



Курс «**Пучковые технологии**»

Профессор, д.т.н. **С.Ю. Соковнин**



Лекции 1

ВАКУУМ:

Физические свойства

Получение

Измерение



1.1. Физические положения



Основные постулаты

1. газ состоит из отдельных движущихся молекул;
2. существует постоянное распределение молекул по скоростям; одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул;
3. при движении молекул газа нет преимущественных направлений, т.е. пространство газовых молекул изотропно;
4. температура газа – величина пропорциональная средней кинетической энергии молекул;
5. при взаимодействии с поверхностью твердого тела молекула газа адсорбируется.



Уравнение газового состояния

$$p = \frac{Nm}{VM} RT$$

- M – молекулярная масса;
- V – объем газа;
- N – число молекул;
- m – масса молекулы
- R – универсальная газовая постоянная,
 $R = kN_A = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(К моль) - численно равна работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К.
- k - постоянная Больцмана,
- N_A – число Авогадро, $N_A = M/m = 6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹



Объем газа, ударяющийся о единицу поверхности в единицу времени с учетом распределения по скоростям:

$$V_q = \frac{N_q}{n} = v_{ap} / 4$$

v_{ap} - среднеарифметическая скорость молекул.

Максимальная быстрота действия идеального вакуумного насоса:

$$N_q = n v_{ap}$$

где N_q – число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени с учетом распределения по скоростям



Единицы измерения давления:

Внесистемная единица давления 1 мм рт.ст.

1 мм рт.ст. = $133,32239 \text{ Н/м}^2$

плотность ртути $13595,1 \text{ кг/м}^3$ (при 0°C)

земное ускорение 9.80665 м/с^2

широта $45,0^\circ$

1 бар = 10^5 Па

1 физ. ат. = $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Перевод единицы измерения давления:

| Единица | Па | Мбар | мм рт. ст. | атм |
|------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Па | 1 | 10^{-2} | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | $9,87 \cdot 10^{-6}$ |
| Мбар | 10^2 | 1 | 0,75 | $9,87 \cdot 10^{-4}$ |
| мм рт. ст. | $1,33 \cdot 10^2$ | 1,33 | 1 | $1,32 \cdot 10^{-3}$ |
| атм | $1,01 \cdot 10^5$ | $1,01 \cdot 10^3$ | 760 | 1 |



Нормальные условия для воздуха:

давление 10^5 Па

температура 273 К

объем, занимаемый 1 кмоль 22,4 м³.

концентрация воздуха $n=2,7*10^{25}$ м⁻³

среднеарифметическая скорость $v_{ap}=400$ м/с

частота соударений молекул с

поверхностью твердого тела $N_q=2,7*10^{27}$ м⁻²с⁻¹

объем газа, ударяющий о поверхность

твердого тела $V_q=100$ м³/(с*м²)



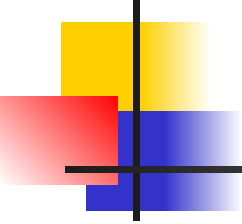
Длительность свободного пробега:

$$L_0 = u / \nu_c = 1 / \pi \sigma^2 n$$

- n – число молекул в единичном объеме
- ν_c – число соударений за секунду
- σ - эффективный объем

С учетом распределения скоростей:

$$L = \frac{1}{\pi \sqrt{2} \sigma^2 n} = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} \sigma^2 p}$$



Частоты столкновений между молекулами K_m обратно пропорциональна средней длине свободного пути: $K_m = v_{ap}/L$.
Общее число соударений K_c со стенками камеры $Snv_{ap}/4$,
приходящегося на nV молекул со стенкой в ед. времени на молекулу:

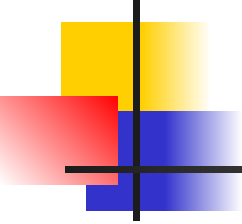
$$K_c = S v_{ap} / (4V) = v_{ap} / d_{эф}$$

Где:

S – площадь поверхности стенок, соприкасающихся с разреженным газом,

V – объем камеры,

$d_{эф} = 4V/S$ – эффективный размер вакуумной камеры.



Для молекулы газа внутри сферического сосуда диаметром D
эффективный размер камеры:

$$d_{\text{эф}} = (2/3)D,$$

для трубы бесконечной длины с диаметром D :

$$d_{\text{эф}} = D,$$

для двух бесконечных параллельных поверхностей,
расположенных на расстоянии D друг от друга:

$$d_{\text{эф}} = 2D$$



Степени вакуума физический подход

Отношение K_c/K_m критерий Кнудсена:

$$K_n = K_c/K_m = L/d_{эф}$$

Из условий течения молекул газа

- **Низкий вакуум (ламинарное)** – взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумной камеры. $K_n \ll 1$. Длина свободного пробега значительно меньше размеров вакуумной камеры.
- **Средний вакуум** – частоты соударений молекул друг с другом и со стенками камеры одинаковы, $L \approx d_{эф}$, а $K_n \approx 1$
- **Высокий вакуум (молекулярное)** – столкновения молекул газа со стенками камеры преобладают над взаимными столкновениями молекул газа. $K_n > 1$



Степени вакуума технический подход

- Низкий вакуум – 10^2 - 10^4 Па;
- Средний вакуум – 100 - 0,1 Па;
- Высокий вакуум – 10^{-5} Па и менее.

Основные отличия состоят в используемых:

- насосах для откачки;
- типах используемой запорной аппаратуры;
- материалах для изготовления камер;
- материалах, способах и видах соединений и прокладок;
- способах измерения вакуума.



Номинальные условные проходы по ГОСТ 6536-69:

Для средств получения вакуума (насосы, агрегаты), элементов вакуумных систем (клапаны, ловушки, натекатели) и фланцевых соединений манометрических преобразователей

по ряду Ra5: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400....6300 мм.

Обозначение: $D_y = 100$.

Для специальных технологических конструкций (фланцевых, штуцерных соединений, трубопроводов) соединений

по ряду Ra10: 8, 12, 20, 32, 50, 80, 125, 200, 320....5000 мм.

Обозначения в принципиальных вакуумных схемах по ГОСТ 2.797-81

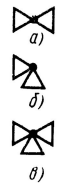


| Элемент вакуумной схемы | Условное графическое изображение |
|--|----------------------------------|
| <p>Насос вакуумный. Общее назначение</p> <p>Примечание. Стрелки можно не изображать, если это не приведет к неправильному пониманию обозначения</p> | |
| <p>Насос вакуумный механический:</p> <p><i>a</i> — общее назначение <i>б</i> — вращательный объемный (пластинчато-роторный, пластинчато-статорный, плунжерный) без газобалласта и газобалластный <i>в</i> — двухроторный (насос Рутса) <i>г</i> — турбомолекулярный <i>д</i> — волокоольцевой <i>е</i> — вращательный объемный, трехступенчатый</p> | |
| <p>Насос вакуумный струйный:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение <i>б</i> — эжекторный <i>в</i> — диффузионный</p> <p>Примечание. Вместо знака <i>x</i> можно указывать химическую формулу жидкости (например, вода — H₂O, масло — CH, ртуть — Hg и др.)</p> | |
| <p>Насос вакуумный сорбционный:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение <i>б</i> — адсорбционный <i>в</i> — испарительный геттерный <i>г</i> — криосорбционный <i>д</i> — испарительный ионный <i>е</i> — магнитный электроразрядный <i>ж</i> — криогенный <i>з</i> — комбинированный (комбинация геттерного и магнитного электроразрядного насосов, размещенных в едином корпусе)</p> <p>Примечание. Вместо знака <i>x</i> можно указывать химическую формулу сорбента</p> | |

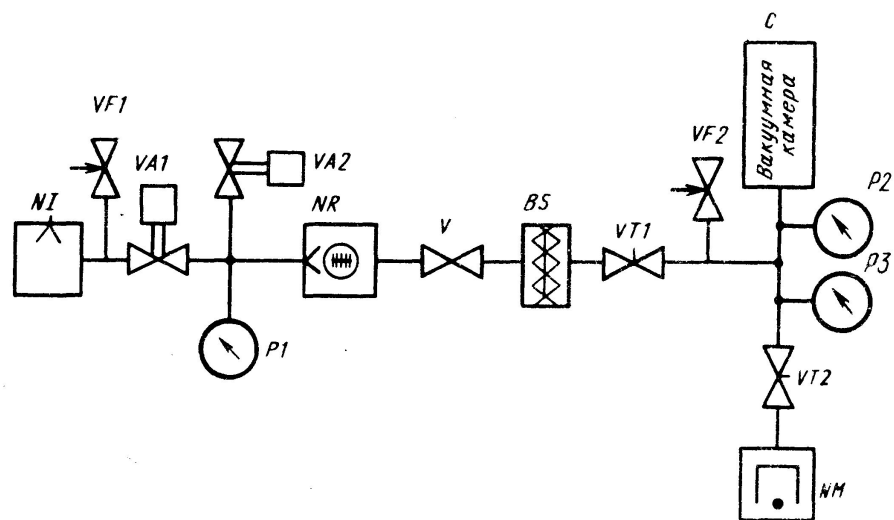
| Элемент вакуумной схемы | Условное графическое изображение |
|--|----------------------------------|
| <p>Ловушка (отражатель):</p> <p><i>a</i> — общее обозначение <i>б</i> — охлаждаемая циркулирующей жидкостью <i>в</i> — охлаждаемая воздухом <i>г</i> — охлаждаемая жидкостью, заливаемой в резервуар <i>д</i> — термоэлектрическая <i>е</i> — сорбционная <i>ж</i> — ионная</p> <p>Примечание. Вместо знака <i>x</i> можно указывать температуру охлаждаемой поверхности</p> | |
| <p>Вакуумметр:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение <i>б</i> — деформационный <i>в</i> — жидкостный <i>г</i> — ионизационный <i>д</i> — магнитный электроразрядный <i>е</i> — тепловой</p> | |
| <p>Теческатель</p> | |
| <p>Масс-спектрометр</p> | |
| <p>Камера вакуумная:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение <i>б</i> — колпак вакуумный <i>в</i> — прогреваемая часть вакуумной системы</p> | |

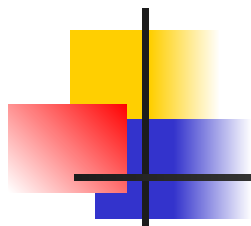
Обозначения в принципиальных вакуумных схемах по ГОСТ 2.797-81

| Элемент вакуумной схемы | Условное графическое изображение | Элемент вакуумной схемы | Условное графическое изображение |
|--|----------------------------------|---|----------------------------------|
| <p>Сосуд Дьюара:</p> <p><i>a</i> — открытые</p> <p><i>б</i> — закрытый</p> | | <p>Конец вакуумного трубопровода с заглушкой (пробкой):</p> <p><i>a</i> — общее обозначение</p> <p><i>б</i> — фланцевый</p> <p><i>г</i> — штуцерный</p> | |
| <p>Трубопровод вакуумный</p> <p>Примечание. Направление газового потока при откачке в случае необходимости показывают стрелкой</p> | | <p>Детали соединений вакуумных трубопроводов:</p> <p><i>a</i> — тройники</p> <p><i>б</i> — крестовины</p> <p><i>в</i> — колена, отводы</p> <p><i>г</i> — гребенка</p> <p><i>д</i> — шланг вакуумный</p> <p><i>е</i> — компенсатор сильфонный</p> <p><i>ж</i> — патрубки со штуцерным и фланцевым соединениями</p> <p>Примечания: 1. При обозначении конструктивного оформления соединения элементов вакуумного трубопровода с сопрягаемыми деталями следует пользоваться обозначениями, принятыми для разъемных соединений.</p> <p>2. Обозначения элементов допустимо изображать в соответствии с их действительной конфигурацией (см., например, вариант <i>ж</i>)</p> | |
| <p>Соединение вакуумных трубопроводов:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение</p> <p><i>б</i> — неразъемное (сварное, паяное, завальцованное)</p> | | <p>Соединение элементов вакуумных трубопроводов разъемное:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение</p> <p><i>б</i> — фланцевое</p> <p><i>в</i> — штуцерное</p> <p><i>г</i> — муфтовое эластичное</p> | |
| <p>Перекрещивание вакуумных трубопроводов (без соединения)</p> | | <p>Вентиль, клапан:</p> <p><i>a</i> — проходной</p> <p><i>б</i> — угловой</p> <p><i>в</i> — с задвижкой</p> <p><i>г</i> — трехходовой</p> <p><i>д</i> — дроссельный</p> <p><i>е</i> — предохранительный</p> <p><i>ж</i> — запорный быстродействующий на открытие</p> <p><i>з</i> — запорный быстродействующий на закрытие</p> | |
| <p>Конец вакуумного трубопровода под разъемное соединение:</p> <p><i>a</i> — общее обозначение</p> <p><i>б</i> — фланцевое</p> <p><i>в</i> — штуцерное</p> <p><i>г</i> — муфтовое эластичное</p> | | <p>Затвор поворотный</p> | |

Обозначения в принципиальных вакуумных схемах по ГОСТ 2.797-81

| Элемент вакуумной схемы | Условное графическое изображение |
|--|---|
| Кран: а — проходной б — угловой в — трехходовой |  |
| Натекатель, клапан регулирующий |  |
| Шайба дроссельная, сужающее устройство расходомерное (диафрагма) |  |





1.2. Получения вакуума



Классификация насосов

по назначению:

- сверхвысоковакуумные
- высоковакуумные
- средневакуумные
- низковакуумные

по принципу действия:

- механические
- физико-химические

Скорость откачки насоса S_i в произвольном сечении соединительного трубопровода

$$S_i = dV_i / dt$$

Скорость откачки объекта

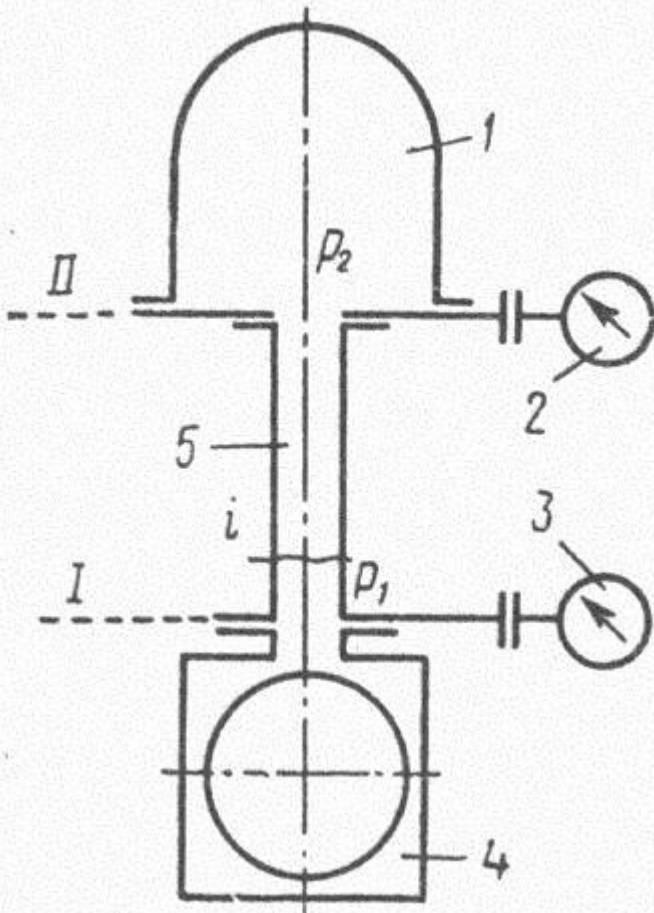
$$S_{эф} = dV_2 / dt$$

Скорость действия насоса

$$S_n = dV_1 / dt$$

КПД использования насоса

$$K_u = \frac{S_{эф}}{S_n}$$





Основное уравнение вакуумной техники

Для стационарного потока Q выполняется условие сплошности:

$$Q = p_1 S_n = p_2 S_{эф} = p_i S_i,$$

p_i – давление в i -м объёме.

