Московский физико-технический институт
(Государственный университет)
Кафедра молекулярной физики

Физические методы исследования

Лекция 13

Вакуумная техника в масс-спектрометрии Откачка вакуумных систем

г. Долгопрудный, 30 ноября 2013г.

1

Вакуумная техника. План

- Проблема измерения давления
- Вакуум. Поддиапазоны вакуума
- Явления переноса. Течение газа
- Конструирование вакуумных систем
- Создание вакуума (откачка)
- Методы измерения пониженного давления
- Методы измерения и создания высоких давлений

2

Рекомендуемая литература по измерению давления и вакуумной технике

- Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Том 2. Молекулярная физика и термодинамика.
- Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 3. Методы измерения давлений. Учебно-методическое пособие /М.: МФТИ, 2005.
- Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
- Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975.
- Дэшман, С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман . – М. : Мир, 1964 . – 715 с.
- А. Рот. Вакуумные уплотнения

3

Vacuum – *пустота (лат.)*

В настоящее время термином вакуум принято называть любое пространство, заполненное газом, давление которого ниже атмосферного.

Величина предельного разрежения, которое может быть достигнуто, измерено и поддержано в вакуумной камере, определяется основными характеристиками вакуумной системы, а также насосов, манометров и уплотнений, используемых в ней.

4

Области вакуума

Вакуум	Хар-ка давления	Величина, Торр	Применение или типичная область существования
Атмосферное давление	Атмосферное	760	На поверхности Земли
Технический (низкий вакуум)	Пониженное	100-10	В газонаполненных лампах, на входе водяного струйного насоса, в технических вакуумных установках
Форвакуум (средний)	Форвакуумное $1 – 10^{-3}$ Торр	$1 – 10^{-2}$	В различных газоразрядных лампах, наполненных газами или парами
		10^{-3}	В металлургических печах
Высокий	Низкое $10^{-4} – 10^{-7}$ Торр	10^{-4}	В сосудах Дьюара
		10^{-5}	При вакуумном осаждении паров
		10^{-6}	В приемно-усилительных лампах, 200 км
		10^{-7}	В генераторных лампах
Очень высокий	Очень низкое $10^{-8} – 10^{-11}$ Торр	$10^{-8} – 10^{-9}$	В ускорителях частиц, в рентгеновских трубках, 600 км
		$10^{-10} – 10^{-11}$	В установках для исследования поверхностей
Сверх-высокий	Чрезвычайно низкое $10^{-12} – 10^{-15}$ Торр	$10^{-12} – 10^{-13}$	В специальных экспериментальных установках для исследования сверхвысокого вакуума
		$10^{-14} – 10^{-15}$	В космическом пространстве

5

Элементы вакуумных систем

- Сосуды
- Трубопроводы
- Краны и заслонки
- Средства измерений
  - Измерение давления
  - Измерение расходов и потоков
  - Контроль состава газовой среды
  - Контроль течей
- Средства откачки
- Системы напуска газа
- Вспомогательные элементы

6

Режимы газовых течений

$\lambda_0 << \chi$	Вязкостный режим	*Молекулы участвуют в процессах, в основном, за счет взаимных соударений*
$\lambda_0 >> \chi$	Молекулярный режим	*Молекулы взаимодействуют, в основном, со стенками и с другими поверхностями*
$\lambda_0 \sim \chi$	Промежуточный режим	*Реализуются оба случая с соизмеримыми вкладами*

χ- характерный размер сосуда

7

Течение газа

А. Поток газа.

Количество газа (в единицах PV), протекающего через сечение в единицу времени

$$I = \frac{dQ}{d\tau} = p\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_p, [\frac{Торр \cdot л}{сек}]$$

Б. Объемная скорость течения.

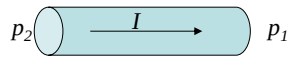
$$S = \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_p, [\frac{л}{сек}]$$

$$I = Sp$$

8

Проводимость элемента вакуумной системы

$$G = \frac{I}{p_2 - p_1}$$



$$p_1 = 0 \Rightarrow G = \frac{I}{P} = S$$

Сопротивление:

$$W = \frac{1}{G}$$

Соединение элементов:

Параллельное:

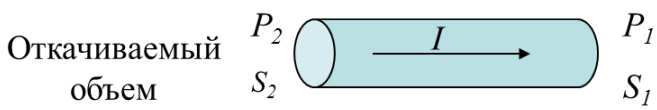
$G = G_1+G_2+\ldots+G_n = 1/W_1+1/W_2+\ldots$

Последовательное:

$W = W_1+W_2+\ldots+W_n = 1/G_1+1/G_2+\ldots$

9

Объемная скорость истечения газа на выходе из трубопровода



$$\frac{1}{G} = \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1}$$

$$S_1 = S_2 \frac{1}{1 - \frac{S_2}{G}}$$

Выводы:

$S_2 < S_1$ всегда, кроме случая $G=\infty$ (абсолютной проводимости);

И поэтому насос всегда должен быть как можно ближе к откачиваемому объему

10

Проводимость отверстия в молекулярных условиях

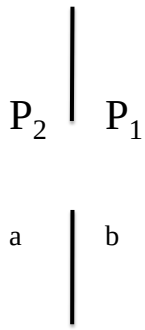
$$f_b' = \frac{1}{4} n_2 v_{ap} = \frac{1}{4} \frac{p_2}{kT} v_{ap}$$

$$f_a' = \frac{1}{4} n_1 v_{ap} = \frac{1}{4} \frac{p_1}{kT} v_{ap}$$

$$f' = f_b' - f_a' = \frac{1}{4} \frac{v_{ap}}{kT} (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{1}{4} A_0 (p_2 - p_1) v_{ap}$$

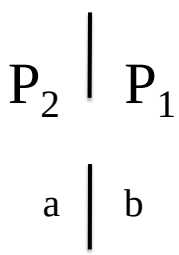
$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(PV)}{dt} = RT \frac{d\nu}{dt} = RT \cdot f_M$$



$$f' = f_b' - f_a' = \frac{1}{4} \frac{v_{ap}}{kT} (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{1}{4} A_0 (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(PV)}{dt} = RT \frac{d\nu}{dt} = RTf_M$$



$$G_0 = \frac{1}{4} v_{ap} A_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}} A_0 = A_0 \sqrt{\frac{kT}{2\pi\mu}}$$

$$G_0 \approx 3.65 \cdot A_0 \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$ -[л/сек, К, г/моль, см^2]

