot S_n$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{S} - \frac{1}{S_n}$$

$$S = \frac{U \cdot S_n}{U + S_n} \quad \text{Основное уравнение вакуумной техники}$$

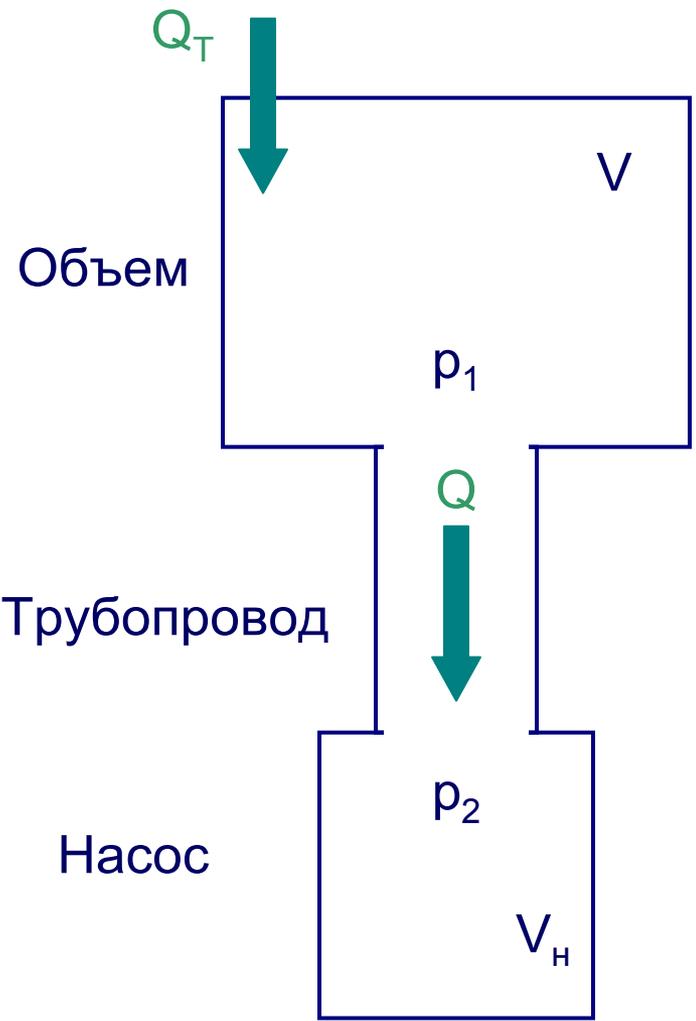


Насосу требуется адекватный трубопровод

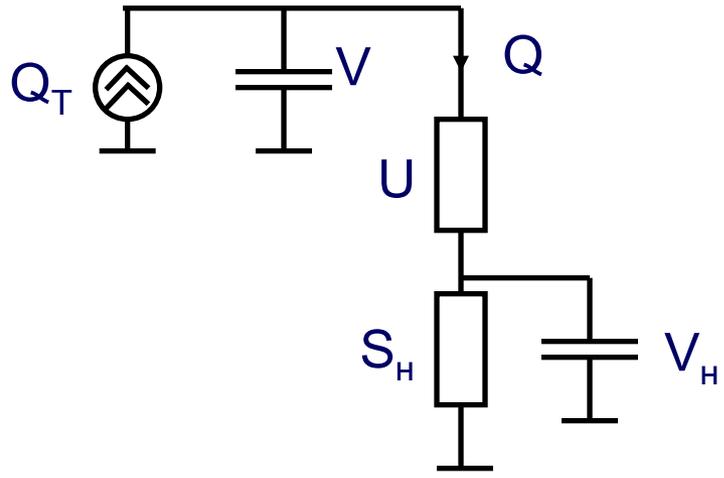
Проводимость элементов вакуумной системы

	Молекулярный режим:	Вязкостный режим:
Диафрагма:	$U = \frac{F}{4} \cdot \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ <p>Воздух 11,6 л/(с·см²)</p>	$U = F \frac{(p_1/p_2)^{1/\gamma}}{1 - p_1/p_2} \cdot \sqrt{\left(1 - (p_1/p_2)^{(\gamma-1)/\gamma}\right) \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{RT}{M}}$
Круглый трубопровод:	$U_{[м^3/с]} = 38.1 \left(\frac{D_{[м]}^3}{l_{[м]}} \right) \times$ $\times \sqrt{\frac{T_{[К]}}{M_{[А.Е.М.]}}}$ <p>Воздух 12,4 л/(с·см²)</p>	$U = 6.1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D^4}{l} \right) \frac{\bar{p}}{\eta}$