Из уравнения стационарной диффузии газа в элементе вакуумной системы, уравнения газового состояния и условий сплошности:

$$1/S_{эф} = 1/S_n + 1/U$$

U – проводимость элемента вакуумной системы $\text{м}^3/\text{с}$



Быстрота откачки объекта определяется:

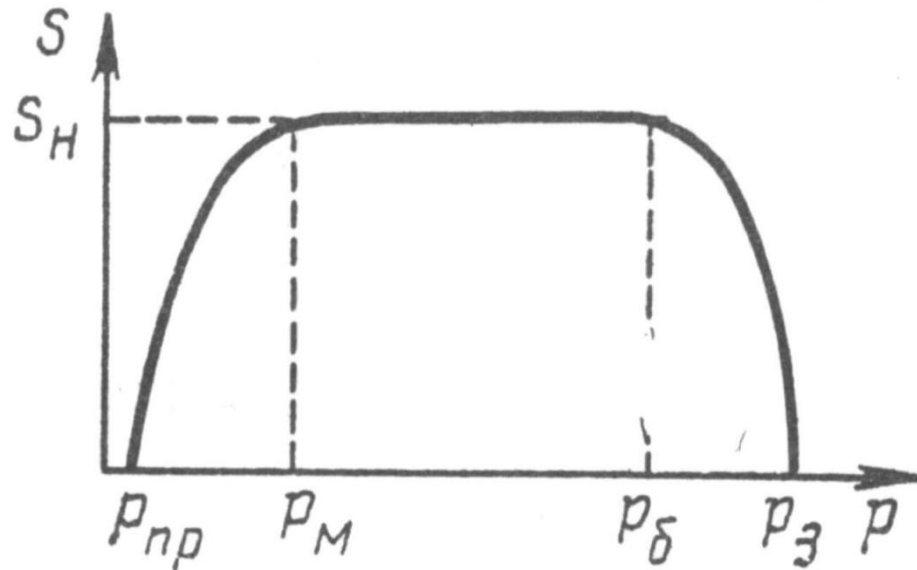
$$S_{\text{эф}} = S_{\text{н}} U / (S_{\text{н}} + U)$$

При условии $S_{\text{н}} = U$ получается, что $S_{\text{эф}} = 0,5S_{\text{н}}$.

Если $U \rightarrow \infty$, то $S_{\text{эф}} \rightarrow S_{\text{н}}$;

при $U \rightarrow 0$ следует, что $S_{\text{эф}} \rightarrow 0$.

Зависимость быстроты действия от давления на входе – основная характеристика насоса



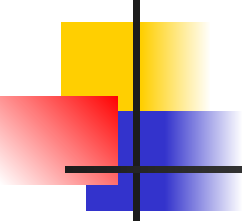


Основные параметры вакуумного насоса:

- S_n быстрота действия
- $p_{пр}$ предельное давление (без объекта)
- p_m наименьшее рабочее давление
- $p_{б}$ наибольшее рабочее давление
- $p_з$ наибольшее давление запуска



1.3. Механические вакуумные насосы



Классификация механических вакуумных насосов по принципу откачки:

- **объемные** -откачка осуществляется за счет периодического изменения объема рабочей камеры;
- **молекулярные** – откачка за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной быстродвижущейся поверхности



В процессе объемной откачки происходит:

1. всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса;
2. уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящихся в ней газа;
3. удаление сжатого газа в атмосферу или насос предварительного сжатия.



Объемные насосы подразделяются на:

- Поршневые.
- Жидкостно-кольцевые.
- Ротационные
- Плунжерные.



Поршневые насосы

откачка осуществляется за счет периодического изменения объема цилиндра

предельное давление $4 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Па.

быстрота действия 10...4000 л/с

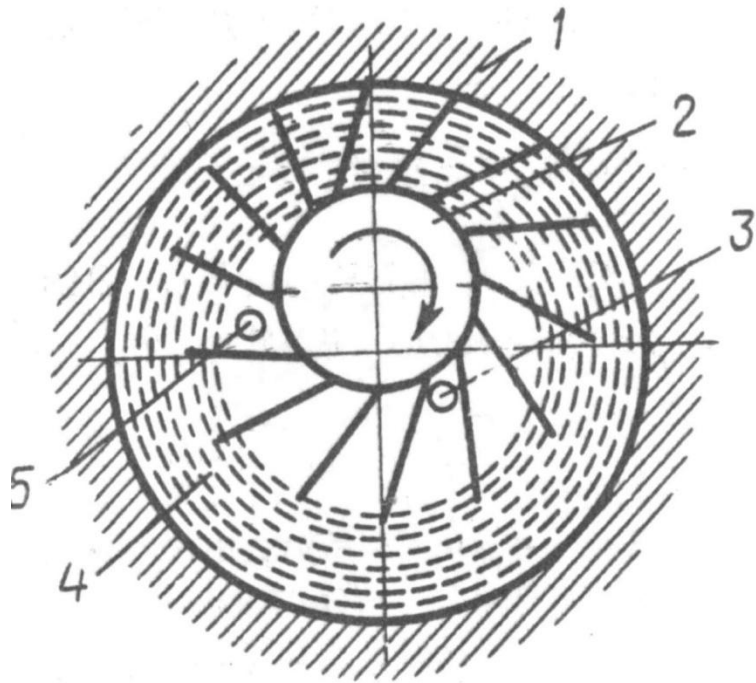
Достоинство:

начинают работать от атмосферного давления

Недостаток:

большие потери на трение

Жидкостно-кольцевые насосы

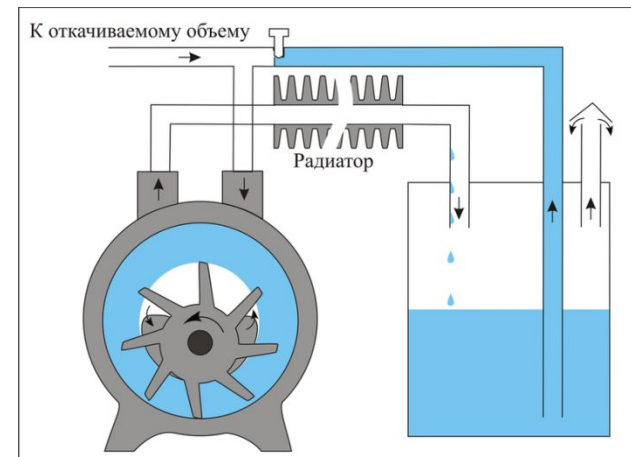


Рабочая жидкость – вода (жидкости, щелочи, органические жидкости) при вращении отбрасывается к корпусу. Принцип действие – уменьшение объема рабочих ячеек при вращении, давление возрастает и газ поступает в нагнетательное окно при его проходе.

1 – корпус, 2 – рабочее колесо с лопатками, 3 – всасывающее окно, 4 – рабочая жидкость, 5 – нагнетательное окно.

Достоинства жидкостно-кольцевых насосов:

- проще поршневых и надежны;
- имеют низкий уровень шума;
- процесс откачки близок к изотермическому, что позволяет откачивать пожаро- и взрывоопасные жидкости;
- наличие жидкого кольца позволяет откачивать газ с каплями жидкости и частицами пыли;
- при подборе жидкости можно откачивать агрессивные газы, например с серной кислотой откачивают хлор;
- работают от атмосферного давления.





Недостатки жидкостно-кольцевых насосов:

- высокие затраты энергии на вращение жидкости, что приводит к низкому КПД;
- высокое предельное остаточные давление – 2-3 кПа;
- относительно большие габариты из-за небольшой окружной скорости.



Области применения жидкостно-кольцевых насосов:

- химическая промышленность;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- горнодобывающая промышленность;
- текстильная промышленность;
- стальная промышленность (дегазация стали);
- пищевая промышленность;
- фармацевтическая промышленность;
- коммунальное и сельское хозяйства,

Производители:

ОАО «ВАКУУММАШ», г. Казань

Finder Pompe SpA, Италия <http://www.tako-vakuum.ru>

Технические характеристики насосов ВВН

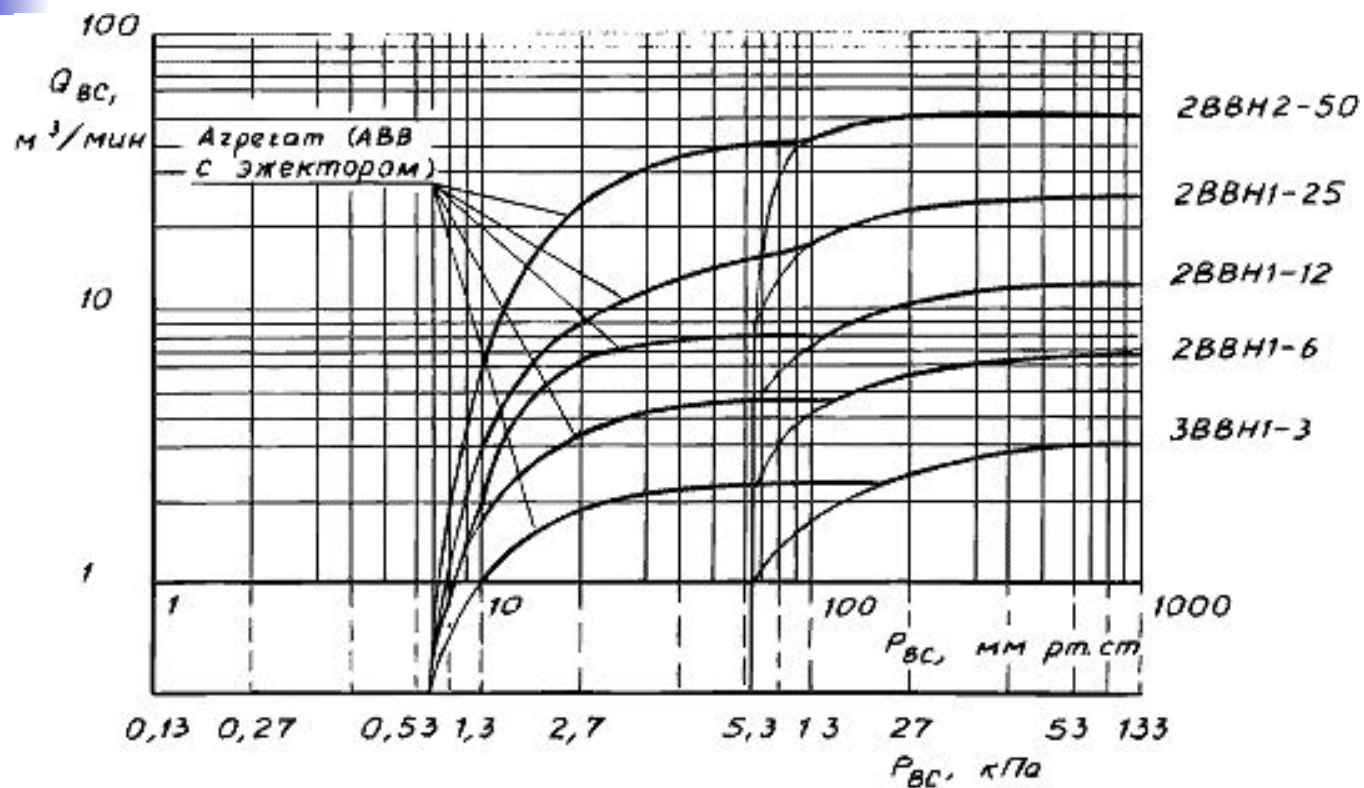
(<http://vacma.ru>):

| Параметр | ВВНС-0, 3 | ВВН-2 | 3ВВН1 -3 | 3ВВН1 -6 | 2ВВЕ1- 12 | 2ВВН1 -25 | 2ВВН2 -50 |
|--|--------------|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Производительность, приведенная к НУ, при начальном давлении 40 кПа, м ³ /мин | 0,3 | 1,8 | 3 | 6 | 12 | 25 | 45 |
| Мощность электродвигателя, кВт | 1,1 | 4 | 5,5 | 11 | 22 | 55 | 110 |
| Масса, кг | 25 | 80 | 135 | 400 | 900 | 2100 | 2750 |
| Расход воды, дм ³ /мин | 2 | 6 | 8 | 12 | 35 | 45 | 75 |