$$G_0 \approx 11.6 \cdot A_0$$ -Воздух, Т=293К

Проводимость каналов
Молекулярные условия

$$F_+ = \frac{1}{4}\pi D^2 (p_2 - p_1)$$

$$f' = \frac{1}{4} n_0 v_{ap} \pi \cdot D \cdot L$$

$$p_0 = \frac{1}{2}(p_2 + p_1)$$

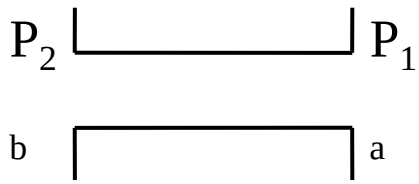
$$\Delta P = m_0 v_x$$

$$F_- = f' \cdot m_0 v_x = (\frac{1}{4} n_0 v_{ap} \pi \cdot D \cdot L)(m_0 v_x)$$

$$F_+ = F_-$$

$$(\frac{1}{4} n_0 v_{ap} \pi \cdot D \cdot L)(m_0 v_x) = \frac{1}{4}\pi D^2 (p_2 - p_1)$$

$$v_x = \frac{D}{L}(p_2 - p_1)\frac{kT}{p_0} \cdot \frac{1}{m_0 v_{ap}}$$



Проводимость каналов
Молекулярные условия

Движение столба с основанием ¼(πD²) со скоростью v_x эквивалентно объемной скорости течения:

$$S = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{4}\pi D^2 v_x$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = p\frac{dV}{dt} = \frac{1}{4}\pi D^2 p_0 \cdot v_x$$

$$I = 3.81\sqrt{\frac{T}{\mu}}\frac{D^3}{L}(p_2 - p_1)$$

[л/сек, К, г/моль, см^2]

$$G_L = \frac{I}{(p_2 - p_1)} = 3.81\sqrt{\frac{T}{\mu}}\frac{D^3}{L}$$

Проводимость основных элементов

Проводимость отверстий (молекулярные условия):

$$G_0 = 3.65\sqrt{\frac{T}{M_0}}A_0$$ л/сек, К, г/моль, см^2

Проводимость каналов (молекулярные условия):

$$G_L = 3.81\sqrt{\frac{T}{M_0}}\frac{D^3}{L}$$ л/сек, К, г/моль, см^3

Проводимость каналов (вязкостные условия):

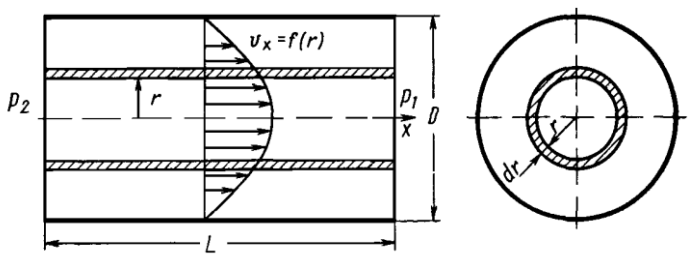
$$G = \frac{\pi}{128\eta_r}p_0\frac{D^4}{L} \qquad G = 181 p_0\frac{D^4}{L}$$

Зависимость проводимости канала при вязких условиях от рода газа

$$\frac{G_x}{G_{возд}} = \frac{\eta_{возд}}{\eta_x} = \frac{d_{0,x}^2}{d_{0,возд}^2}\sqrt{\frac{M_{0,возд}}{M_{0,x}}}$$ d_0 – диаметр молекулы

15

Проводимость канала. Вязкостные условия



$$F_+ = \pi r^2(p_2 - p_1)$$

$$F_- = \eta_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot L\frac{dv_x}{dr}$$

$$F_+ = F_-$$

$$F_+ = F_-$$

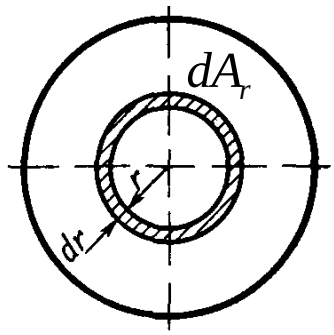
$$\pi r^2 (p_2 - p_1) = \eta_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dv_x}{dr}$$

$$v_x(r) = \frac{(p_2 - p_1)}{4\eta_r L} r^2 + const$$

$$r = D, v_x = 0 \Rightarrow const = \frac{(p_2 - p_1)}{4\eta_r L} \frac{D^2}{4}$$

$$v_x(r) = \frac{p_2 - p_1}{4 \cdot \eta_r \cdot L} \cdot \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right)$$

Элементарный объемный поток через кольцевую площадку ***dr****, находящуюся на радиусе* ***r****, её площадь* ***dA***

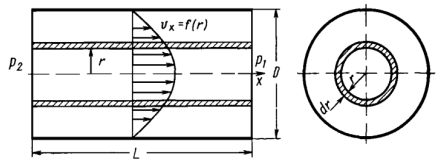


$$d\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p_0} = v_x dA_r = 2\pi \cdot v_x r \cdot dr$$

$$p_0 = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$$

$$d\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p_0} = 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \frac{p_2 - p_1}{4\eta_r L}\left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right) =$$

$$= \frac{\pi}{2\eta_r L}(p_2 - p_1) \cdot \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right) r dr$$



$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p_0} = \frac{\pi}{2\eta_r L}(p_2 - p_1)\int_0^{\frac{1}{2}D}\left(\frac{D^2}{4} - r^2\right)rdr =$$

$$= \frac{\pi}{128\cdot\eta_r}\cdot\frac{D^4}{L}(p_2 - p_1)$$

$$I = p_0\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p_0} = \frac{\pi}{128\cdot\eta_r}\cdot\frac{D^4}{L}(p_2 - p_1)p_0$$

Проводимость канала в вязкостных условиях

$$I = p_0\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p_0} = \frac{\pi}{128\eta_r}\cdot\frac{D^4}{L}(p_2 - p_1)p_0$$

$$G = \frac{I}{(p_2 - p_1)} = \frac{\pi}{128\eta_r}\cdot\frac{D^4}{L}p_0$$

$T = 293K, воздух$

$$G = 181p_0\cdot\frac{D^4}{L}$$

Проводимость основных элементов

Проводимость отверстий (молекулярные условия):

$$G_0 = 3.65\sqrt{\frac{T}{M_0}}A_0$$ л/сек, К, г/моль, см^2

Проводимость каналов (молекулярные условия):

$$G_L = 3.81\sqrt{\frac{T}{M_0}}\frac{D^3}{L}$$ л/сек, К, г/моль, см^3

Проводимость каналов (вязкостные условия):

$$G = \frac{\pi}{128\eta_r}p_0\frac{D^4}{L} \qquad G = 181 p_0\frac{D^4}{L}$$

Зависимость проводимости канала при вязких условиях от рода газа

$$\frac{G_x}{G_{возд}} = \frac{\eta_{возд}}{\eta_x} = \frac{d_{0,x}^2}{d_{0,возд}^2}\sqrt{\frac{M_{0,возд}}{M_{0,x}}}$$ d_0 – диаметр молекулы