Аналогия с электротехникой

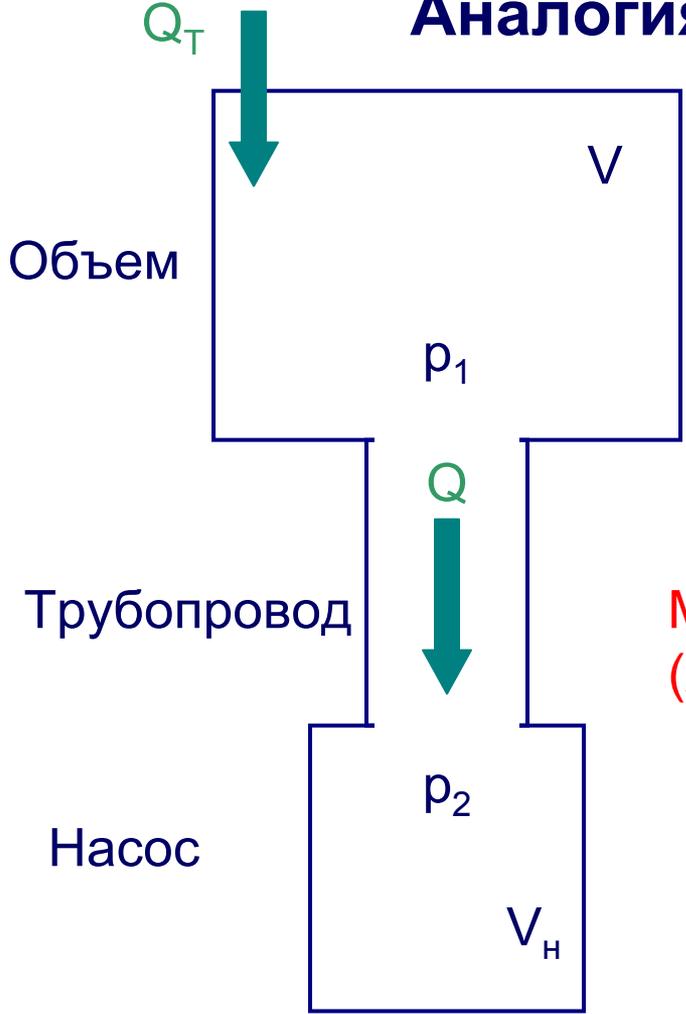


$p \rightarrow U$
 $Q \rightarrow I$
 $V \rightarrow C$
 $U, S \rightarrow 1/R$



Метод конечных элементов

Аналогия с теплопроводностью



p [Па] \rightarrow T [K]

Q [m^3 Па/с] \rightarrow W [Вт]

U, S [m^3 /с] \rightarrow s [Вт/К]

Можно использовать коммерческие программы (ANSYS)

Методы расчета сложных систем

- Статистический (Монте-Карло)

Находятся траектории пробных частиц
В.Разоренов CreatVac

- Метод угловых коэффициентов

Подобие с лучистым теплопереносом, находятся коэффициенты переноса между элементами поверхностей

-Метод эквивалентных поверхностей

Реальные элементы вакуумной системы заменяются эквивалентными поверхностями с заданными свойствами

-Интегрально-кинетический метод

Ищется функция распределения $f(v,r,t)$ из кинетического уравнения

-Метод конечных элементов

Аналогия с теплопроводностью

Нелинейные системы – взаимодействие пучка (плазмы) с остаточным газом приводит к изменению вакуумных условий