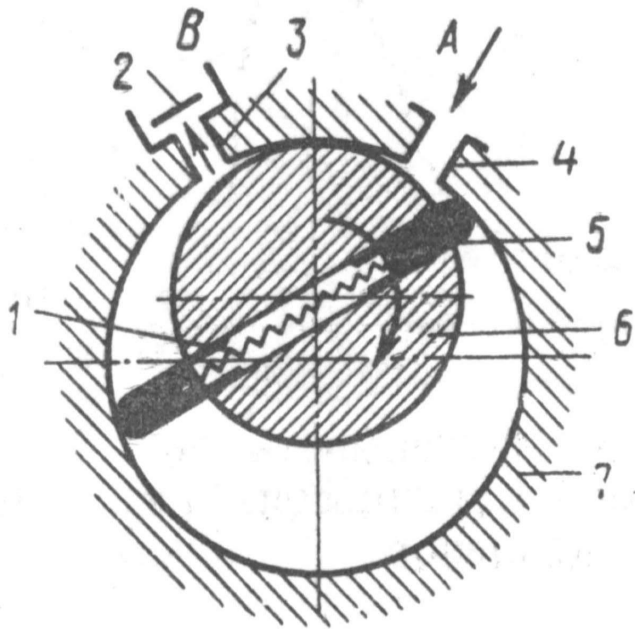
Внешний вид насосов ВВН



Зависимость производительности водокольцевых насосов и агрегатов



Пластинчато-роторные и пластинчато-статорные насосы

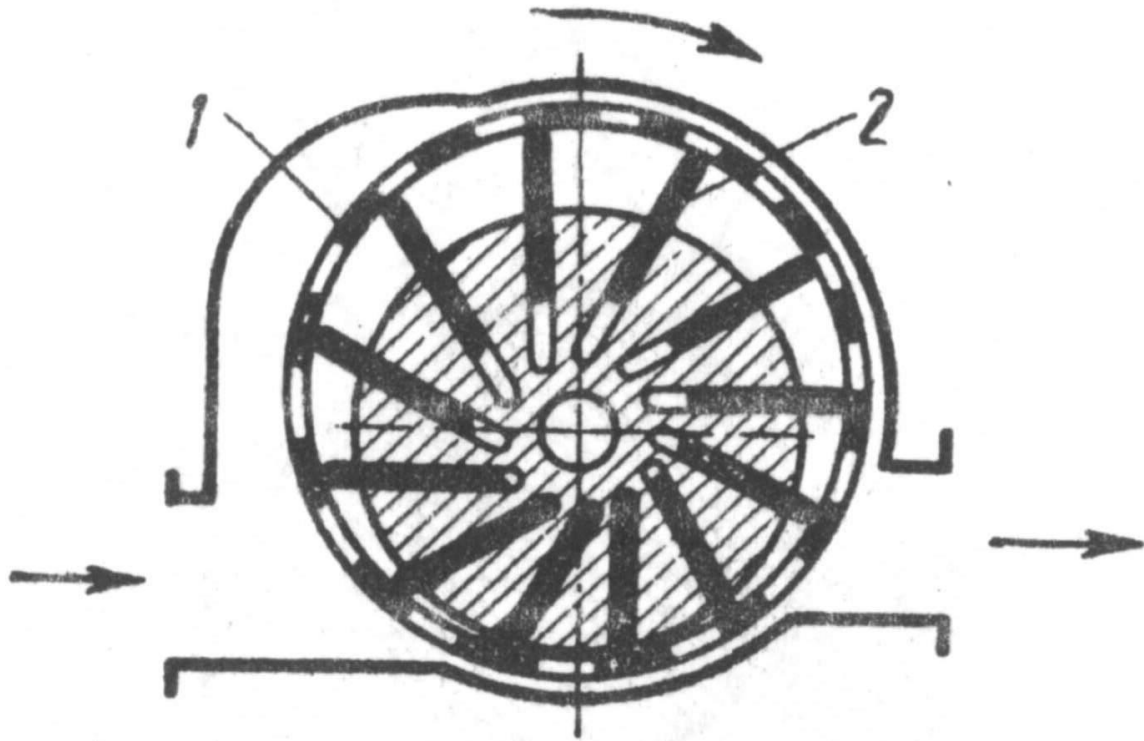


Пластины под действием центробежных сил пружиненные 1 пластины 5 прижимаются к корпусу 7.

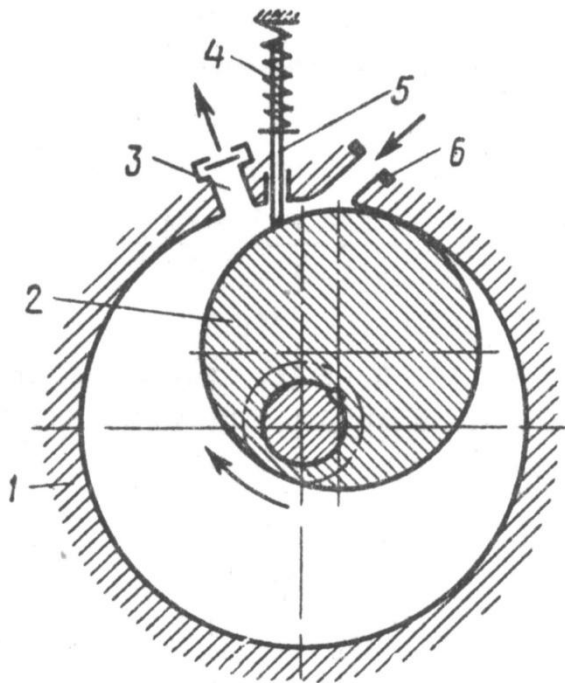
Происходит забор газа через вход 4, затем газ сжимается и выбрасывается в выхлоп 3, который имеет клапан 2.

Число пластин может меняться.

Многопластинчатый роторный насос



Пластинчато-статорный насос



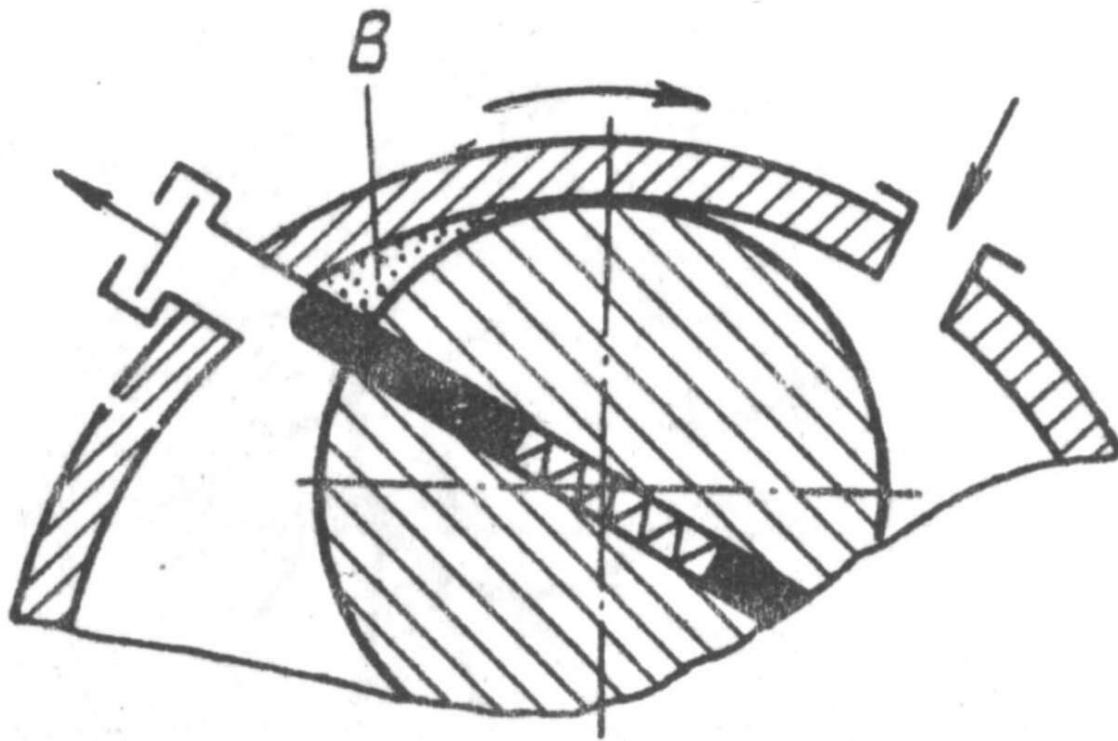
Пластина 5 движется возвратно-поступательно в пазу корпуса 1, прижимаясь к ротору 2 пружиной 4 и делит серпообразную полость между ротором и корпусом на две рабочие ячейки. Когда входной патрубок 6 открыт происходит забор газа, затем он сжимается и выбрасывается через патрубок с клапаном 3.



Достоинства пластинчато-роторных насосов:

- работают от атмосферного давления;
- достаточно высокое предельное давление, которое определяется:
 - a. газовыделения материалов насоса,
 - b. объемом вредного пространства,
 - c. и давлением насыщенных паров масел;
- высокая производительность.

Впелное пространство





Недостатки пластинчато-роторных насосов:

- требуют предварительной очистки газов;
- нельзя откачивать агрессивные жидкости;
- пары масла проникают в откачиваемый объем;
- требуется применение высококачественных вакуумных масел марки VM-1 или VM-5.



Области применения пластинчато-роторных насосов:

- предварительная откачка вакуумных систем среднего и высокого вакуума;
- работа в качестве первой ступени с насосами других типов.

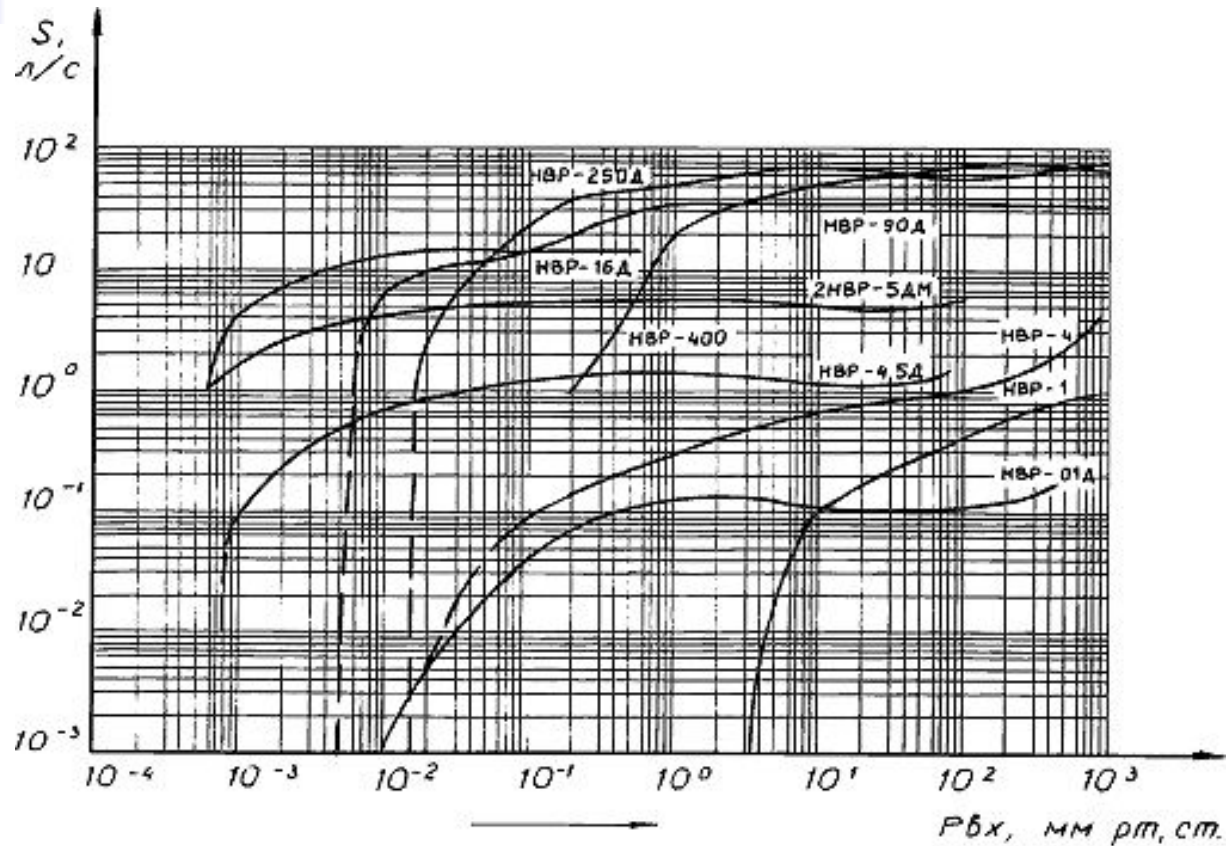
Производители:

ОАО «ВАКУУММАШ», г. Казань

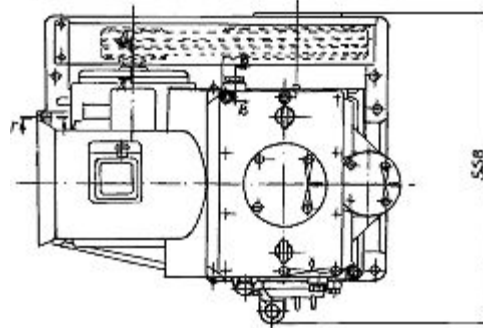
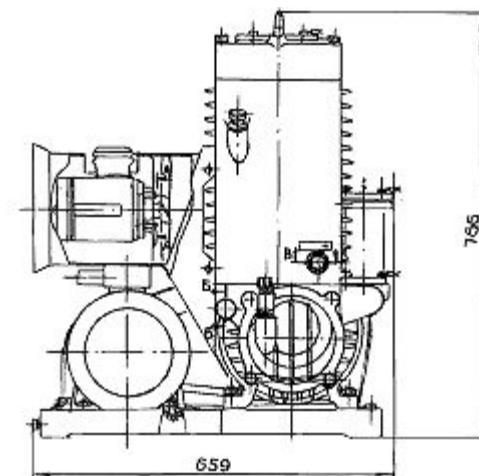
Технические характеристики насосов типа НВР (<http://vacma.ru>):

| Показатель | 2НВР-0,1Д | НВР-0,1Д | НВР-1 | НВР-4,5Д | 2НВР5ДМ | НВР16Д | НВР-90Д | НВР-250Д | НВР-400 |
|---|--------------------|--------------------|--------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Быстрота действия, л/с | 0,1 | 0,1 | 1 | 1,25 | 5,5 | 18 | 25 | 63 | 100 |
| Предельное остаточное давление (полн.), мм рт.ст. | 5×10^{-2} | 5×10^{-2} | 10 | $1,5 \times 10^{-2}$ | 5×10^{-3} | 5×10^{-3} | 5×10^{-3} | 5×10^{-3} | $7,5 \times 10^{-2}$ |
| Мощность э/д, кВт | 0,040* * | 0,035* | 0,18 | 0,25 | 0,55 | 2,2 | 2,2 | 5,5 | 11 |
| Напряжение, В | 220 | 12 или 27 | 380 | | | | | | |
| Род тока | перем. | пост. | перем. | | | | | | |
| Частота, Гц | 50 | - | 50 | | | | | | |
| Масса, кг | 2,3 | 1,6 | 8 | 10 | 26 | 78 | 100 | 210 | 250 |

Зависимость производительности насосов типа НВР от давления на входе



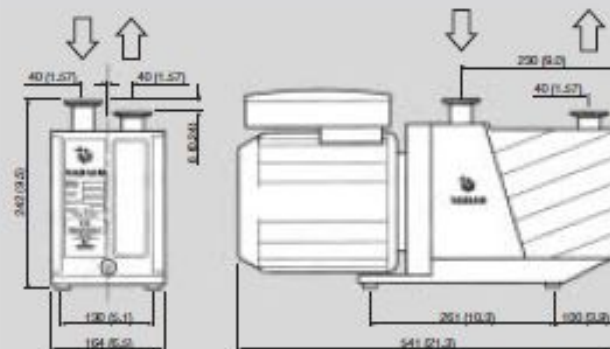
Внешний вид пластинчато-роторных насосов