21

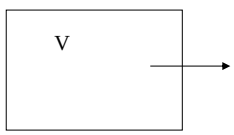
Скорость изменения давления при постоянном объеме

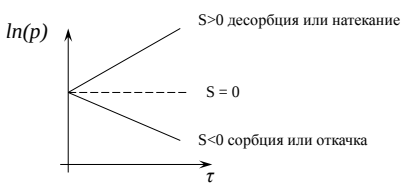
$$Q + dQ = pV + Vdp$$

$$dQ = Vdp$$

$$I = \frac{dQ}{d\tau} = V\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_v$$

$$I = \frac{dQ}{d\tau} = p\left(\frac{dv}{d\tau}\right)_p$$





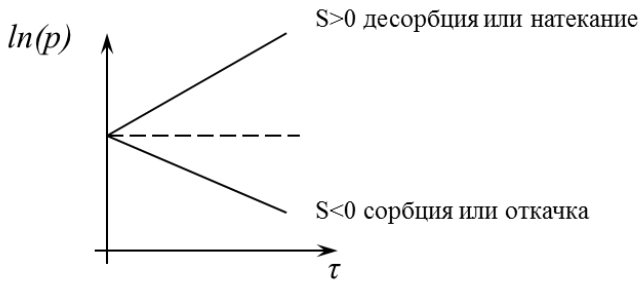
22

$$p\left(\frac{dv}{d\tau}\right)_p = V\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_v = pS \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dp}{d\tau} = \frac{S}{V}p \Rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{S}{V}d\tau \Rightarrow$$

$$\ln p = \frac{S}{V}\tau + const,\ p(\tau = 0) = p_0 \Rightarrow$$

$$p = p_0 \exp\left\{\frac{S}{V}\tau\right\}$$



23

Классификация вакуумных насосов

1. Проточные насосы (насосы, в которых удаление газа из сосуда создается за счет движения частиц газа)
2. Сорбционные насосы - статические насосы. Однако, они нуждаются в периодическом востановлении (регенерации) рабочего тела.

Предельное давление в вакуумной камере зависит от:

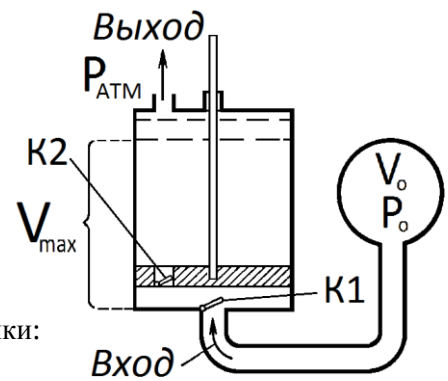
- Обратного потока газа в насосе.
- Давления насыщенных паров рабочего тела насосов, материала вакуумной камеры
- Натекания газа в вакуумную камеру через негерметичности

Как сделать вакуумный насос?

Принцип действия объемных насосов

Объемные насосы (насосы вытеснения) используются в настоящее время исключительно в технике. $p_0V_0 = p_1(V_0 + V_{max})$, где V_0 – объем откачиваемого сосуда, V_{max} – максимальный объем насоса. Можно за писать индукцию в зависимости от числа качаний

$$p_0V_0 = p_1(V_0 + V_{max})$$
$$p_1V_0 = p_2(V_0 + V_{max})$$
$$p_2V_0 = p_3(V_0 + V_{max})$$
$$\dots\ \dots$$
$$p_{N-1}V_0 = p_N(V_0 + V_{max})$$



тогда давление после N циклов откачки:

$$p_N = p_0\left(\frac{V_0}{V_0 + V_{max}}\right)^N = p_0\frac{1}{\left(1 + \frac{V_{max}}{V_0}\right)^N}$$

Принцип действия объемных насосов

$$p_N = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + V_{\max}}\right)^N = p_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{V_{\max}}{V_0}\right)^N}$$

т.е. чем больше отношение V_{max}/ V_0, тем меньшее количество циклов необходимо для того, чтобы получить требуемое низкое давление.

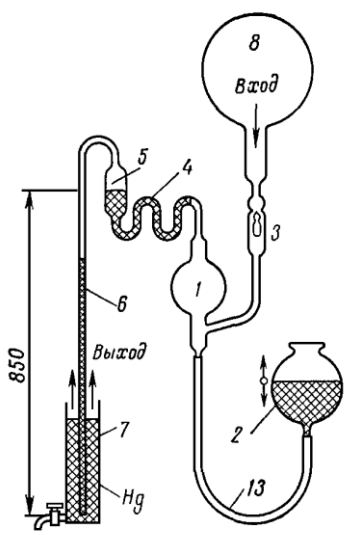
Таким образом, можно подсчитать конструктивную скорость откачки объемного насоса:

$$S_k = -\frac{dV}{d\tau} = N'(V_{\max} - V_{\min}) = N'V_{\max}\left(1 - \frac{V_{\min}}{V_{\max}}\right)$$

N' - частота движения поршня.

Это, так называемая, конструктивная скорость откачки, которая определяется частотой движения поршня и размерами камеры. Однако, увеличивать КСО можно увеличивая частоту и объем насоса, что приводит к удорожанию системы

Ртутные насосы вытеснения

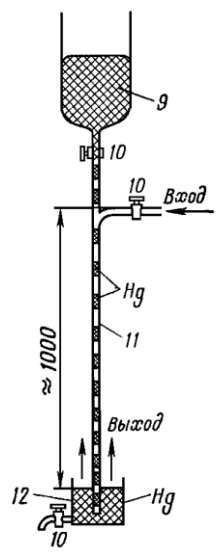


Бескрановый
(Теплера)

В бескрановом насосе при опускании баллона 2 газ засасывается через вход в камеру 1, затем при поднятии баллона 2 он выталкивается через ртутный затвор 4-5-6-7 в атмосферу (на выход)

В капельном насосе падающие капли ртути проталкивают газ от входа к выходу насоса

1 – камера;
2,5,7,9,12 – резервуары;
3 – обратный клапан;
4,6,11 - трубки;
8 – откачиваемый объем;
10 – кран;
13 – резиновый шланг



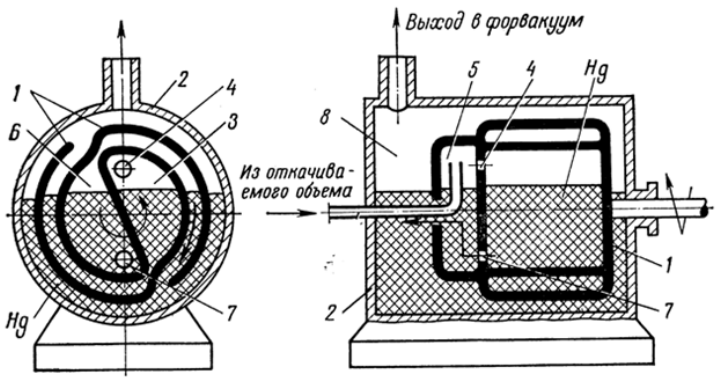
Капельный
(Шпренглера)

Классификация объемных насосов

1. Поршневые насосы (мембранные насосы)
2. Ротационные насосы
Ротационный ртутный насос Гёде

Ротационный ртутный насос Гёде, по существу, является газометром, вращающимся в обратном направлении. Фарфоровый или стальной ротор в виде спирального лабиринта с двумя или с тремя камерами вращается в цилиндрическом сосуде – статоре, наполненном до определенного уровня ртутью.