Особенности проектирования вакуумных систем

Не существует материалов, не выделяющих остаточные газы

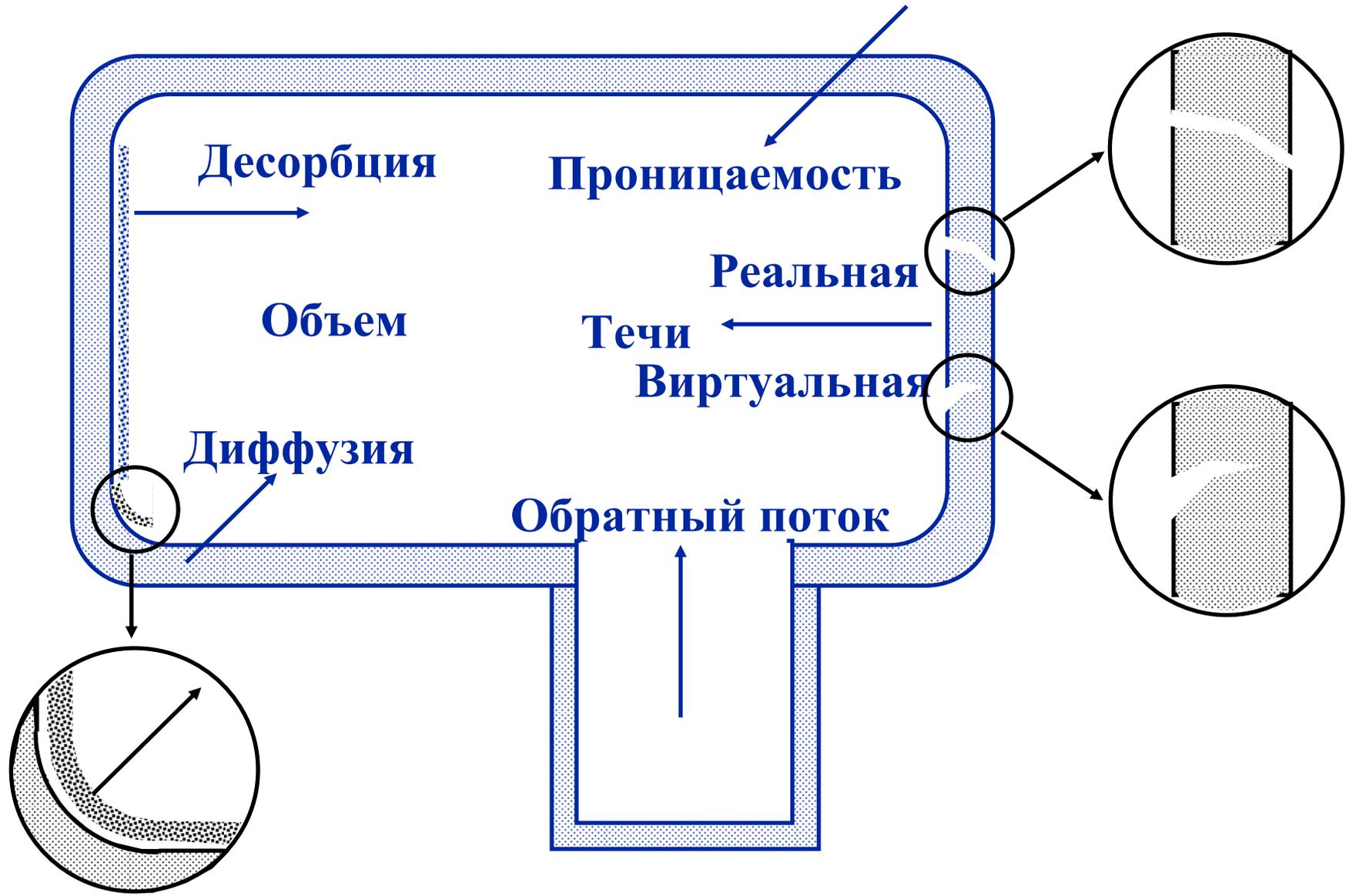
Все разборные соединения в определенной степени негерметичны

Органические прокладки выделяют одни газы и пропускают другие

Все насосы в некоторой степени являются источниками загрязнения вакуумной системы

Хорошую вакуумную систему создать можно

Источники остаточного газа



Объем

Вакуумная камера объемом $V=1 \text{ м}^3$ откачивается насосом с производительностью $S=500 \text{ л/с}$.

Найти, за какое время объем давление в объеме уменьшится с $p_0=10 \text{ Па}$ до $p_1=10^{-5} \text{ Па}$

Объем

Вакуумная камера объемом $V=1 \text{ м}^3$ откачивается насосом с производительностью $S=500 \text{ л/с}$.

Найти, за какое время объем давление в объеме уменьшится с $p_0=10 \text{ Па}$ до $p_1=10^{-5} \text{ Па}$

$$p_1 = p_0 \exp\left(-\frac{S \cdot t}{V}\right)$$

$S=500 \text{ л/с}$, $V=1000 \text{ л}$, $p_0=10 \text{ Па}$, $p_1=10^{-5} \text{ Па}$

$t = 30 \text{ с}$

Десорбция

Скорость десорбции с поверхности

Нерж.сталь, медь, алюминий (без спец. обработки) 10^{-4} - 10^{-5} Па*м/с

Вакуумная камера с площадью поверхности $V=10$ м²
откачивается насосом с производительностью $S=500$ л/с.

Приняв скорость десорбции 10^{-5} Па*м/с, найти
установившееся давление в объеме

Считая, что на поверхности находится 50 монослоев газа,
оценить время десятикратного уменьшения давления