Varian



Outline Drawing



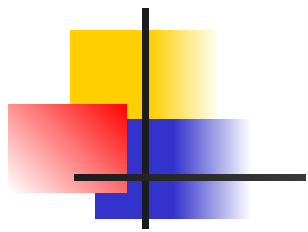
Alternative mounting holes are also available, with thread 1/4-20UNC

Dimensions: millimeters (inches)

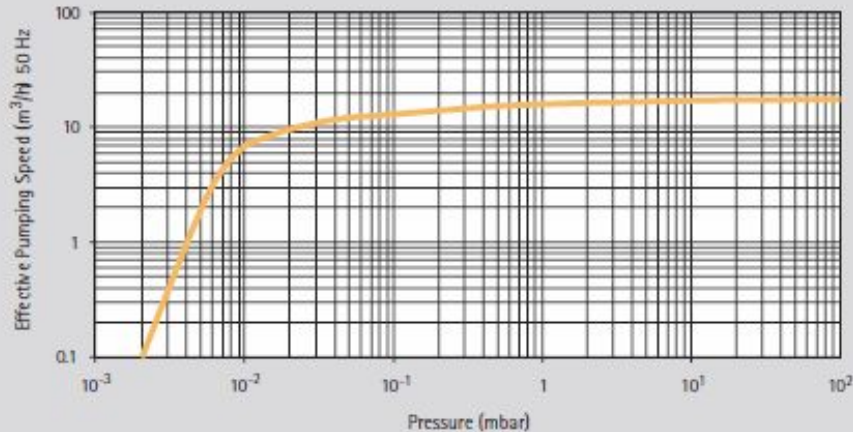
Technical Specifications

| | | |
|---|-----------------------------|---|
| Free air displacement | 60 Hz: 410 l/min (14.5 cfm) | 50 Hz: 342 l/min (20.5 m ³ /h) |
| Pumping speed* | 60 Hz: 12.3 cfm | 50 Hz: 17.4 m ³ /h |
| Ultimate partial pressure* | | 10 ⁻⁴ mbar |
| Ultimate total pressure* | | 2 x 10 ⁻³ mbar |
| Ultimate total pressure with gas ballast* | | 1 x 10 ⁻² mbar |
| Water vapor tolerance | | 30 mbar |
| Water vapor capacity | | 350 g/h |
| Oil capacity min/max | | 0.5/1 l |
| Motor rating 1ph | 60 Hz: 0.90 kW | 50 Hz: 0.75 kW |
| Motor rating 3ph | 60 Hz: 0.90 kW | 50 Hz: 0.75 kW |
| Nominal rotation speed | 60 Hz: 1800 rpm | 50 Hz: 1500 rpm |
| Weight kg (lbs) | | 35 (77) |
| Inlet flange | | 25KF DN |
| Exhaust flange | | 25KF DN |

*According to PNEUROP 6602



Pump Speed Curve



Ordering Information

| Dual Stage Rotary Vane Pump | Part Number |
|---|-------------|
| DS 402 with 1 phase worldwide motor* | 9499330 |
| DS 402 with 3 phase worldwide motor** | 9499331 |
| * 1 phase motors (100-120 / 200-240) V ±10%, 50/60 Hz. | |
| ** 3 phase motors (200-220 / 380-415) V ±10% at 50 Hz or (200-230 / 460) V ±10% at 60 Hz. | |
| All motors comply with CE and UL/CSA standards. | |
| Minor Maintenance Kit | Part Number |
| Contains all the valves, O-rings and seals to refurbish the pump to vacuum integrity | 9499371 |
| Major Maintenance Kit | Part Number |
| Includes all the items of the minor kit plus the vanes | 9499382 |

| Oil and Accessories | Part Number |
|--|-------------|
| Rotary vane fluid, GP type, 1 liter | 9499390 |
| Rotary vane fluid, GP type, 1 liter (USA)* | K7516301 |
| Rotary vane fluid, GP type, 2 liters | 9499391 |
| Rotary vane fluid, GP type, 1 gallon (USA) | K7516302 |
| Oil mist eliminator | 9499395 |
| Oil mist replacement cartridge (pkg. of 2) | 9499394 |
| NW 25 oil exhaust filter | 9499392 |
| NW 25 oil exhaust replacement cartridge | 9499342 |
| Oil return kit | 9499376 |
| Oil drain extension | 9499375 |
| European plug power cable 2 meters 1 ph | 9499396 |
| USA plug power cable 2 meters 1 ph | 9499397 |
| UK plug power cable 2 meters 1 ph | 9499398 |
| NW 25 centering ring Viton | KC25AV |
| NW 25 aluminum clamp | KQ25AWP |

* When these pumps are used in Leak Detectors applications, we recommend the use of Rotary Vane Fluid (Elite-Z mechanical), P/N 695409005 as it features a lower vapor pressure.

Безмаслянные спиральные насосы Varian Vacuum Technologies



Принцип действия спирального насос основан на сжатие воздуха в спиральном блоке, где установлены две спирали – технология TriScroll™. Одна из спиралей жестко закреплена и лишена возможности перемещения. Вторая спираль установлена со сдвигом фаз и движется относительно первой спирали по орбитальной траектории, при этом между спиралями образуются воздушные полости в которые и попадает воздух.

Наличие нескольких полостей предотвращает процесс перетекания газа из одной полости в другую, так как разница давлений в соседних полостях невысокая. По мере движения подвижной спирали объемы рабочих ячеек уменьшаются, за счет чего и происходит сжатие воздуха.

За счет этого насос хорошо динамически сбалансирован, а следовательно вибраций и шума будет крайне мало.

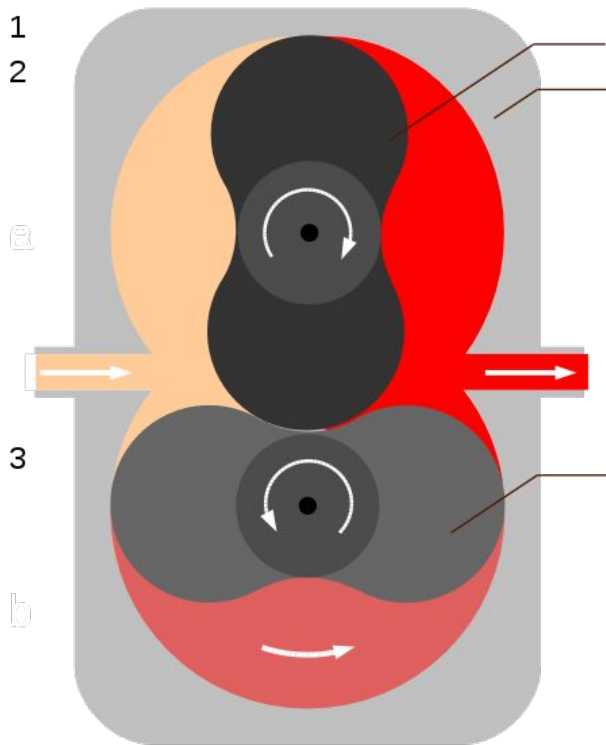


Технические характеристики вакуумных насосов серии TriScroll



| | SH-110 | PTS 300 | PTS 600 |
|--|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Откачка воздуха при атм. давлении, л/мин | 110 | 250 | 500 |
| Скорость откачки, л/мин | 90 | 210 | 420 |
| Остаточное давление, торр | 5.0×10^{-2} | $\leq 10^{-2}$ торр | 7×10^{-3} |
| Входное присоединение | NW25 | NW25 с приемным фильтром | NW40 с приемным фильтром |
| Мощность двигателя: | | | |
| 1 фазного | 0.19 кВт | 0,56 кВт | 0,75 кВт |
| 3 фазного | | 0,56 кВт | 0,56 кВт |
| Внешняя температура при эксплуатации | 5 – 40 °C | 5 – 40 °C | 5 – 40 °C |
| Уровень шума, ДБ | 56 | 68 | 68 |
| Вес, кг | 19,4 | 26,4 | 32 |

Двухроторные насосы

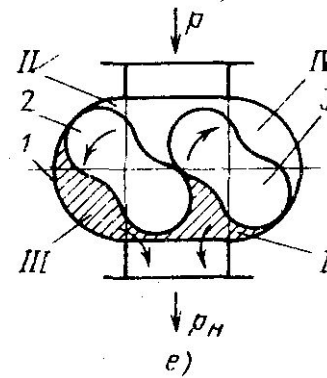
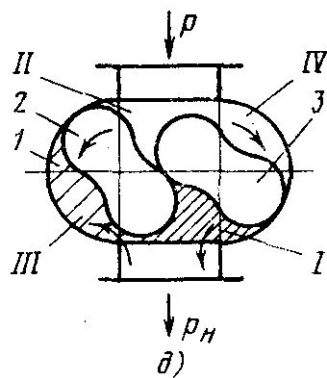
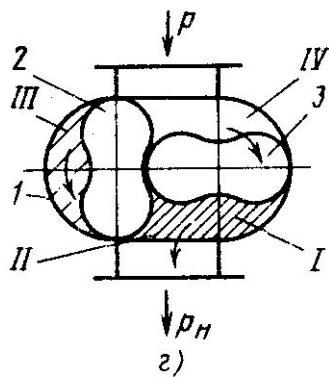
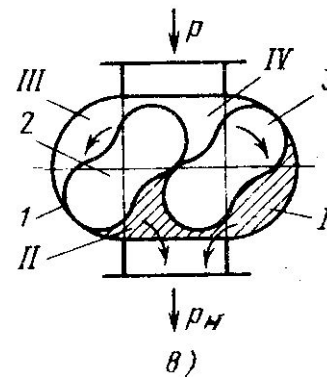
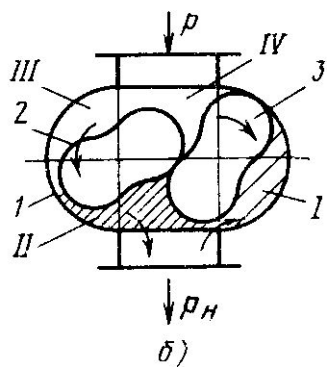
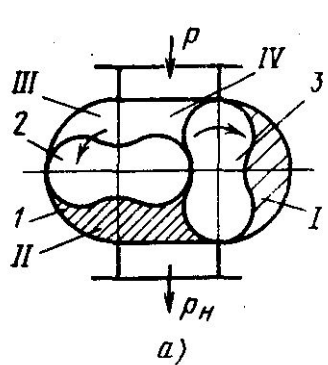


Насосы данного типа состоят из корпуса, в котором вращаются два одинаковых по профилю ротора, двух торцовых крышек, подшипников, синхронизирующей передачи и сальников.

Откачка и сжатие газа происходят вследствие заполнения газом образуемой в вакуумном насосе рабочей камеры, которая переносится без сжатия из полости всасывания в полость нагнетания.

После сообщения рабочей камеры с нагнетанием давление в ней возрастает за счёт газа, перетекающего из нагнетательного окна.

Схема работы двухроторного насоса





Достоинства двухроторных насосов

- нет трения между роторами;
- в полости сжатия смазочный материал не подается;
- допускается откачка любых газов;
- хорошая уравновешенность и динамическая сбалансированность роторов позволяет работать на высоких частотах, что позволяет получать высокие скорости откачки при небольших габаритах;
- простота конструкции и технологичность;
- способность выдерживать ударные разгерметизации;
- остаточное давление до 0,5 Па
- не требуют водяного охлаждения.



Недостатки двухроторных насосов

- процесс внешнего сжатия неэкономичен, поэтому двухроторные насосы применяются при небольших перепадах давления или при давлениях всасывания 1,3 -130 Па;
- относительно большие перетекания газа из полости нагнетания в полость всасывания из-за зазоров между роторами, а также между роторами и корпусом препятствуют получению низкого давления;
- большой уровень шума при работе.



Применение двухроторных насосов

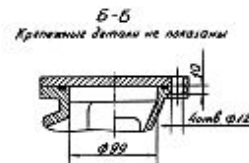
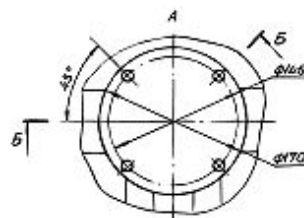
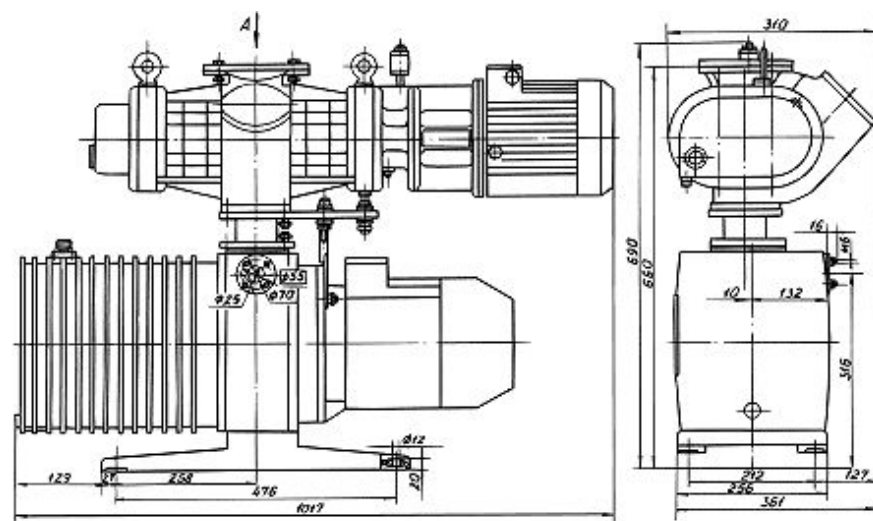
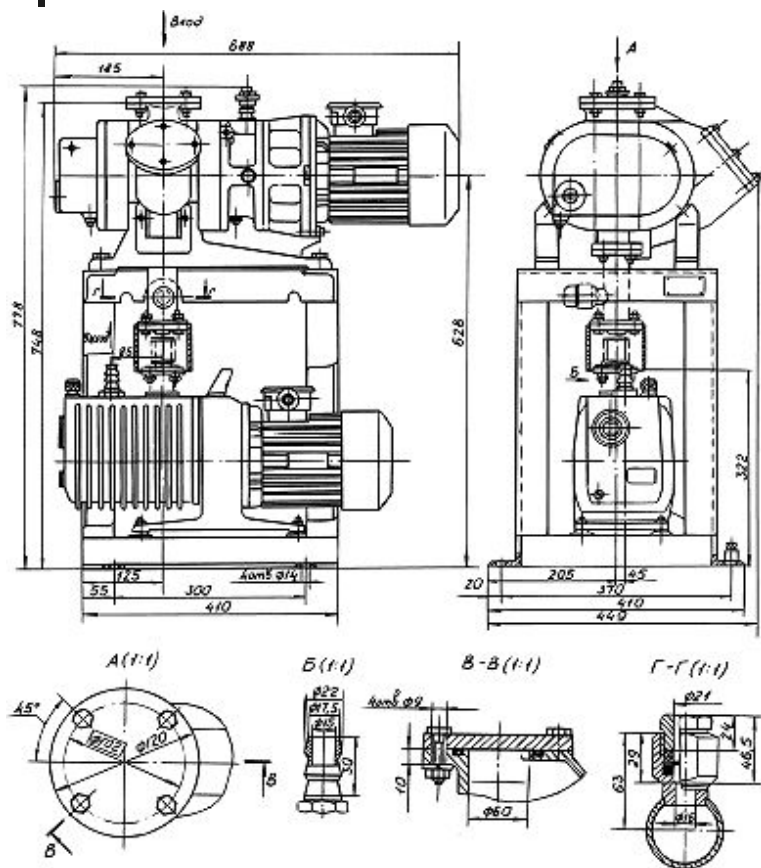
Применяются совместно с форвакуумными насосами в виде агрегатов (АВР-50 и АВР -150) для:

- откачки люминесцентных ламп;
- электронно-лучевой сварки;
- в установках нанесения покрытий;
- откачки вакуумных печей и т.п.