Max Paul Wolfgang Gaede (1878-1945)

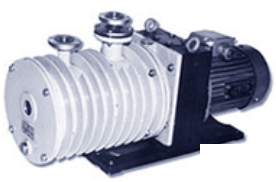


1 – ротор
2 – статор

3,5,6,8 – полости камеры

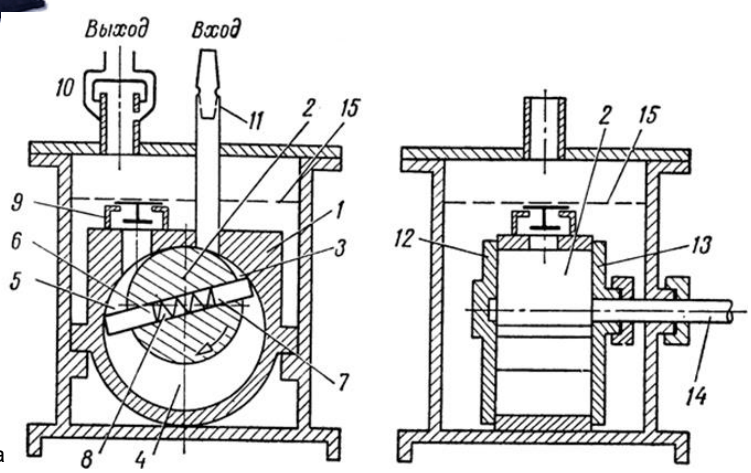
4,7 – отвестия

Ротационные масляные насосы

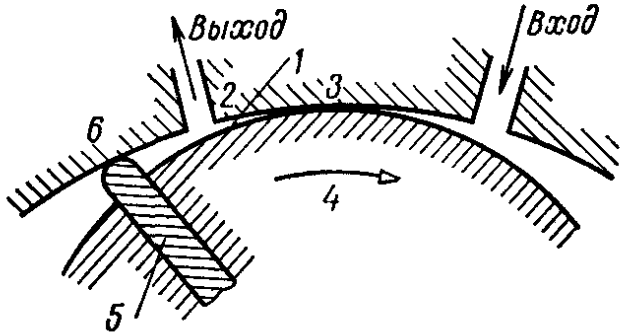


б) Ротационный масляный насос
б1) Ротационные насосы с золотниками в роторе
б2) Ротационные насосы с золотниками в статоре
б3)Ротационные насосы с газобалластом

1 – статор
2 – ротор
3,4,5 – части камеры
6,7 – золотки
8 – пружина
9 – обратный клапан
10 – маслоуловитель
11 – фильтр
12,13 – боковые крышки
14 – ось
15 – уровень масла

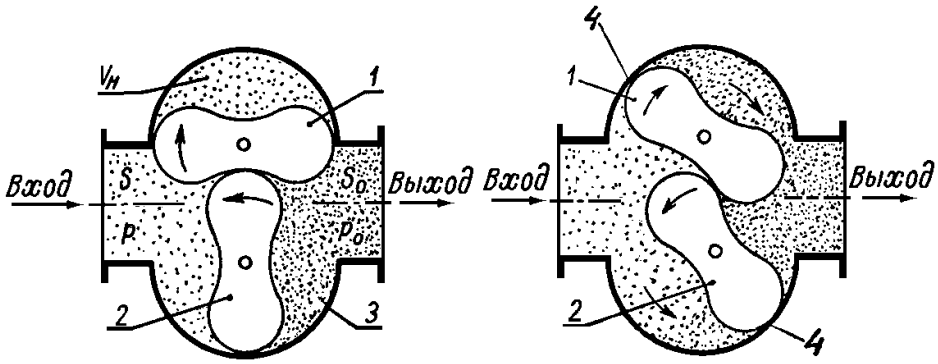


Мертвые объемы в золотниковом насосе



1 – мертвый объем
2, 3 – характерные точки
4 – ротор
5 – золотник
6 - статор

Бессмазочные ротационные насосы типа Рутса



1, 2 – роторы
3 – статор
4 – щели
$V_н$ – объём полости

Бессмазочные насосы типа Рутса

Эффективная скорость откачки определяется разностью выражений для двух потоков (прямого и обратного)

$I_+ = S_г p$, где $S_г$ – скорость откачки, зависящая от рабочего объема V_p меду ротором и статором и частоты вращения N' роторов.

$S_г = V_p N'_p$

Поток в обратном направлении, вызванный негерметичностью, выражается соотношением:

$I_- = G_H(p_0 - p)$, где

G_H - средняя проводимость негерметичностей, p_0 – давление на выходе из насоса, p – давление на входе в насос.

Эффективная скорость откачки определяется разностью двух потоков:

$$I_{эфф} = I_+ - I_- = S_г p - G_H(p_0 - p)$$

Тогда скорость откачки на входе в насос будет описыватьяс следующим выражением:

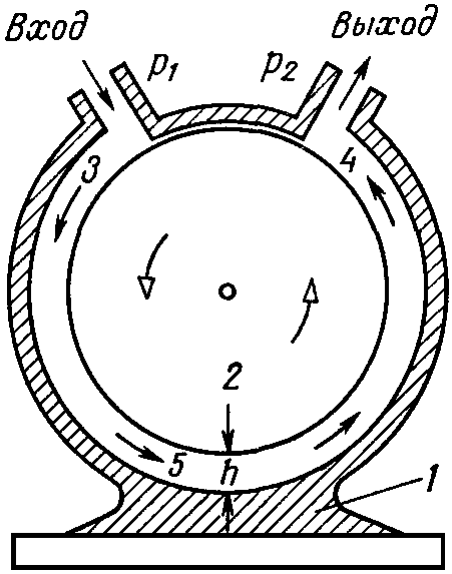
$$S = \frac{I_{эфф}}{p} = S_г - G_H\left(\frac{p_0}{p} - 1\right) = S_г\left[1 - \frac{G_H}{S_г}\left(\frac{p_0}{p} - 1\right)\right]$$