Десорбция

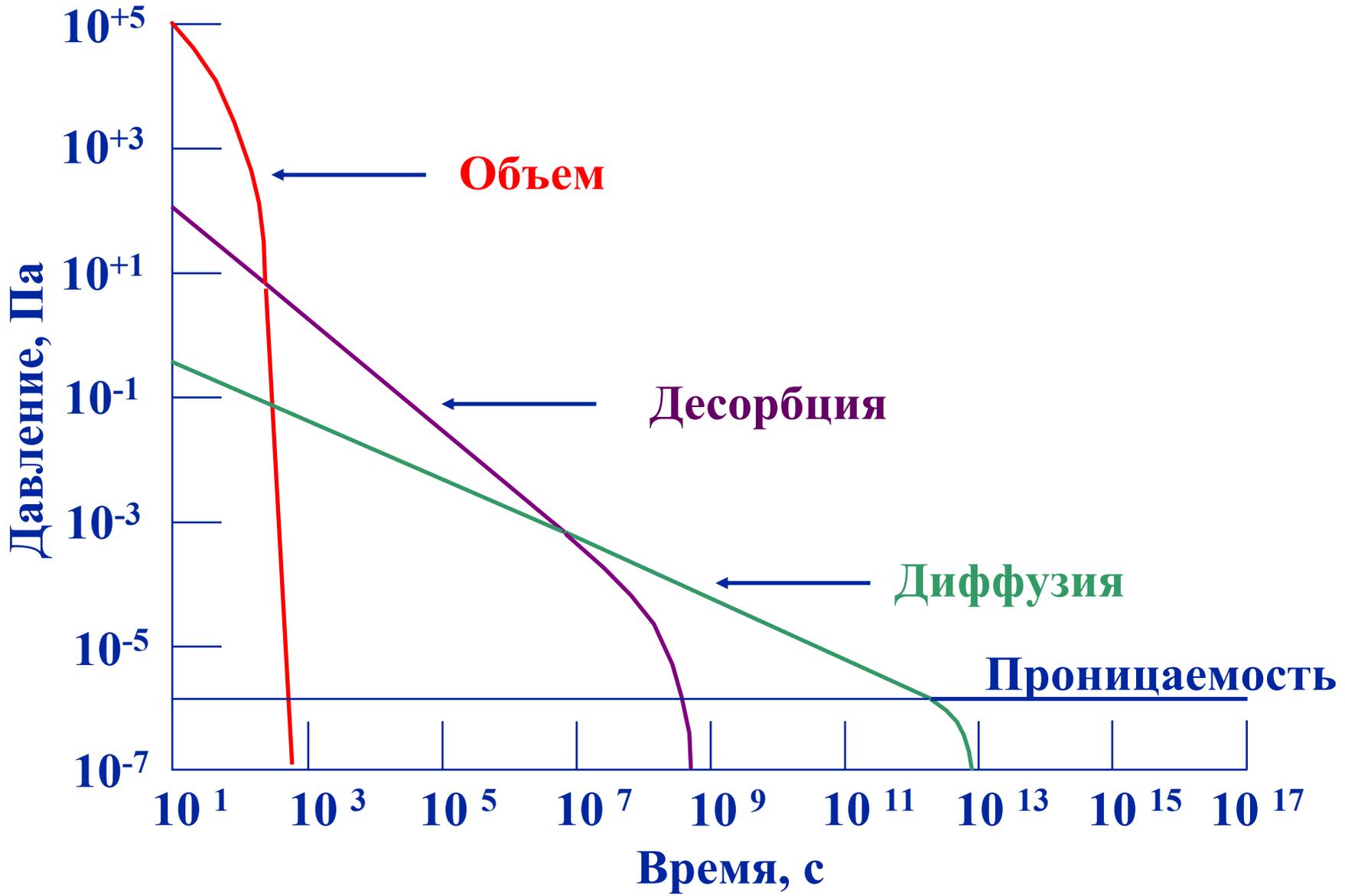
$$10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м} / \text{с} * 10 \text{ м}^2 / 0.5 \text{ м}^3 / \text{с} = 2 * 10^{-4} \text{ Па}$$

На поверхности 50 монослоев (вода) – 10^{17} частиц/см²
При $F=10 \text{ м}^2$ - на поверхности 10^{22} частиц

$$P=10^{-4} \text{ Па}, S=500 \text{ л} / \text{с} \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{S \cdot p}{kT} = 10^{16} \text{ частиц} / \text{с}$$

10^6 секунд = 3 месяца

Предельный вакуум определяется скоростью десорбции газа со стенок



Скорость десорбции

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad - \text{Закон Аррениуса}$$

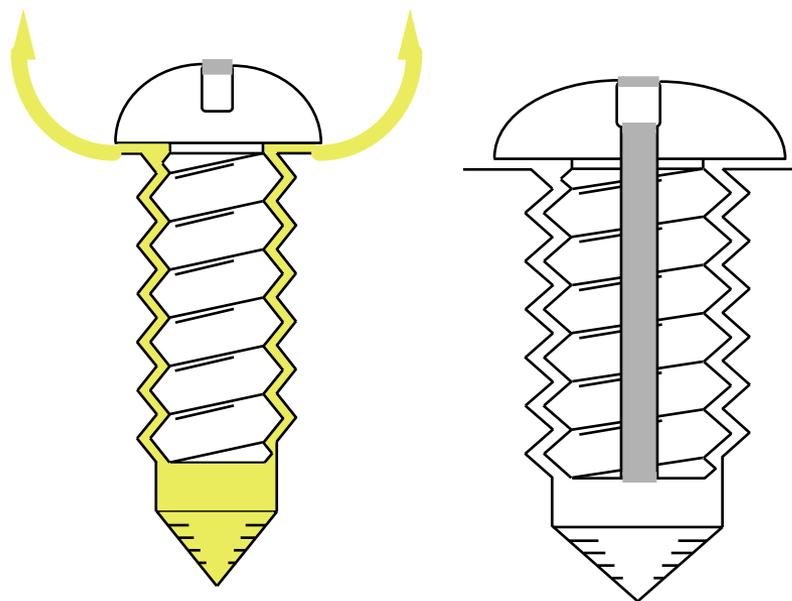
Предварительная обработка поверхности (очистка от окислов)