Параметры агрегатов на основе двухроторных насосов <http://vacma.ru>):

| Наименование параметра | АВР-50 | АВДС-50 | АВД-150/25 |
|--|--|---|--|
| Быстрота действия при рабочем давлении, 26,6 Па (2×10^{-1} мм рт.ст.), л / с | 57+8,5 | 100 | 155 |
| Предельное остаточное давление, Па (мм рт. ст.): с учетом паров рабочей жидкости (полное) парциальное по воздуху | $1,3 \times 10^{-1}$ (1×10^{-3}) $1,3 \times 10^{-3}$ (1×10^{-5}) | $6,65 \times 10^{-1}$ (5×10^{-3}) | $1,3 \times 10^{-1}$ (1×10^{-3}) $1,3 \times 10^{-3}$ (1×10^{-5}) |
| Потребляемая мощность при рабочем давлении, кВт, не более | 0,84 | 4 | 1,5 |
| Установленная мощность электродвигателей насосов агрегата, кВт | 1 | - | 3,3 |
| Охлаждение агрегата | воздушное | воздушное | воздушное |
| Масса, кг | 105 | 370 | 180 |
| Форвакуумный насос | 2НВР-5ДМ | НВР-20С | НВР-90Д |

Чертежи насосов АВР-50 и АД-150/25 (справа)





Молекулярная откачка

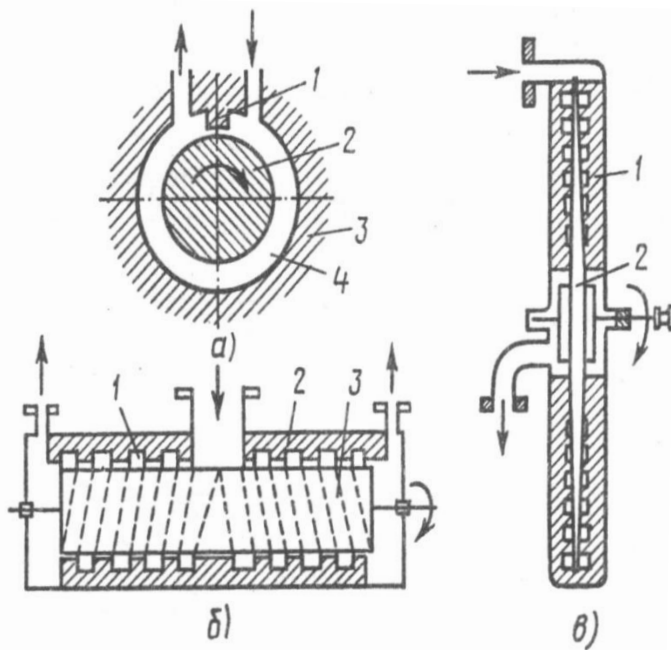
Вакуумный насос, действие которого основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости при соударении их с быстро вращающимся (частота вращения до 90 тыс. об/мин) ротором.

Различают молекулярные насосы с одинаковым направлением движения газа и стенки канала имеют много конструктивных разновидностей :

- цилиндрические,
- дисковые,
- конические и др.

Остаточное давление от 10 до 10^{-9} Па.

Молекулярный насос

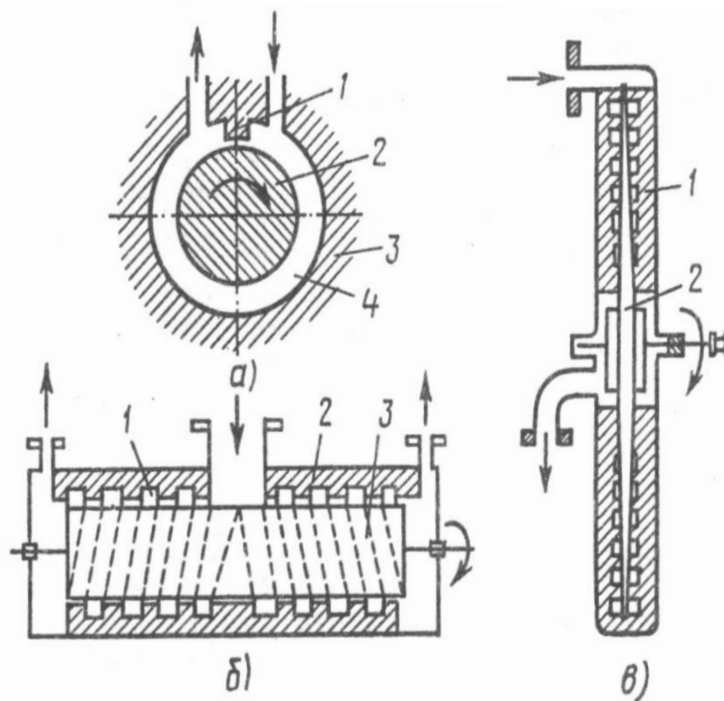


Цилиндрический насос а) имеет в статоре 3 набор цилиндрических канавок 4, входные и выходные отверстия в которых разделены перегородкой 1.

Ротор 2 вращается с большой частотой так, что его линейная скорость близка к тепловой скорости молекул.

Спиральный паз на поверхности статора 2 и цилиндрическая поверхность ротора 3 образуют рабочий канал б).

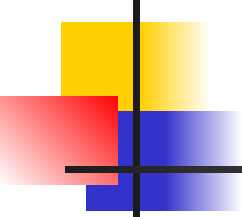
Молекулярный насос



Спиральные канавки на торцевых поверхностях статора 1, отстоящие на минимальном расстоянии от вращающегося диска 2, используются для молекулярной откачки в схеме в).

Через зазор между статором и ротором происходит возврат газа из камеры сжатия в камеру всасывания, что ухудшает реальные характеристики насосов.

Нормальная работа таких насосов возможна при зазоре между ротором и статором не превышающем 0.1 мм.



Практическое применение такие насосы нашли в качестве ступеней высокого давления при совместной работе с насосами, имеющими взаимно перпендикулярное перемещение газа и рабочих поверхностей, а также при откачке газов с большой молекулярной массой.

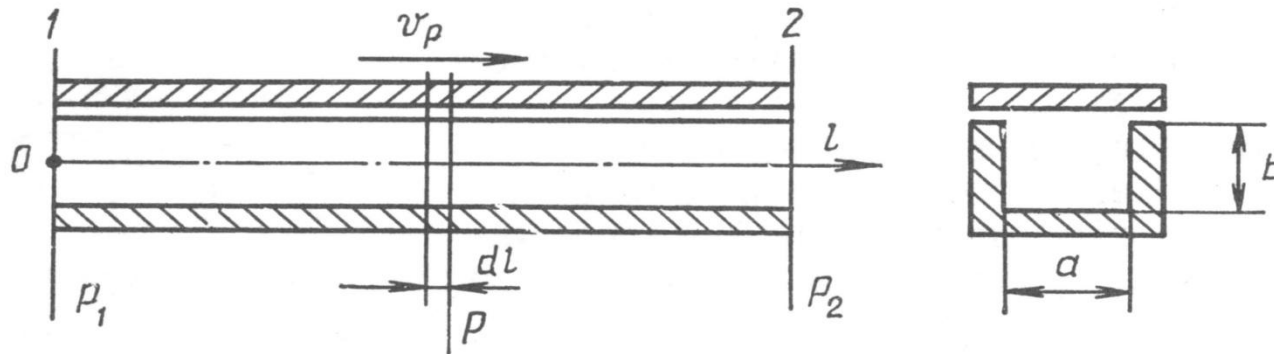
Проникновение паров масел, применяемых для смазки подшипниковых узлов, в откачиваемый объект во время работы насоса очень мало, но сильно возрастает при остановке насоса.

Быстрота действия насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора, которая в современных насосах может достигать 10 - 40 тыс. оборотов в минуту.

Максимальная быстрота действия обычно не превышает 100 л/с из-за малого поперечного сечения каналов.

Предельное давление 10^{-5} Па при коэффициентах компрессии $10^5 - 10^6$.

Принцип молекулярной откачки



Создается перепад давлений $p_2 > p_1$ максимальная быстрота действия пропорциональна скорости:

$$S_{max} = \gamma F_k v_p$$

F_k - площадь поперечного сечения канала,

γ - коэффициент, учитывающий соотношения движущейся и неподвижной частей периметра канала.

Насос обеспечивает получение больших коэффициентов компрессии при малых скоростях откачки (10^{10}).



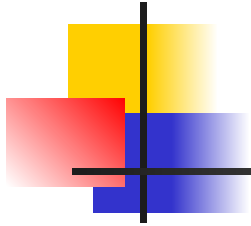
Молекулярные насосы с взаимно **перпендикулярным** движением рабочих поверхностей и потока откачиваемого газа получили широкое распространение.

Конструкция **турбомолекулярного насоса**, использующая этот принцип, во многом определяется расположением вала ротора:

- горизонтальным,
- вертикальным устройством

Формой рабочих органов:

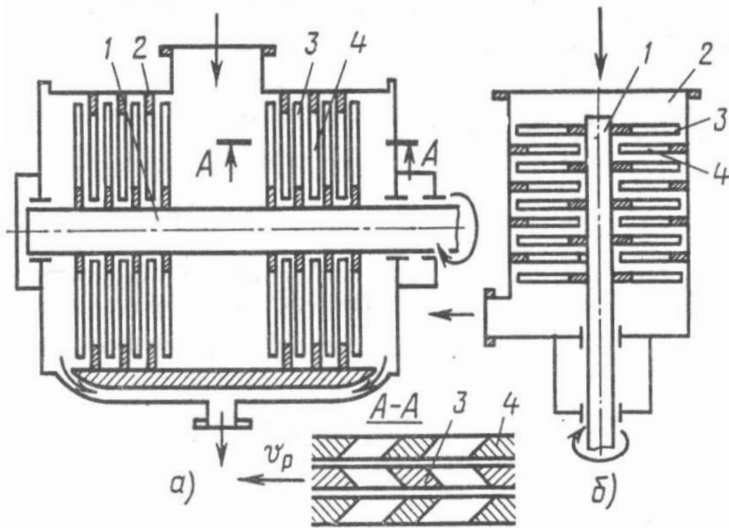
- цилиндровые,
- конусные,
- дисковые с радиальным потоком,
- дисковые с осевым потоком,
- барабанные.



Большое влияние на характеристики насоса оказывает конструкция опорных узлов:

- на смазываемых подшипниках качения,
- на магнитных опорах,
- газовой подушке.

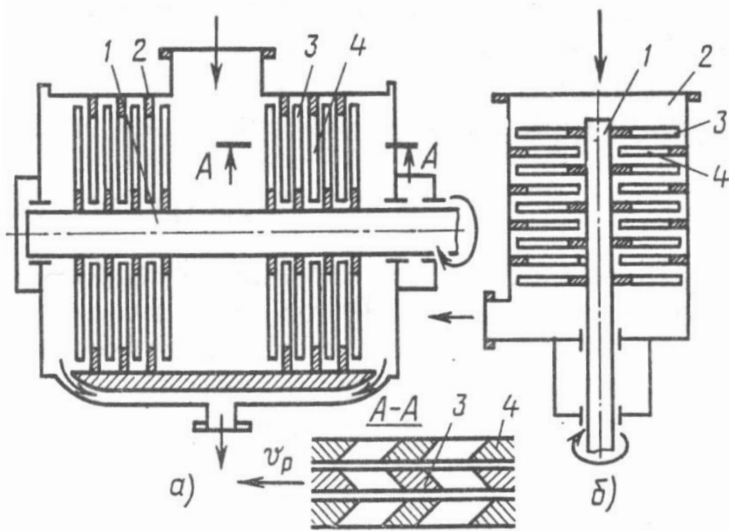
Турбомолекулярный насос



В корпусе 2 горизонтального насоса установлены неподвижные статорные колеса 4, между которыми вращаются колеса 3, закрепленные на роторе. Роторные колеса выполняются в виде дисков с прорезями. В статорных колесах имеются зеркально расположенные прорези такой же формы. Для удобства монтажа статорные колеса разрезаются по диаметру.

При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выпускном патрубке.

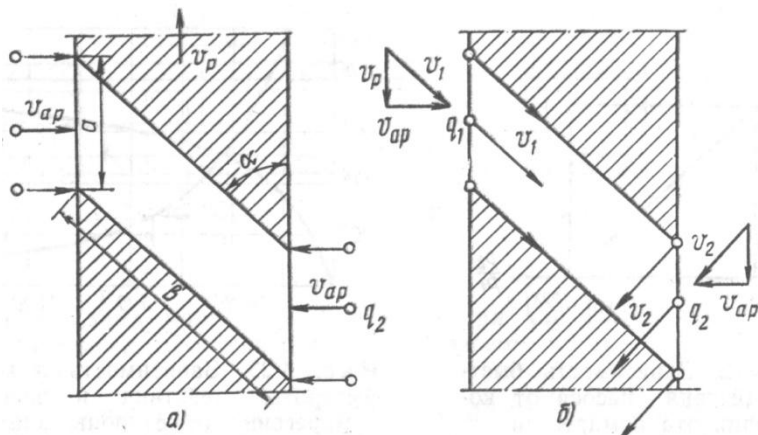
Турбомолекулярный насос



В связи с малыми коэффициентами компрессии каждой ступени в турбомолекулярном насосе можно увеличить рабочие зазоры.

При диаметре рабочих колес 200 мм осевой между колесами) в радиальный (между корпусом и роторным колесом или ротором и статорным колесом) зазоры могут составлять 1 - 1.2 мм, что позволяет значительно повысить надежность их работы. Увеличение зазоров, снижая коэффициент компрессии насоса, слабо влияет на его быстроту действия.