Таким образом, для увеличения скорости откачки необходимо стремиться, что бы отношение $\frac{G_H}{S_г}$ *было по возможности малым. Этого можно добиться уменьшая по возможности зазоры, увеличивая объем камеры и увеличивая с корость вращения роторов.*

Если положить **S=0**, то можно получить предельное давление:

$$p_\infty = \frac{p_0}{1 + \frac{S_г}{G_H}} \approx \frac{G_H}{S_г} p_0$$

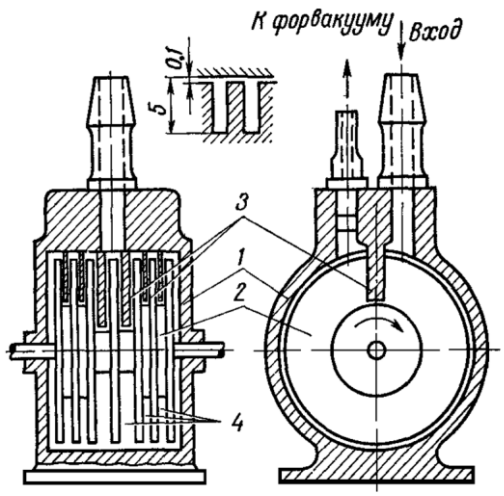
Молекулярные насосы



В молекулярных насосах частицы газа, ударяясь о быстро перемещающуюся поверхность, отражаются от нее с дополнительной составляющей скорости в направлении движения поверхности.

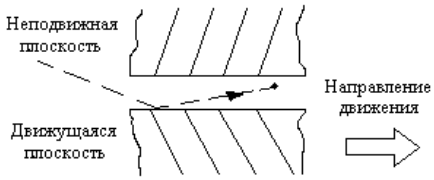
1 – статор
2 – Ротор
3, 4, 5 – Участки кольцевого канала

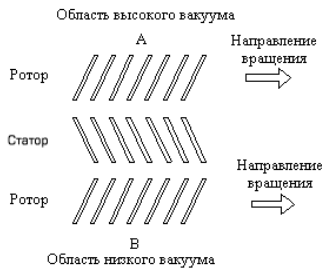
Молекулярный насос Геде



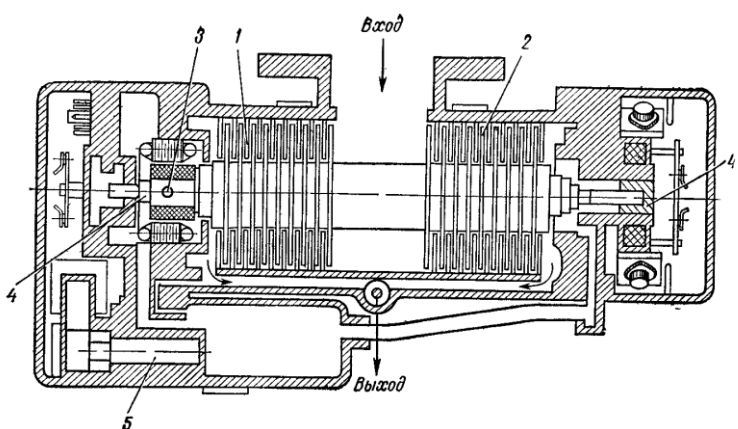
1 – статор
2 – Ротор
3 – перегородка
4 – каналы в роторе

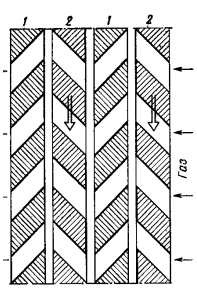
Турбомолекулярные насосы





Устройство турбомолекулярного насоса





1, 2 – лопатки
3 – двигатель
4 – подшипники
5 – масляный насос для смазки подшипников

Скоростные насосы

Струйные насосы

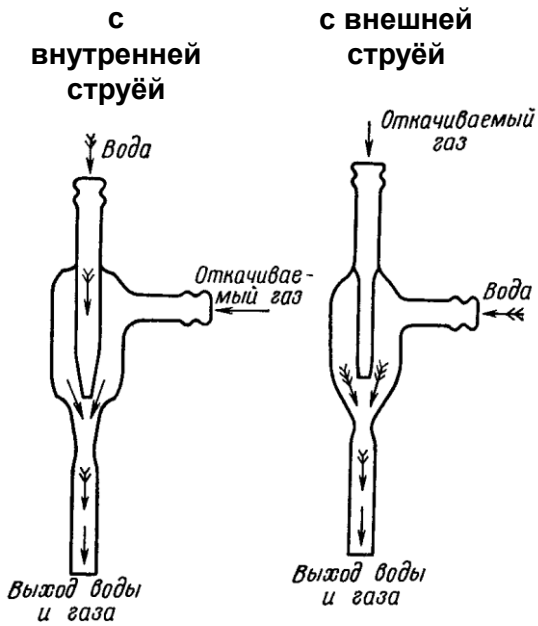
В струйных насосах частицам газа сообщается дополнительная скорость (в направлении откачки) от струи рабочего тела. Грубо струйные насосы можно разделить в зависимости от вида рабочего тела насоса на:

1) Жидкостные насосы *(вода, спирт и т.д.). Выбор рода жидкости зависит от требований к давлению насыщенных парод, химических свойств и т.д.*

2) Газовые насосы. *Рабочим телом является струя газа (обычно используют воздух, в некоторых химических реакторах используют один из газов-реагентов).*

3) Пароструйные насосы. *Используют пары воды, ртути, или масел (эфирные масла, нефтяные масла).*

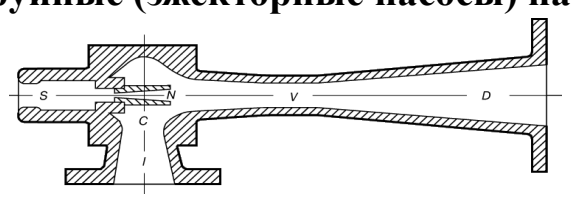
Водоструйный насос



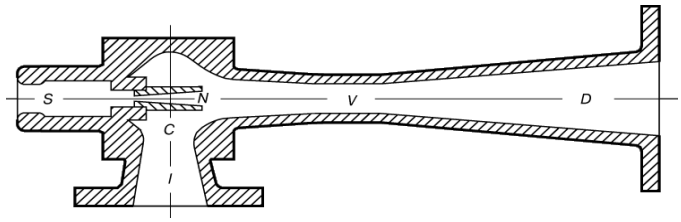
В водоструйных насосах вода из конического сопла под большим давлением попадает в конический канал, угол сходимости которого несколько меньше, чем угол конуса воды. Рядом с поверхностью воды возникает поток газа, который увлекается вместе с водой в выходной канал и удаляется из насоса. Потребление воды насосом зависит от производительности насоса, давления жидкости. Хорошо спроектированный водоструйный насос позволяет достичь давления, равного давлению насыщенных паров жидкости. К примеру, коммерческий водоструйный насос фирмы Leybold создает предельный вакуум ~ 10-20 Торр, при скорости откачки 0,1 лит/сек, давление воды при этом 2,8 атм.