Прогрев стенок ($T \sim 0,1 E$)

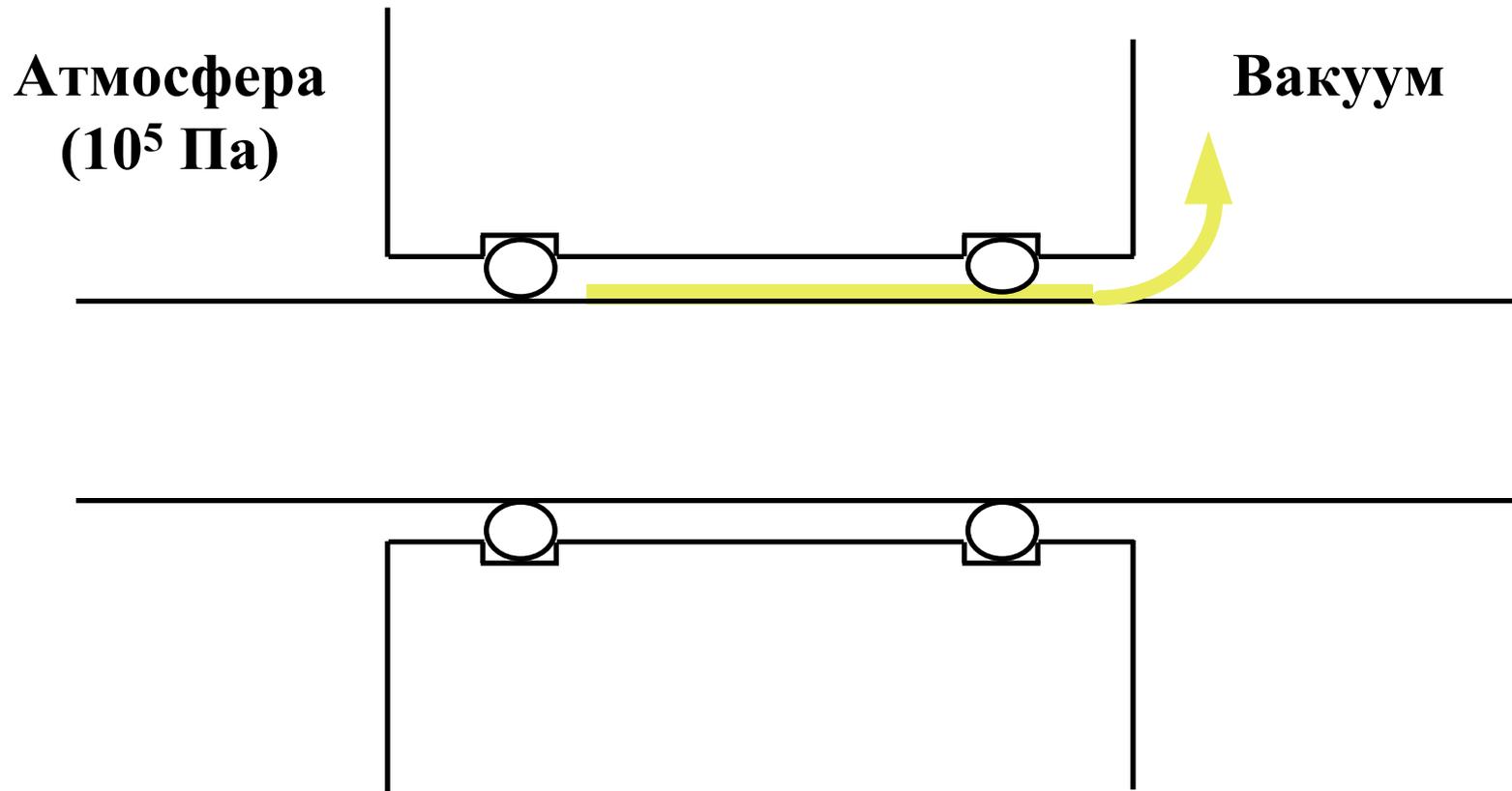
H_2O / Cu - $E=0,35$ эВ

Вакуум лучше 10^{-4} Па требует прогрева (400 градусов)
(газоотделение уменьшается на 3 порядка)