Принцип турбомолекулярного насоса



Для установившегося режима течения газа

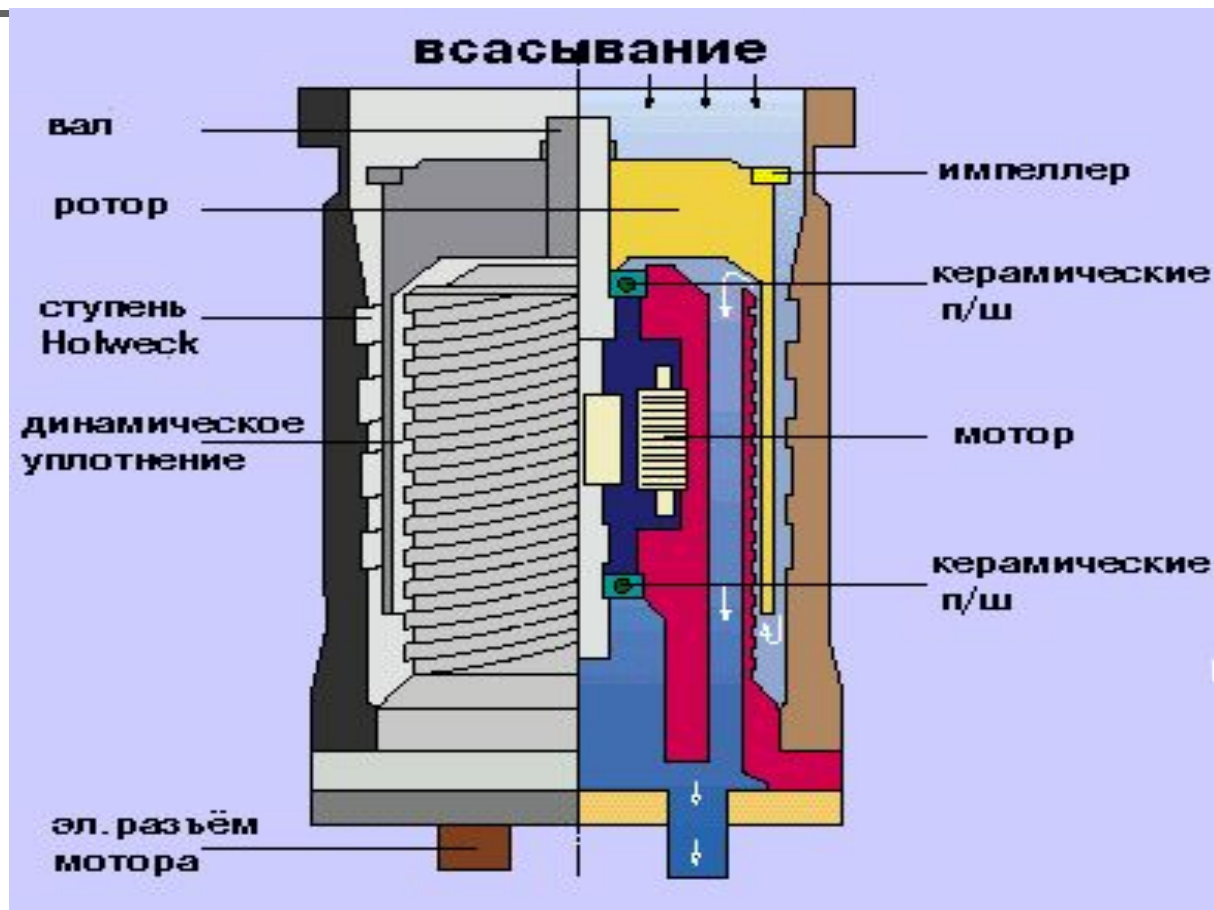
$$Q = U_{12} p_1 - U_{21} p_2,$$

U_{12} и U_{21} проводимости каналов для потоков q_1 и q_2 соответственно.

Принцип перехода молекул газа через вращающееся рабочее колесо основан на различии сопротивлений межлопаточных каналов, образованных двумя соседними лопатками или стенками паза, потокам газа с противоположных сторон.

Угол наклона выбирается так, что вероятность перехода молекул в сторону откачки выше, чем отражение назад для вращающихся дисков и наоборот для неподвижных.

Турбомолекулярные насос MDP5011





Достоинства турбомолекулярных насосов:

- Большой диаметр входного отверстия,
- Получение высокого безмасляного вакуума;
- Производят удаление, а не адсорбцию воздуха;
- Имеют высокую быстроту откачки газов с малой молекулярной массой;
- Быстрый запуск и остановка.



Недостатки турбомолекулярных насосов:

- наличие высокоскоростного ротора со смазыванием быстроизнашивающихся подшипников;
- сложные системы подвеса ротора;
- наличие преобразователя напряжения для питания высокооборотного электродвигателя;
- сложность изготовления и относительно высокая цена.

Области применения турбомолекулярных насосов:

- Масс-спектрометрия
- Электронная микроскопия
- Физика поверхности и газовый анализ
- Течеискание
- Ускорители элементарных частиц
- Ядерные исследования
- Производство электровакуумных приборов
- Производство полупроводников





Производители турбомолекулярных насосов:

- ООО «Призма», Новосибирская обл., г. Искитим
<http://www.ooo-prizma.ru/Indexgl.htm>
- Ilmvac GmbH, Германия
http://www.tako-vakuum.ru/pumpen_turbomolekular_01.php#punkt_STP
- CCS Services, Швейцария
<http://www.cssservices.ru/Vacuum/Vacuum2.html>

Параметры турбомолекулярных насосов производства ООО «Призма»:

| Техническая характеристика | НВТ-100-041 | НВТ-100-042 | НВТ-450-01 | НВТ-1000-029 | 01 АБ-1500-004 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Быстрота действия по воздуху (в диапазоне давлений $6,33 \cdot 10^{-4}$ - $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па), л/с | 100 | 100 | 400 | 1000 | 720 |
| Предельное остаточное давление на входе (при давлении на выходе не более 1,33 Па), Па | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $6,6 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $6,6 \cdot 10^{-7}$ |
| Время разгона, мин | 5 | 5 | 6 | 20 | 20 |
| Частота вращения, об/мин | 30 000 | 30 000 | 24 000 | 21 000 | 21 000 |
| Максимальная потребляемая мощность, В*А | 100 | 100 | 1200 | 1200 | 1500 |
| Габаритные размеры, мм* | 140x140x175 | 152x152x195 | 250*250*265 | 320x320x280 | 420x420x430 |
| Масса, кг* | 5,5 | 7,5 | 25 | 30 | 58 |
| Рекомендуемый форвакуумный насос | ЗНВР-1Д, | ЗНВР-1Д, | 2НВР-5ДМ | 2НВР-5ДМ | НВР-16Д |

Внешний вид турбомолекулярных насосов производства ООО «Призма» (слева) и IImvac GmbH (справа):





1.4. Струйные вакуумные насосы



Пароструйная откачка

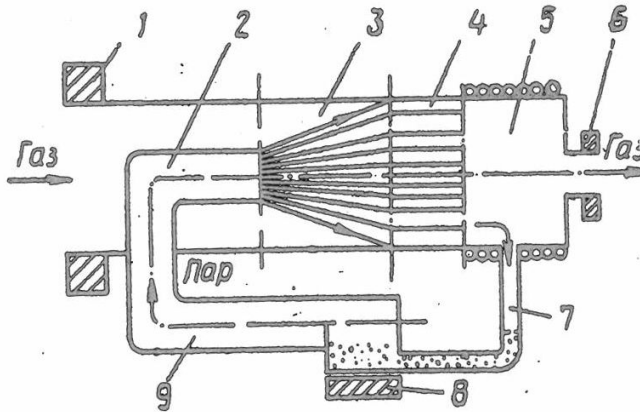
Взаимодействие откачиваемого газа с паровой струей зависит от **степени вакуума.**

При низком вакууме молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называют **эжекторными.**

В области высокого вакуума все молекулы откачиваемого газа, перемещаясь за счет самодиффузии, непосредственно взаимодействуют с движущейся струей пара, а насосы, работающие в таких условиях, называют **диффузионными.**

Быстрота действия насоса зависит от производительности сопла и свойств рабочего пара. В эжекторных насосах она лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч литров в секунду.

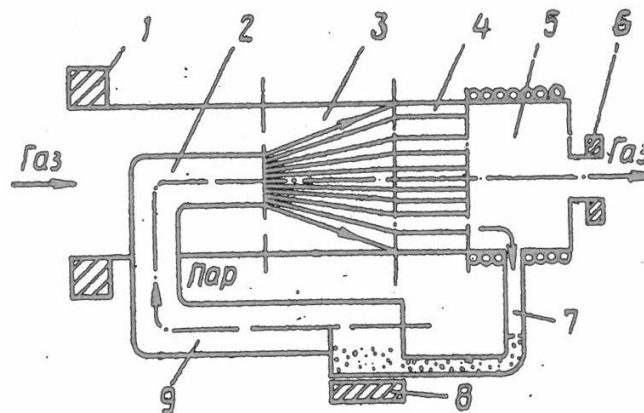
Пароструйная откачка



При пароструйной откачке молекулы откачиваемого газа, поступающие в насос через входной патрубков 1, взаимодействуют со струёй пара, имеющего звуковую и сверхзвуковую скорость, и приобретают дополнительную скорость в направлении насоса предварительного разряжения, присоединяемого к выходному патрубку 6.

В камере 3 происходит смешение паровой струи, выходящей из сопла 2, и откачиваемого газа. Запирающий канал 4 создаёт сопротивление обратному потоку газа, обеспечивая коэффициент компрессии насоса.

Схема пароструйного (эжекторного) насоса



Разделение откачиваемого газа и рабочего пара осуществляется в камере 5 в процессе конденсации рабочего пара на охлажденных поверхностях, после чего откачиваемый газ выходит из насоса через выходной патрубок, а сконденсировавшийся пар поступает по трубопроводу 7 в кипятильник 8, где вновь испаряется и по паропроводу 9 попадает в рабочее сопло 2, обеспечивая непрерывность процесса откачки.



Диффузионная откачка

При истечении струи пара в высокий вакуум происходит ее расширение за счет тепловых скоростей молекул.

В случае равенства скорости истечения струи и скорости звука она выходит из сопла под углом 45° к его оси. Давление пара в струе значительно больше, чем давление откачиваемого газа.

Наилучшие условия для захвата молекул откачиваемого газа обеспечиваются тогда, когда давление пара в струе соответствует среднему вакууму.

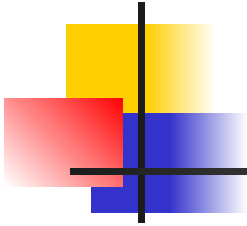
При этом все молекулы откачиваемого газа проникают в паровую струю при первом соударении. При большей плотности паровой струи вероятность захвата молекул снижается.



Диффузионная откачка

Теоретическая быстрота действия диффузионного насоса в связи с малым количеством откачиваемого пара определяется не изменением термодинамических характеристик паровой струи, как в случае эжекторного насоса, а геометрическими размерами сопла и парциальным давлением откачиваемого газа в паровой струе.

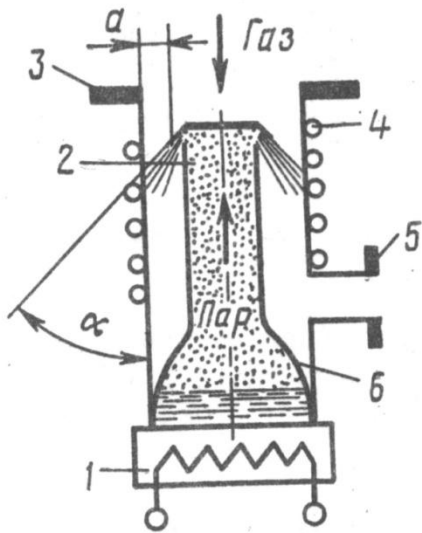
Максимальное **выпускное давление** не может быть больше давления рабочего пара в кипятильнике насоса, поэтому в случае паромасляного насоса оно не превышает $(1-5) \cdot 10^2$ Па, для парортутного - $(20-40) \cdot 10^2$ Па.. Увеличить максимальное выпускное давление паромасляного насоса нельзя, так как температура пара в кипятильнике ограничивается температурой разложения масла.



В парортутных насосах принципиально возможно повышение максимального выпускного давления вплоть до атмосферного, но из-за больших потерь и токсичности ртути этого обычно не делают.

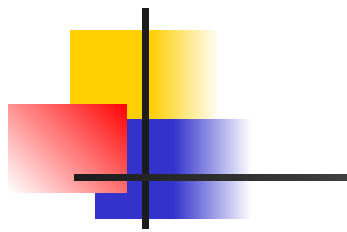
Предельным **остаточным давлением** эжекторного насоса является давление перехода из среднего в высокий вакуум, когда происходит расширение паровой струи и нарушение оптимального режима работы. Величина предельного давления составляет 10^{-1} - 10^{-2} Па.

Диффузионный насос



Диффузионный насос состоит из кипятильника 1, диффузионного сопла 2, закрепленного на паропроводе 6, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков 3 и 5. Пары рабочей жидкости проходят по паропроводу через зонтичное сопло и конденсируются на стенках насоса, охлаждаемых холодильником. За время движения пара от конца сопла до стенок насоса в струю пара диффундирует откачиваемый газ.

После конденсации образовавшейся парогазовой смеси выделившийся газ откачивается через выпускной патрубок насосом предварительного разрежения, а сконденсированный пар стекает по стенкам насоса в кипятильник через зазор между паропроводом и корпусом насоса.





Требования к рабочей жидкости:

- минимальная упругость паров (наименьшее предельное давление)
- стойкость к разложению,
- минимальная способность растворять газа,
- химическая стойкость,
- малая теплота парообразования.

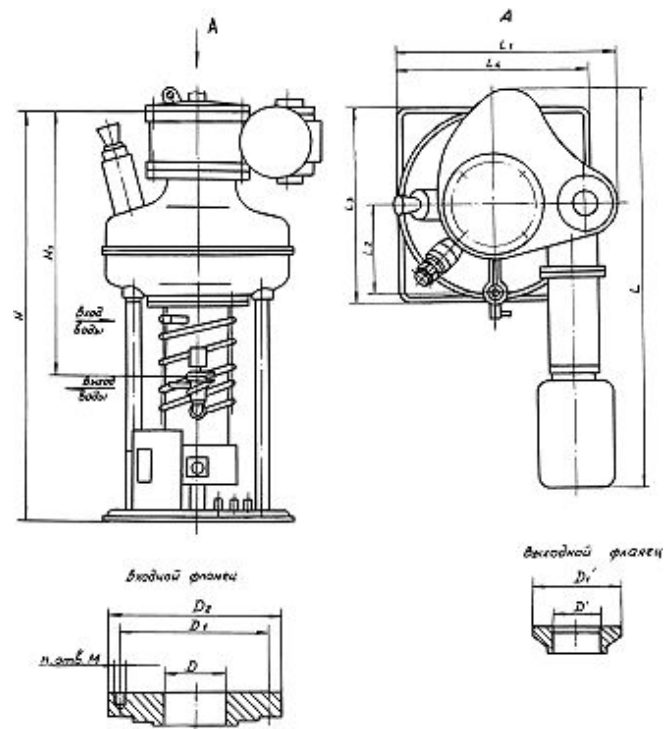
Обычно используются:

- ртуть,
- минеральные масла (чаще всего ВМ-1, ВМ-5),
- синтетические масла («алкорен»),
- сложные эфиры;
- кремнийорганические жидкости.