В воздушном струйном насосе (воздушном эжекторе) для создания струи используют сухой очищенный воздух при давлении 5 – 10 атм.

Пароструйные (эжекторные насосы) насосы.



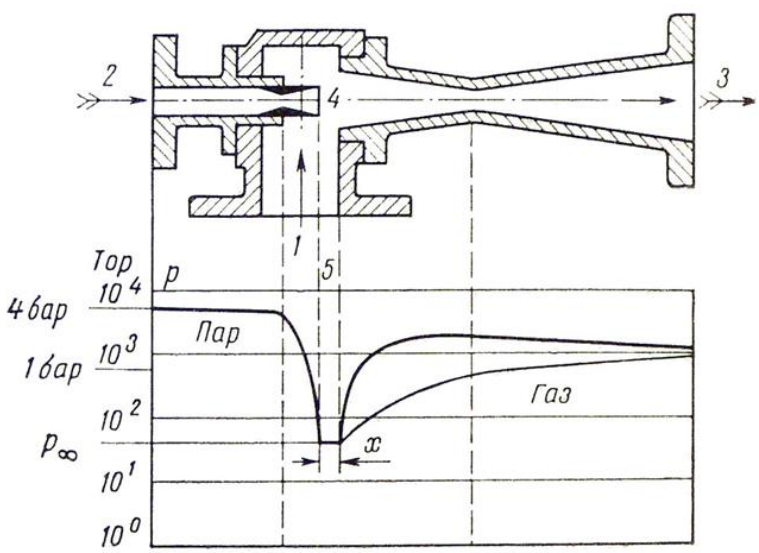
В пароструйных эжекторных насосах рабочим телом является струя пара воды, масла или ртути. Пар при определенном давлении генерируется в паровом котле и передается в эжектор насоса, где за счет давления сжатого пара формируется высокоскоростная струя. Паровая струя захватывает откачиваемый газ и направляется в сопло Лаваля, где она тормозится с частичным преобразованием кинетической энергии в потенциальную. Скорость истечения пара из сопла зачастую достаточно высока, порой превышая скорость звука. Далее пар, вместе с окачиваемым газом увлекается в пространство диффузора, где за счет расширения тормозится и конденсируется и возвращается в паровой котел.



Паровые эжекторные насосы позволяют достигать давлений ~ 0.5 Торр (обычно в двухступенчатом варианте) и обеспечивают большие скорости откачки.

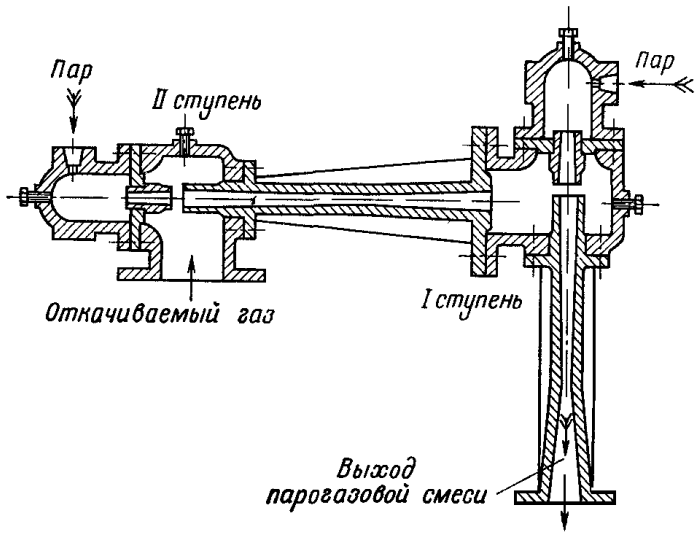
Не стоит забывать, что пароструйные насосы так же ипользуют в качестве т.н. промежуточных (бустерных) насосов для откачки выхода, например, масляного диффузионного насоса. Мало того, масляные и ртутные эжекторные насосы позволяют достигать скоростей откачки вплоть до 1 лит/сек при давлении порядка 10^{-3} Торр.

Мало того, скорости откачки больших промежуточных насосов могут достигать нескольких десятков тысяч литров в секунду при диапазоне рабочих давлений до 10^{-4} Торр, при мощности нагревателя до 100 кВт, количестве масла несколько сот литров, вес насоса – несколько тонн, при расходе охлаждающей воды до нескольких тысяч литров в час, однако время прогрева от 10 минут до 1 часа.

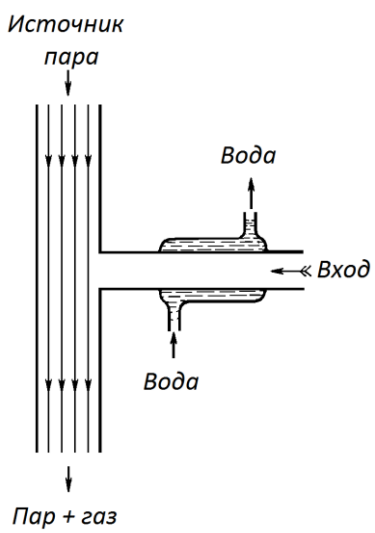


1 – подача откачиваемого газа; 2 – подача откачиваемого пара; 3 – выход парогазовой смеси; 4 – сопло; 5- межсопловой зазор

Двухступенчатый эжекторный пароструйный насос Морзе

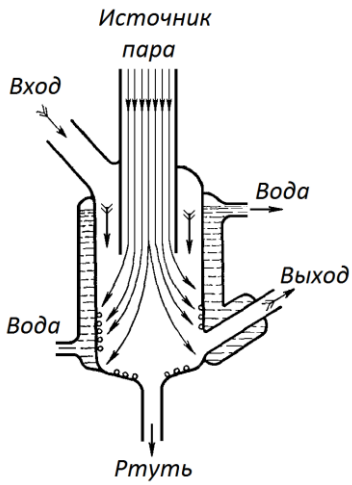


Диффузионные пароструйные насосы



В диффузионном насосе откачка осуществляется за счет диффузии молекул откачиваемого газа в струю паров ртути или масла (рабочего тела насоса), которая переносит его к выходу из насоса.