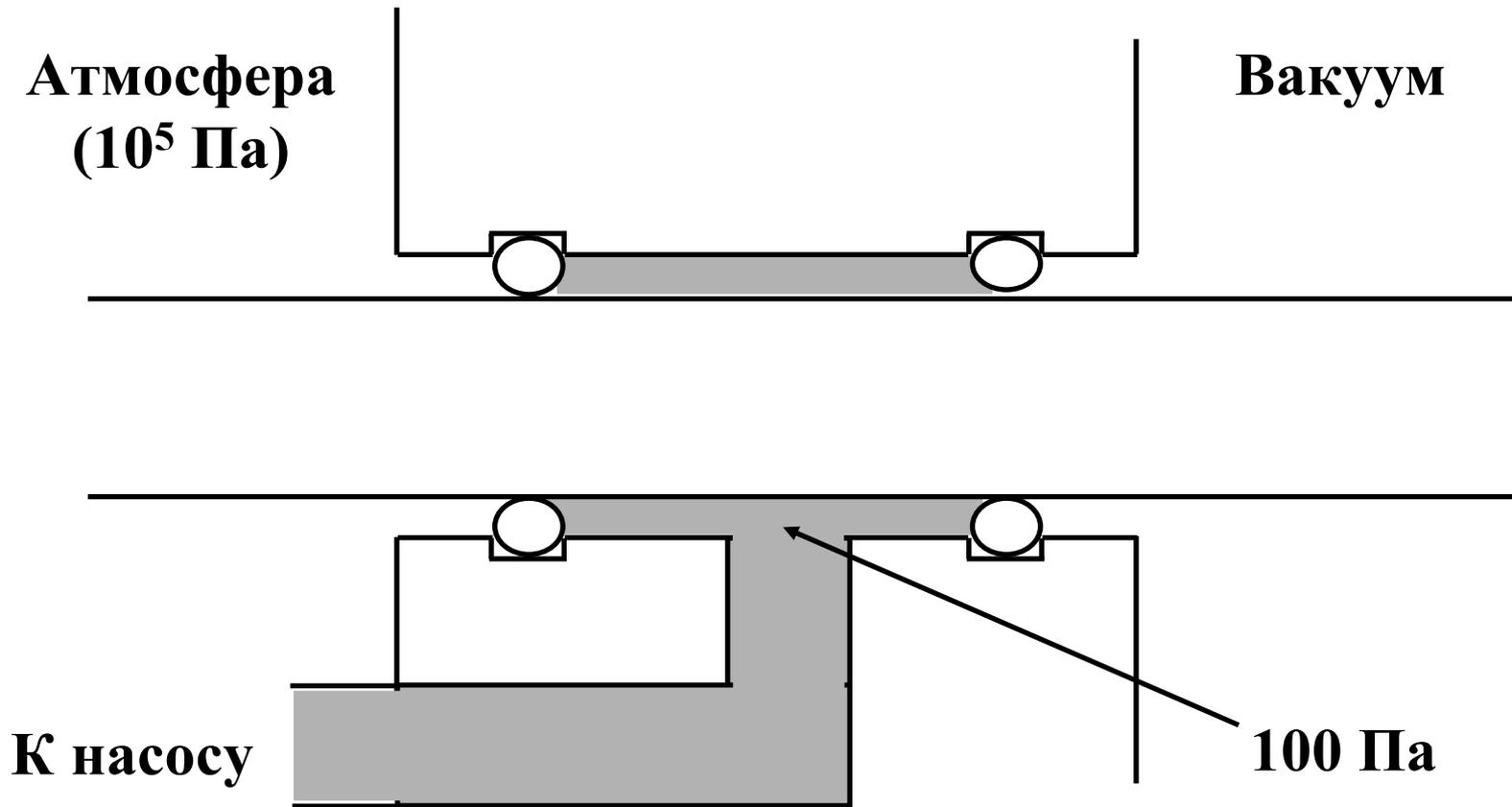
Виртуальные течи



Двойное уплотнение



Дифференциальная откачка



Диффузия, проницаемость

Масло – металлы

Гелий – резина, стекло, пирекс

Водород - металлы (V, Nb, Ta, Pd, Pt, Fe)

Характерное время диффузии водорода через 100 мкм мембрану
для разных материалов при $T=400$ К

W 6000 с

α -Ti 57000 с

Ni 2200 с

Be 9000 с

V 1.2 с

Ta 14 с

Nb 6.5 с.

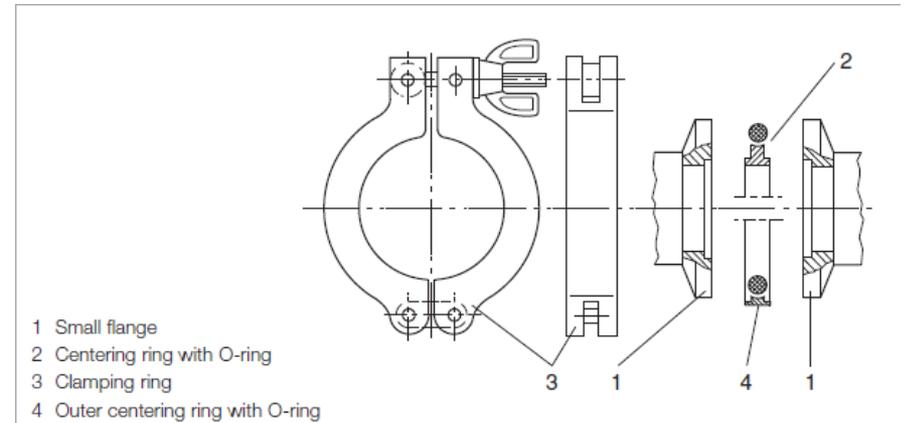
[O. V. Ogorodnikova, **Surface effects on plasma-driven tritium permeation through metals**
Journal of Nuclear Materials, Volumes 290-293, March 2001, Pages 459-463]