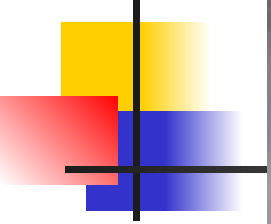
Параметры агрегатов на основе диффузионных насосов (<http://vacsta.ru>):

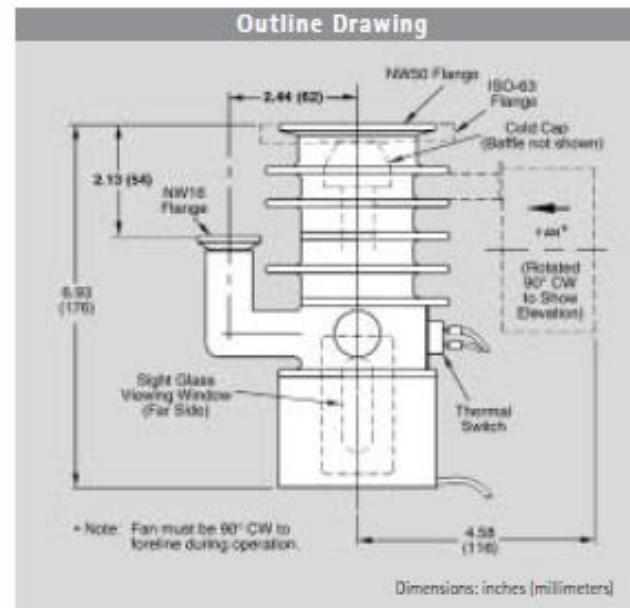
| Показатель | АВДМ-100 | АВДМ-160 | АВДМ-250 | АВДМ-400 | АВДМ-630 |
|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Быстрота действия в диапазоне рабочих давлений от $6,6 \times 10^{-4}$ до $1,3 \times 10^{-1}$ Па | 130 | 310 | 870 | 2280 | 5750 |
| Предельное остаточное давление, Па (мм рт.ст.), не более при температуре окружающего воздуха: от 10 до 25°C включит. св. 25 до 45°C включит. | $6,6 \times 10^{-5}$ (5×10^{-7}) $6,6 \times 10^{-4}$ (5×10^{-6}) | | | | |
| Наибольшее выпускное давление, Па (мм рт.ст.), не менее | 35 (0,263) | 33,3 (0,25) | 33,3 (0,25) | 33,3 (0,25) | 33,3 (0,25) |
| Потребляемая мощность при номинальном напряжении, Вт | 563 | 900 | 2100 | 4200 | 9500 |
| Мощность нагревателя, Вт | 500 | 800 | 2000 | 4000 | 9000 |
| Масса, кг, не более* | 40 | 65 | 140 | 294 | 870 |

Внешний вид агрегата АВДМ-160 и чертеж агрегата АВДМ-100



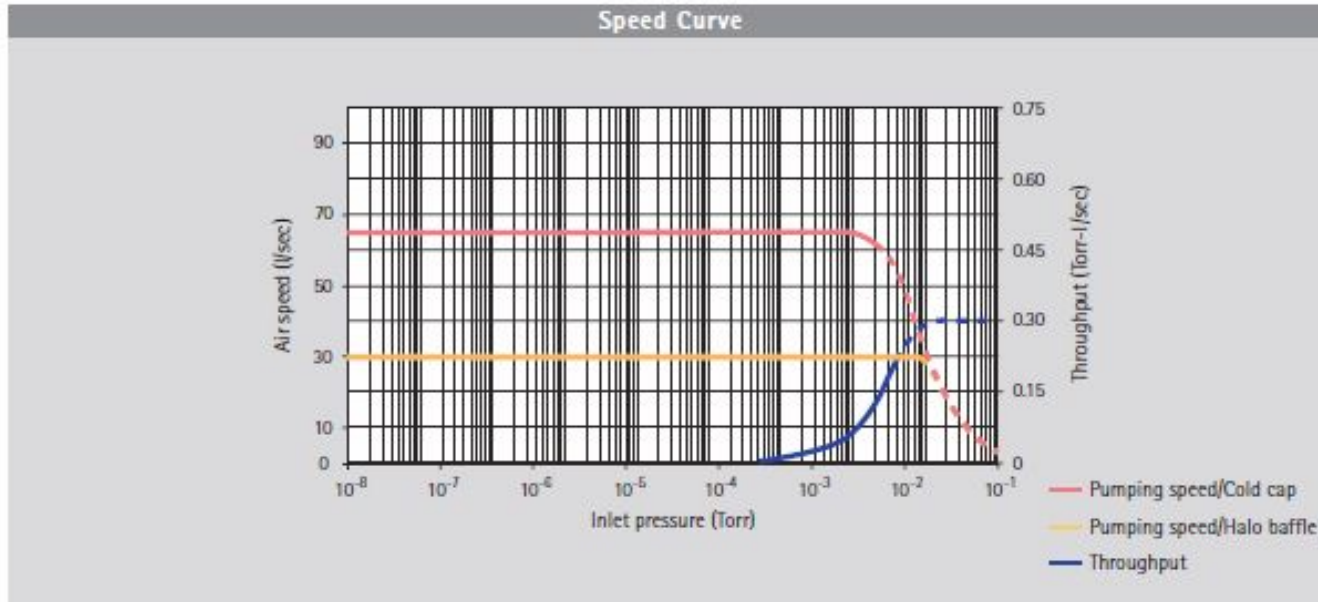
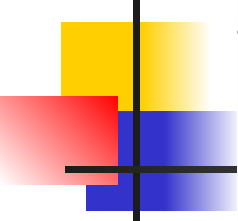
Агрегат представляет собой конструкцию, состоящую из диффузионного паромаслянного насоса, азотной ловушки, вакуумного затвора, рамы (для АВДМ-250, АВДМ-400 и АВДМ-630) или плиты (для АВДМ-100 и АВДМ-160) и термореле.





Technical Specifications

| | |
|---------------------------------|--|
| Pumping Speed*, Operating Range | 65 l/sec Air, 90 l/s He and H ₂ |
| Maximum Throughput | 0.19T-l/s (0.25 mbar-l/s) in operating range 0.30T-l/s (0.40 mbar-l/s) @ 0.01 torr |
| Compression Ratio | 4 x 10 ⁷ (Air), 2 x 10 ⁶ (helium) |
| Operating Range | 3 x 10 ⁻³ to <5 x 10 ⁻⁸ torr (3.9 x 10 ⁻³ to 6.5 x 10 ⁻⁸ mbar) |
| Maximum Forepressure | No load: 0.75 torr (1.00 mbar) Full Load: 0.60 torr (0.78 mbar) |
| Backstreaming Rate* | With cold cap: < 2 x 10 ⁻⁴ mg/cm ² /min With baffle: < 2 x 10 ⁻⁵ mg/cm ² /min |
| Recommended Backing Pump | ≥ 1.5 cfm (2.5 m ³ /hr) |
| Warmup Time | 7 minutes |
| Cooldown Time | 10 minutes |
| Fluid Charge | 30 cc |
| Electrical Requirements | 1 ph, 50/60 Hz, 90/115/165/220 VAC |
| Pump Power | 200/250 watts |
| Air Cooling | 30 cfm |

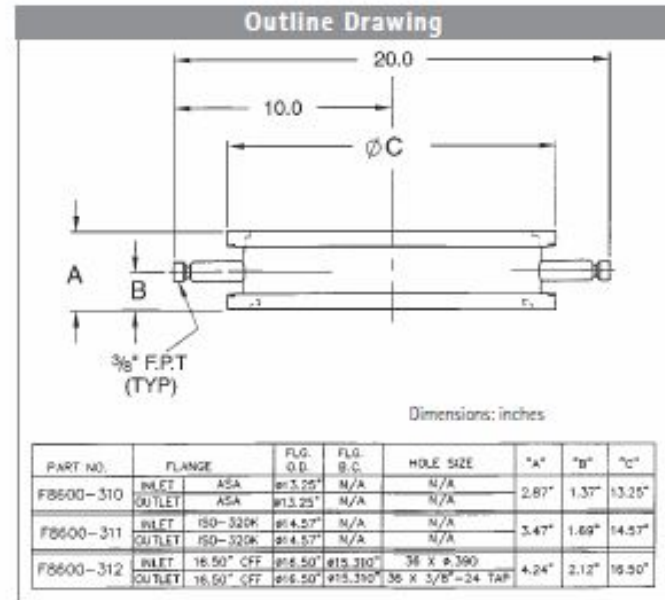


Ordering Information

| Description | Wt. kg (lbs) | Part Number | |
|--|--------------|-------------|----------|
| | | KF-50 | ISO-6 |
| 3KAX-65 with standard cold cap, 115 V, 250 W | 3.6 (8.0) | L9670301 | L9707301 |
| AX-65 with internal baffle, 115 V, 250 W | 3.6 (8.0) | L9670311 | L9707311 |
| AX-65 with standard cold cap, 220 V, 250 W | 3.6 (8.0) | L9670302 | L9707302 |
| AX-65 with internal baffle, 220 V, 250 W | 3.6 (8.0) | L9670312 | L9707312 |
| AX-65 with standard cold cap, 115 V, 200 W | 3.6 (8.0) | L9670303 | L9707303 |

| Description | Wt. kg (lbs) | Part Number |
|--|--------------|-------------|
| Accessories | | |
| Santovac 5 diffusion pump fluid, 40 cc | 0.5 (1.0) | 95405001 |
| Santovac 5 diffusion pump fluid, 65 cc | 0.9 (2.0) | 695405002 |
| DC-704 diffusion pump fluid, 500 cc | 1.4 (3.0) | 695474005 |
| DC-705 diffusion pump fluid, 500 cc | 1.4 (3.0) | 695475005 |
| Internal baffle kit | 0.9 (2.0) | R1160065 |
| Centering ring for inlet flange, NW50 | 0.5 (1.0) | KC50SB |
| Centering ring for inlet flange, ISO-63 | 0.2 (0.5) | IC063SV |
| Centering ring for foreline flange, NW16 | 0.2 (0.5) | KC16SB |
| Instruction manual | | 699901062 |

Water-Cooled Baffles



Technical Specifications

330 Water-Cooled

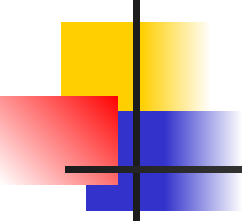
| | |
|---------------------|-----------------------------|
| Nominal Conductance | 3,550 l/s (air) |
| Recommended Flow | 0.1 to 0.2 gpm (20-40 l/hr) |

334 Water-Cooled

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| Nominal Conductance | 900 l/s (air) |
| Recommended Flow | 0.1 to 0.2 gpm (20-40 l/hr) |

Ordering Information

| Description | Weight kg (lbs) | Part Number |
|---|--------------------|----------------|
| Low-profile 330 Water-cooled baffle - ASA | 9.0 (20.0) | F8600310 |
| Low-profile 330 Water-cooled baffle - ISO | 9.0 (20.0) | F8600311 |
| Low-profile 330 Water-cooled baffle - CFF | 9.0 (20.0) | F8600312 |
| 334 Water-Cooled Baffle - ASA | 4.5 (10.0) | F8286304 |
| 334 Water-Cooled Baffle - ISO | 4.5 (10.0) | F8286305 |
| 334 Water-Cooled Baffle - CFF | 4.5 (10.0) | F8286306 |



1.5. Физико-химические методы получения вакуума



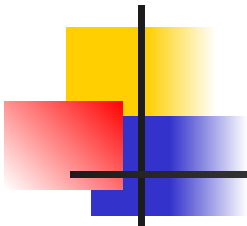
Электрофизические насосы всех типов являются накопительными, т. е. откачиваемые газы поглощаются в насосе в виде:

- хемосорбционных слоев,
- химических соединений,
- и «замурованных» атомов.

Диапазон давлений для этих насосов $1^{-1} - 10^{-12}$ Па.

Эффективность сорбции зависит от природы сорбента и газа.

Основной механизм связывания химически активных газов - **хемосорбция** - химическая сорбция, поглощение жидкостью или твёрдым телом веществ из окружающей среды, сопровождающееся образованием химических соединений.



Инертные газы при НУ внедряются в поверхность твердого тела только в ионизированном состоянии при определенной энергии ионов.

Химически активная поверхность, поглощающая газы, может быть:

- Пористой структурой с высокоразвитой поверхностью,
- Однократным или периодическим нанесением пленки поглощающего материала,
- Непрерывным возобновлением поверхности.

Поглощение газов происходит химически активными металлами за счет химического взаимодействия и физической сорбции.

Физическая сорбция (за счет образования слабой физической связи) происходит при температуре близкой к температуре кипения сорбента (или **геттера**) или ниже при данном давлении, хемосорбция при более высоких температурах.

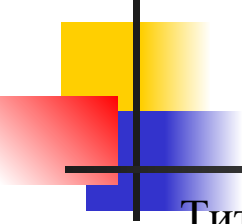


Требования к газопоглотителям:

- Универсальность хемосорбционных свойств по отношению к максимальному числу газов;
- Максимальная поглотительная способность – т.е. объем газов удерживаемых поглотителем;
- Малое давление паров газопоглотителя и давление диссоциации продуктов реакции;
- Устойчивость материала поглотителя на воздухе после прогрева в вакууме и высокая химическая активность;
- Легкое обезгаживание;
- малая цена.

Наиболее подходят: Ti, Zr, Ta, Ва, Мо, Hf, Er, лантаноиды, скандий, итрий.

По комплексу свойств наиболее подходит **титан**.



Титан, представляющий собой нейтральную пластину или электрод, эродирует при взаимодействии с ионами, образующихся под воздействием высокого напряжения.

Электрический потенциал, использующийся для ионизации, обычно находится в диапазоне от 3 кВ до 7 кВ.^{0С}

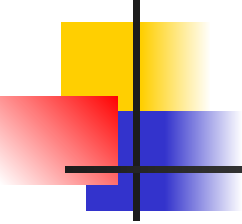
Молекулы газа бомбардируются высокоэнергетичными электронами, теряя один или несколько своих электронов, в результате становясь положительными ионами.

Под действием сильного электрического поля положительные ионы ускоряются, и бомбардируют титановый катод.

В результате соударений катод эродирует, распыляясь по стенкам насоса.