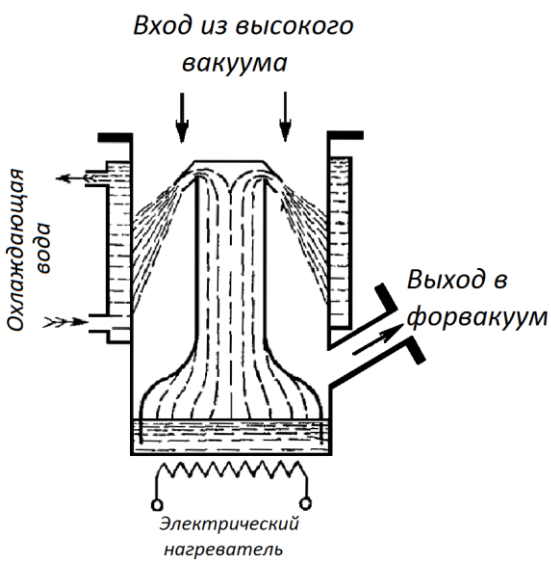
Диффузионный насос Геде



Диффузионный насос Ленгмюра

47

Диффузионный насос



По принципу работы диффузионный насос напоминает пароструйный, однако в отличии от эжекторного насоса, который работает при достаточно высоком давлении, диффузионному насосу, наоборот, требуется предварительная откачка на выходе до долей Торр.

48

Предельное давление диффузионного насоса

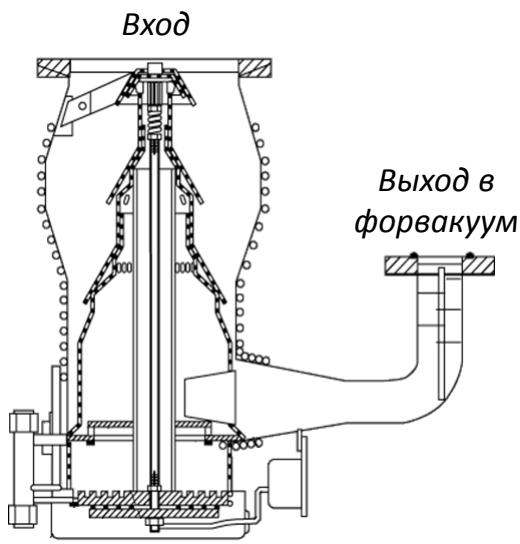
Предельное давление определяется равенством прямого и обратного потоков газа. Отношение предельного давления p_∞ к давлению форвакуума на выходе p_1 дается соотношением:

$$\frac{p_1}{p_\infty} = \exp\left(\frac{v_n}{D_{гп}} L\right)$$

где $v_п$ – скорость паровой струи, $D_{гп}$ – коэффициент диффузии газа в паровом потоке, L – т.н. путь откачивания (толщина струи пара).

Т.е. при заданном форвакуумном давлении нужно стараться увеличивать скорость паровой струи и её толщину, одновременно уменьшая коэффициент диффузии. Таким образом, характеристики диффузионного насоса зависят от конструкции, рода рабочего тела и характера откачиваемого газа.

Многоступенчатые диффузионные насосы

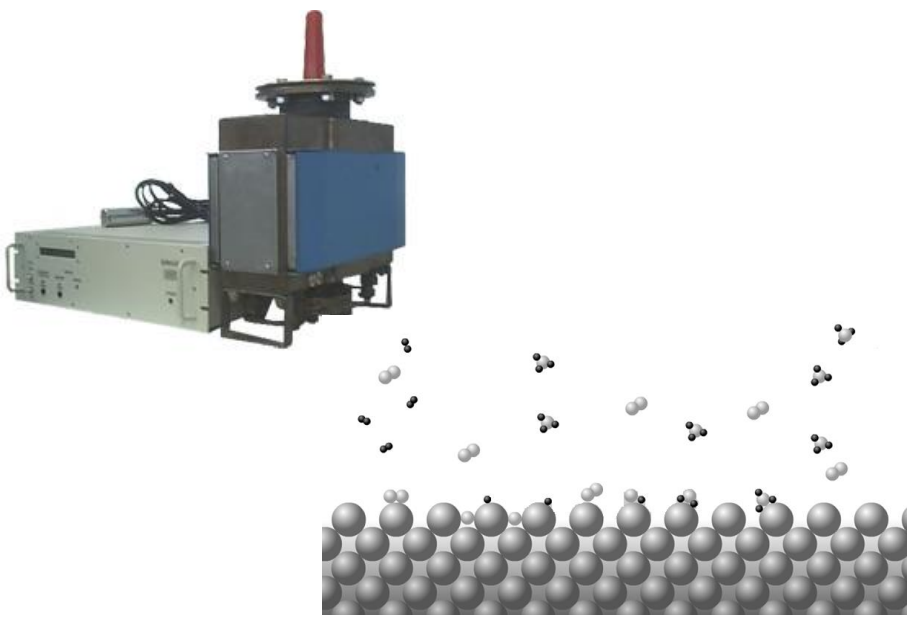


Ртутные диффузионные насосы

Принципиальных различий между ртутными и масляными насосами нет, однако приемлемое давление (до 10^{-9} Торр) насыщенных паров ртути достигается только при азотных температурах, а давление ~ $1 \cdot 10^{-6}$ Торр при температуре твердого углекислого газа (сухого льда), а это температура 199K. Таким образом, при работе с ртутными насосами желательно использовать вымораживание. Мало того, для ртутных насосов кроме более мощного охлаждения, нужно использовать и более мощные нагреватели.

В настоящее время ртутные насосы используют лишь в исключительных случаях, когда, например, нужно создать сверхнизкое давлении в камере, причем в объеме должны отсутствовать органические вещества.
При проектировании диффузионных насосов для избавления от паров рабочего тела используют различные виды масляных отражателей (змеевики, дефлегматоры и т.д.), фильтры и охлаждаемые ловушки.

Сорбционная откачка



Криогенные насосы

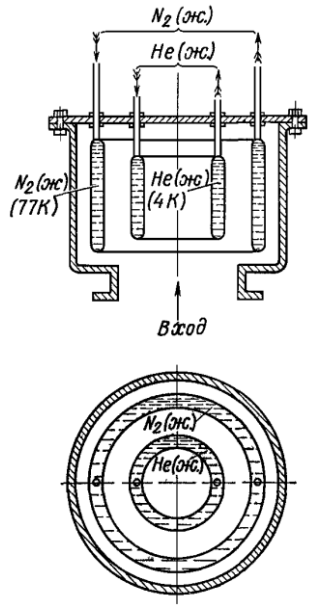
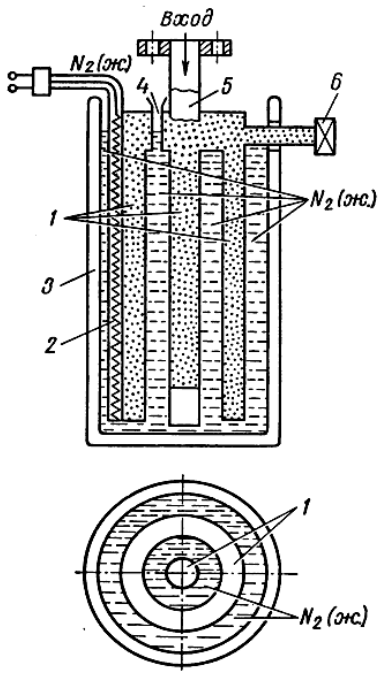