Вакуумные соединения

ISO-KF

диаметры 10-50 мм
уплотнитель ВИТОН
прогрев 150 градусов

ISO 2861-1:1974

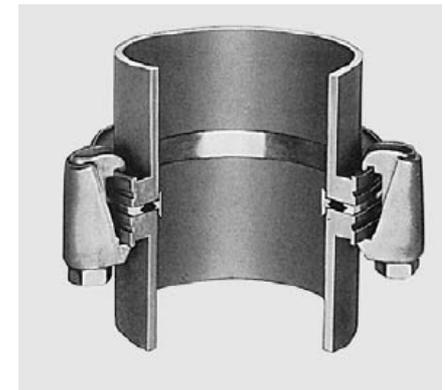
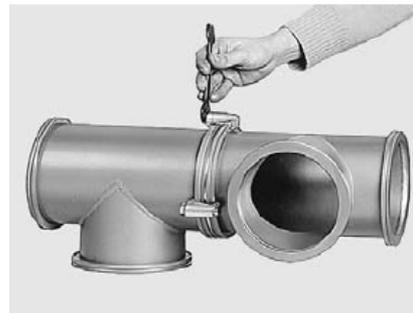
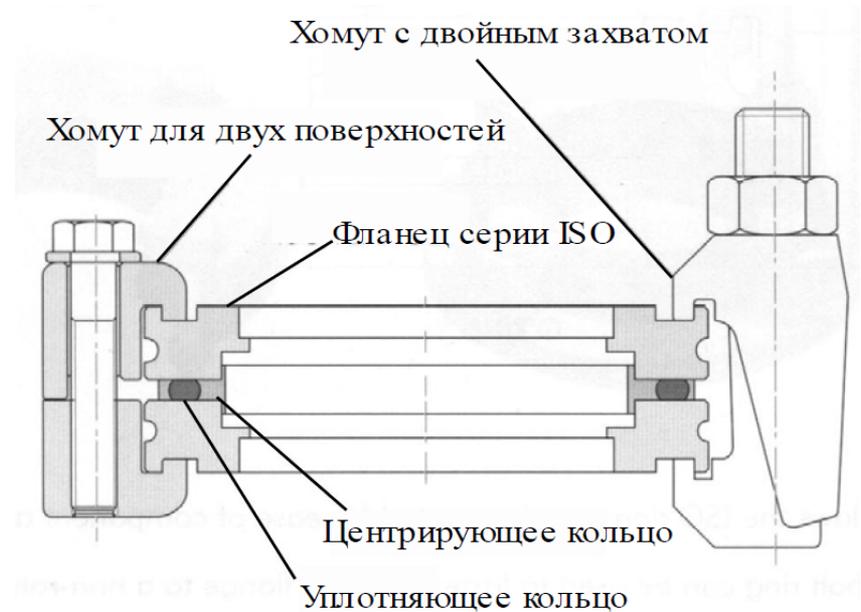


Вакуумные соединения

ISO-K

диаметры 63-630 мм
уплотнитель витон
прогрев 150 градусов

ISO 1609:1986

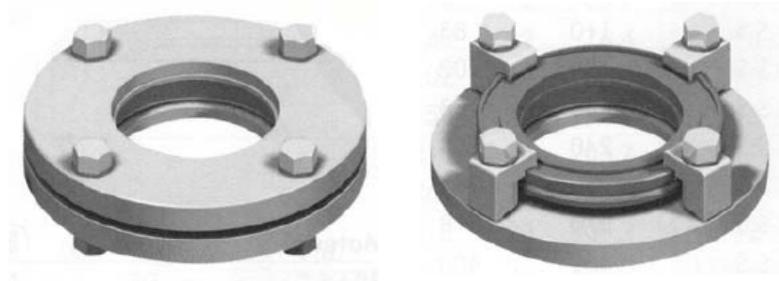
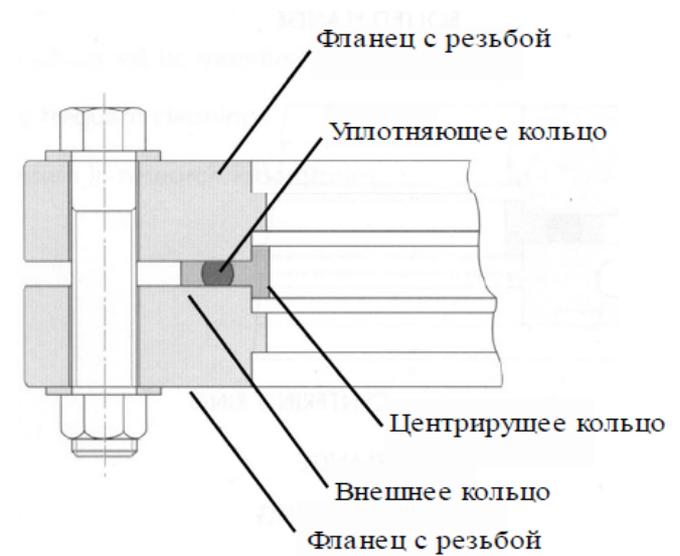


Вакуумные соединения

ISO-F

диаметры 63-630 мм
уплотнитель витон
прогрев 150 градусов

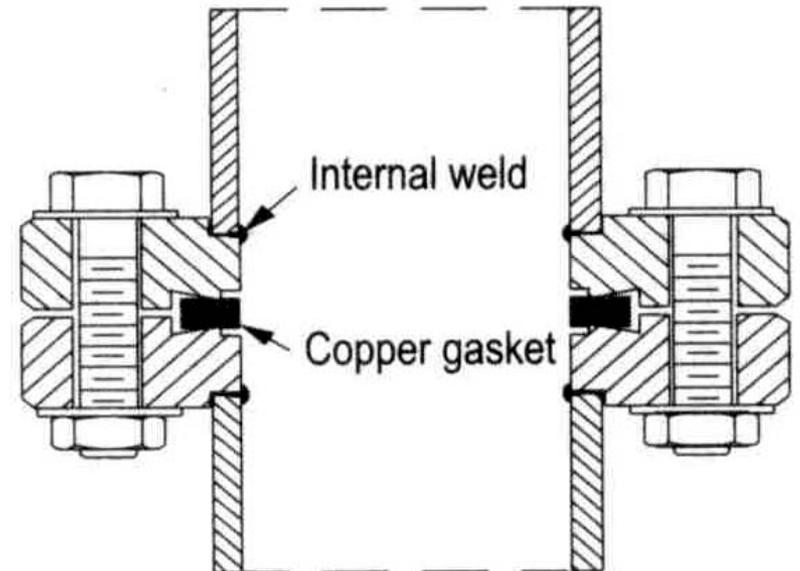
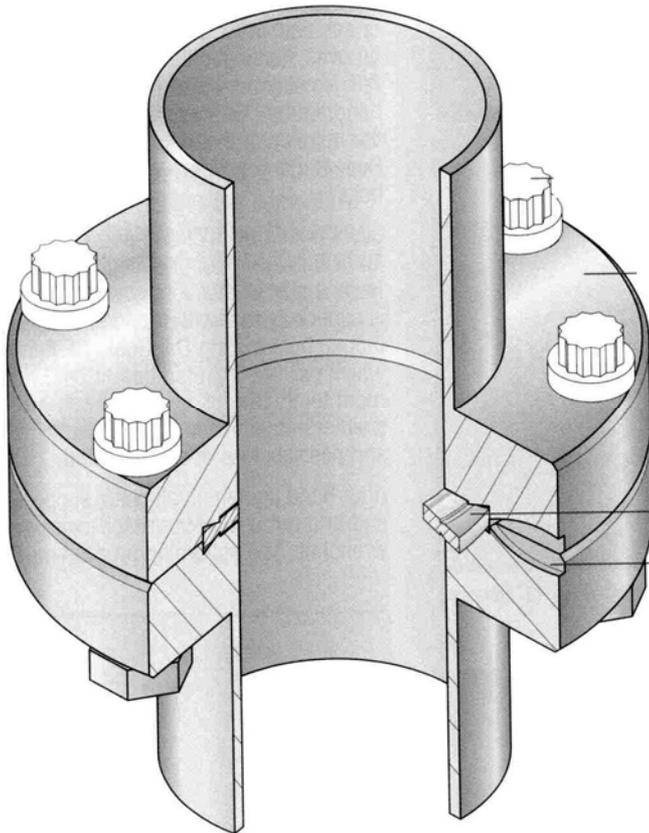
ISO 1609:1986



Вакуумные соединения

ISO-CF

диаметры 25-350 мм
уплотнитель медь
прогрев 450 градусов



Получение сверхвысокого вакуума

1. Соблюдать вакуумную гигиену (не хватать руками)
2. Использовать медные уплотнения, прогрев – выше 250 градусов
3. Качественная обработка поверхностей вакуумной камеры
4. Элементы вакуумной камеры предварительно прогревать
5. Для очистки деталей использовать чистый бензин или гептан
6. Применять высококачественную сталь, следить за направлением прокатки