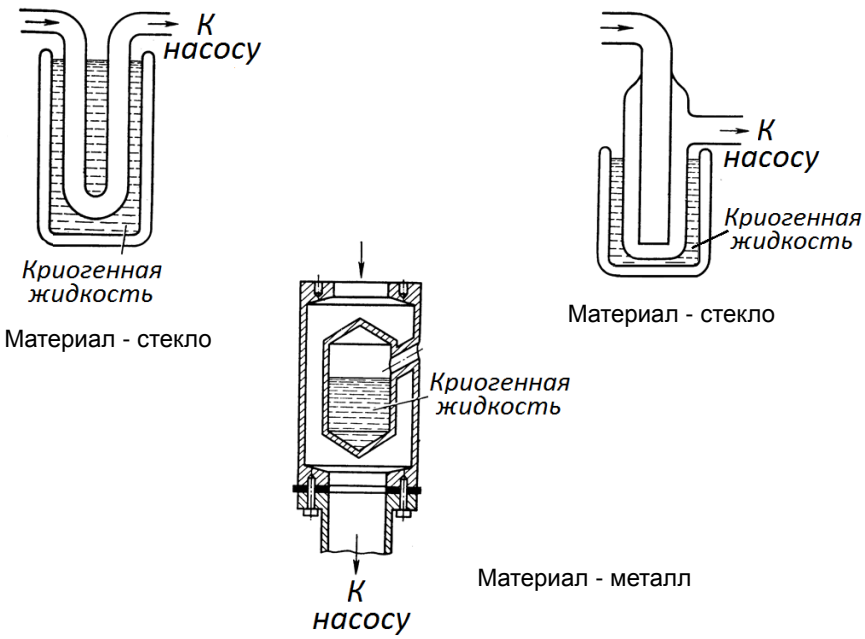
Схема криогенного гелиевого насоса с экраном на жидком азоте



Цеолитовый криогенный насос

1 – цеолит
2 – подогреватель
3 – сосуд для жидкого азота
4 – заправочная горловина
5 – металлическая сетка
6 – предохранительный клапан

Охлаждаемые ловушки



Ионные насосы

Прототипом ионных насосов является вакуумный манометр Пенинга, в котором при измерении давления происходит заметное откачивание газов.

Для откачки химически неактивных газов ионы таких веществ сильно ускоряют электрическим полем и потом замуровывают в стенку слоями сорбированных молекул.

Насосы с горячим катодом (термокатодные)

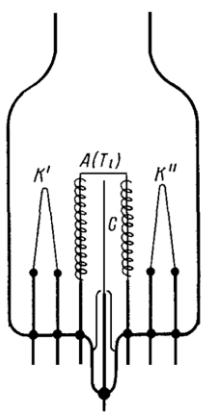
Прототипом такого насоса является вакуумный триодный манометр, в котором ионизация остаточного газа производится бомбардировкой электронами, движущимися между катодом и анодом. Образовавшиеся ионы сорбируются на коллекторе и стенках камеры.

В настоящее время такие насосы практически не используют.

Ионно-сублимационные насосы

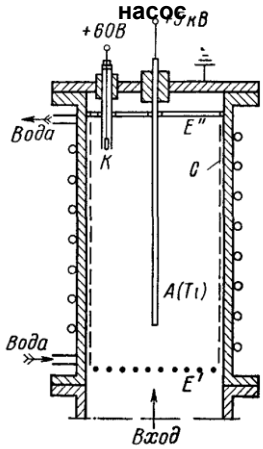
Наибольшее распространение получили ионно-сублимационные насосы с подачей титана. Такой насос представляет собой своего рода цилиндрический триод, в котором катод имеет потенциал, в несколько раз больший, чем цилиндрический анод(сетка), а наружный цилиндр заземлен. На оси катода располагается тигель с титаном, который подогревается бомбардирующими электронами. Ионизация газа производится все теми же электронами, а титан способствует осаждению и замуровыванию молекул.

Ионно-сублимационный насос в стеклянном корпусе



K', K'' - Катоды
C - коллектор
A(Ti) - покрытый титаном анод

Электростатический ионно-сублимационный насос

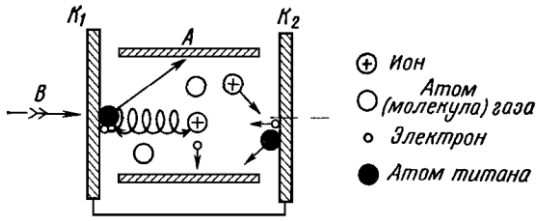


K - катод
A(Ti) - титановая проволока (анод)
C - коллектор с напыленным слоем титана
E',E'' - экраны

Насосы с холодным катодом (электроразрядные)

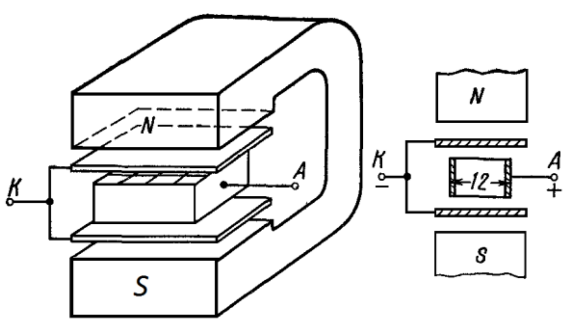
В ионных насосах с холодным катодом под действием высокого напряжения в разреженном газе между двумя электродами появляется тлеющий разряд. При этом происходит ионизация газа, в результате чего образуются ионы и электроны. Разряд в газе поддерживается благодаря тому, что электроны ударяются о катод и вызывают эмиссию электронов из него. Эмиссия электронов приводит к дальнейшей ионизации. Такой процесс называют тлеющим разрядом. Тлеющий разряд легче получить в присутствии магнитного поля, которое способствует удержанию электронов.

При возникновении тлеющего разряда металл с поверхности катода начинает испаряться и оседает на стенках камеры, образуя чистую сорбирующую поверхность.



A - цилиндрический анод
K_1, K_2 - два элемента титаного катода
B - индукция магнитного поля

Электроразрядный диодный насос (с холодными электродами)



Магнитный электроразрядный насос