Свеженапыленный слой титана является сильным химическим реагентом, который вступает в реакцию с химически активными газами.

Соединение, образующееся в результате химической реакции, оседает на элементах и стенках насоса.



Химически активными являются газы: кислород, азот, оксид и диоксид углерода, вода. Благородные газы, такие как гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, являются химически неактивными.

Они откачиваются методом «ионного захоронения», при котором инертные атомы «заштукатуриваются» распыленными атомами геттера.



Основные процессы при поглощении газов:

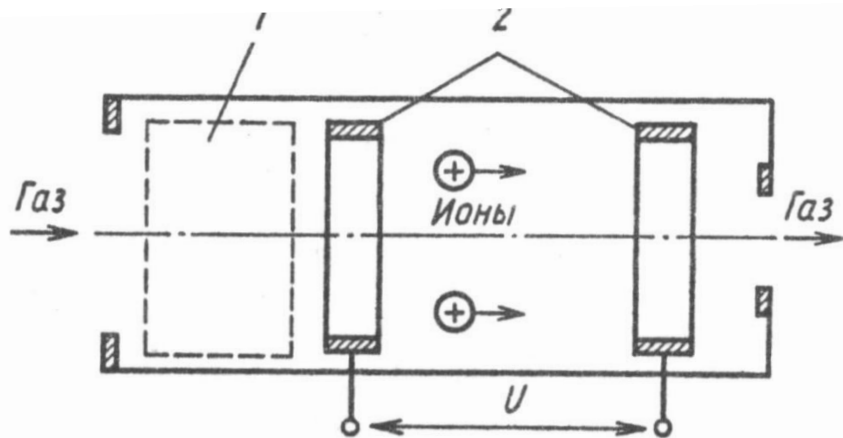
- сорбция,
- ионная откачка,
- «замуровывание» ионов.

Ионная откачка – это поглощение ионизированных молекул газа в результате внедрения ускоренных электрическим полем ионов в материал геттера с последующей диффузией.

Ионы химически активных газов образуют химические соединения, а ионы инертных газов – удерживаются в кристаллической решетке физическими связями.

При непрерывной ионной бомбардировке и высокой скорости распыления геттера часть ионов «замуровывается».

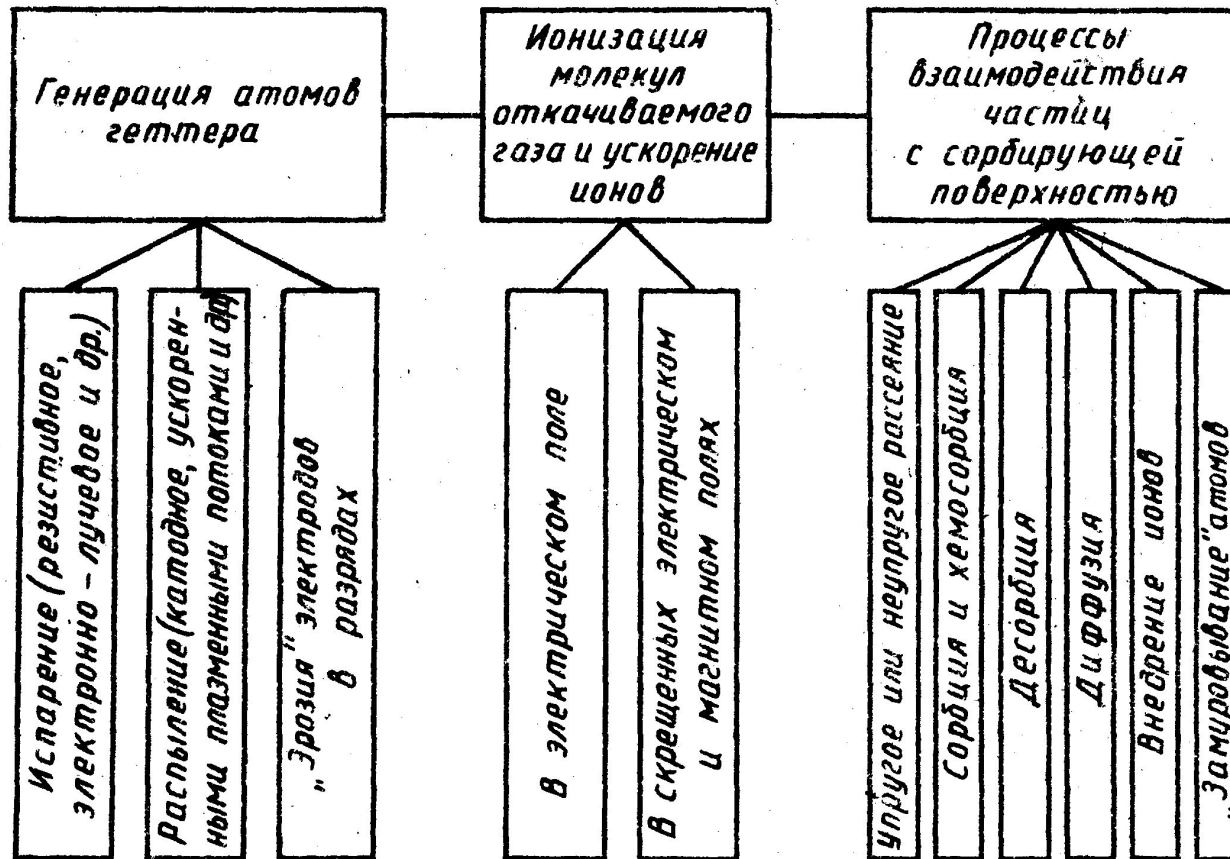
Ионная откачка

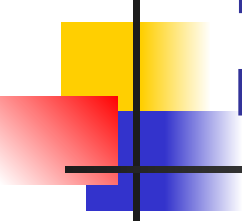


Наиболее эффективная ионная откачка осуществляется β -излучением.

Эффективность ионизации составляет электронами средних энергий прошедших разность потенциалов 100 В, в зависимости от рода газа составляет от 3 до 25 пар ионов на 1 м пути при давлении 1 Па.

Схема физических процессов поглощения газов электрофизическими средствами откачки

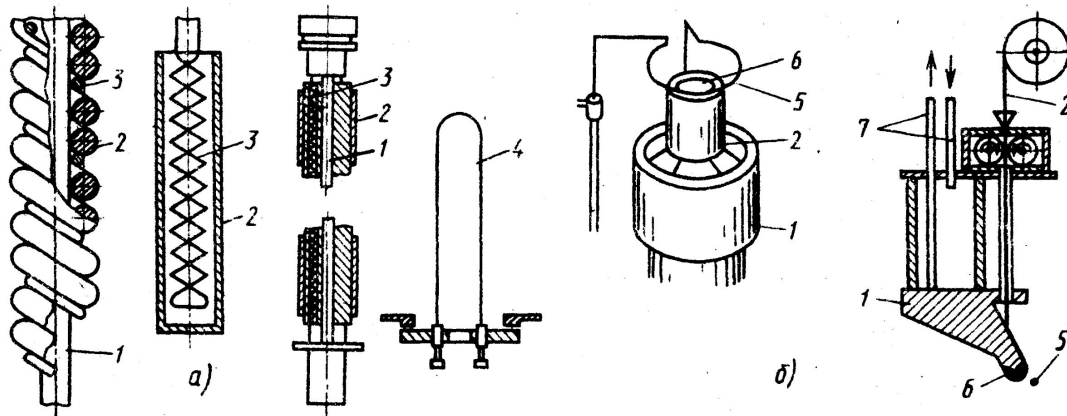




Методы нанесения геттера из паровой и плазменных фаз:

- Испарение резистивным или электронно-лучевым нагревом (насосы типа СТОИ, НИБ, ОГИИ);
- Распыление высокоэнергетичными ионами (насосы типа ИИД);
- Электродуговое испарение (насосы типа ИИИ).

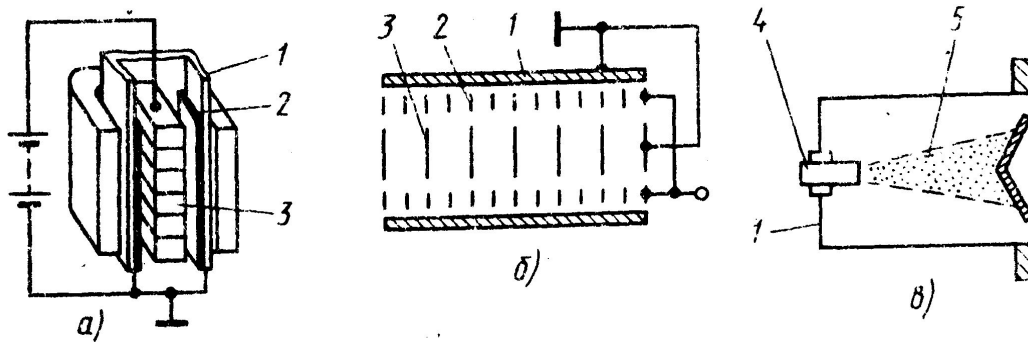
Испарительные геттеры



Производится нагрев геттера 2 до температуры близкой к плавлению а) – твердофазные и с образованием жидкой фазы б) посредством нагревателя 3 или пучком с катода 5.

Главный недостаток – наличие накаливаемых частей, что ограничивает ресурс и управление насосом.

Метод катодного распыления

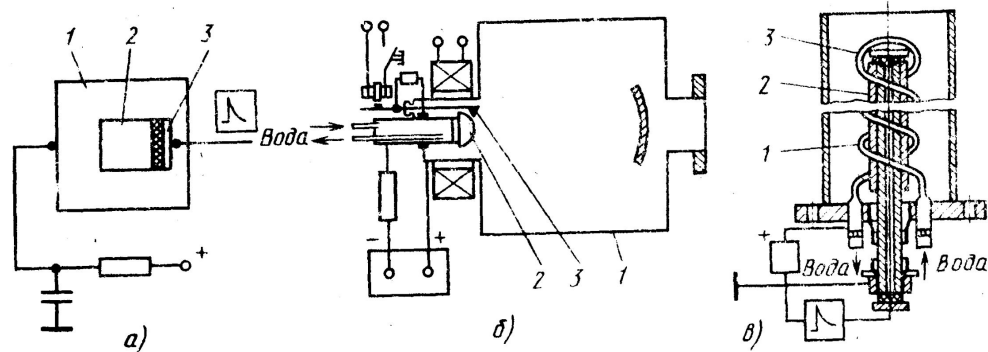


Метод катодного распыления основан на распылении атомов материала катода ионами высокой энергии, образуемых в плазме разряда, горящего в атмосфере откачиваемого разра. Различают системы: диодную а), триодную б) и ускоренный пучок в).

Достоинство – «холодные» электроды – высокий ресурс.

1- корпус, 2 – катод, 3 – анод, 4- ускоритель плазмы, 5 – поток плазмы.

Эрозионные плазменные испарители

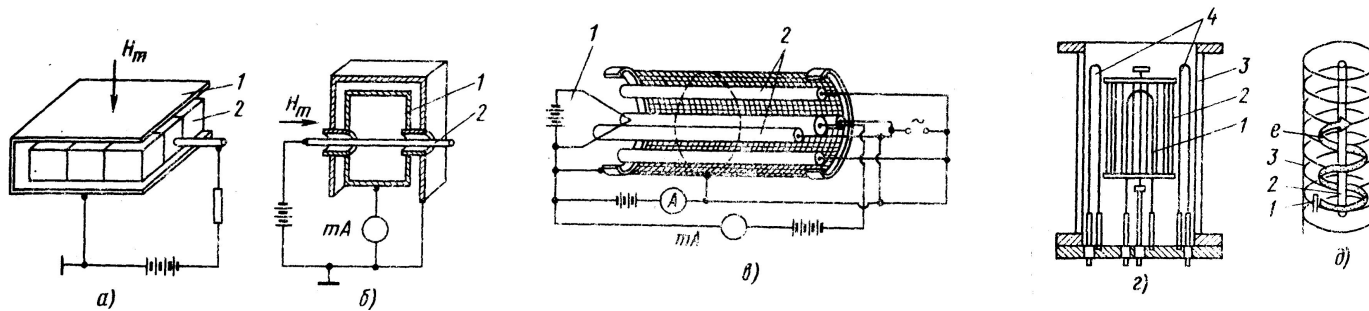


Для получения сорбирующих покрытий используют эрозию электродов в электрических разрядах: а) искровом, б) дуговом - постоянного и в) импульсного разряда.

Достоинство – искровых насосов – регулирование расхода геттера изменение частоты инициирующих импульсов. Дуговые разряды имеют высокий КПД – до 80%. Давление запуска достигает 10 Па.

1- анод, 2 –расходный катод, 3 – поджигающий электрод.

Ионизаторы

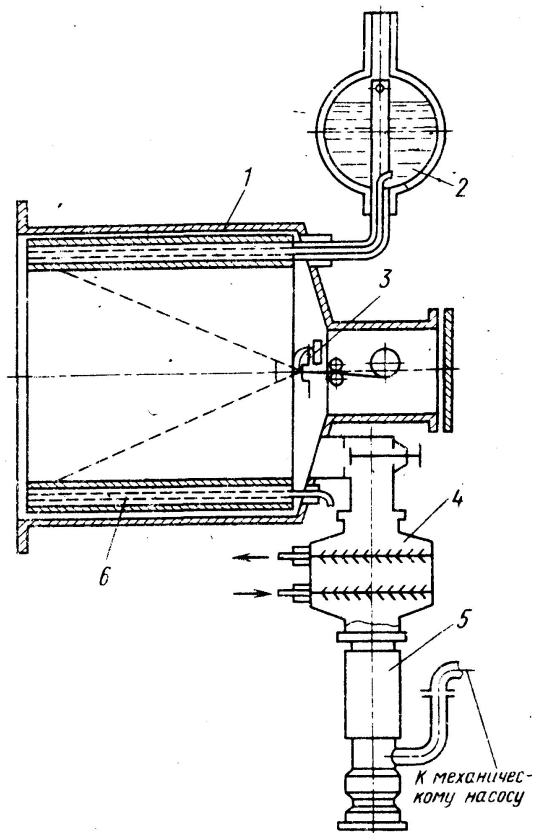


А) Ячейка Пеннинга, б) обращенный магнетрон, в) квадрупольный, г) с анодной сеткой, д) орбитронный.

1 – катод, 2 – анод, 3 – корпус, 4 – нагреватель.

В системах а-в удлинение пути электронов за счет движения в скрещенных полях, в системах г-д – за счет удлинения электродов.

Испарительные геттерные насосы типа СТОН



Испаряется титановая проволока электронным пучком и напыляется на криогенный вкладыш.

Жалюзи для защиты вакуумной камеры от геттера.

Скорость до $200\text{ м}^3/\text{с}$, от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-9}$ Па при охлаждении азотом.

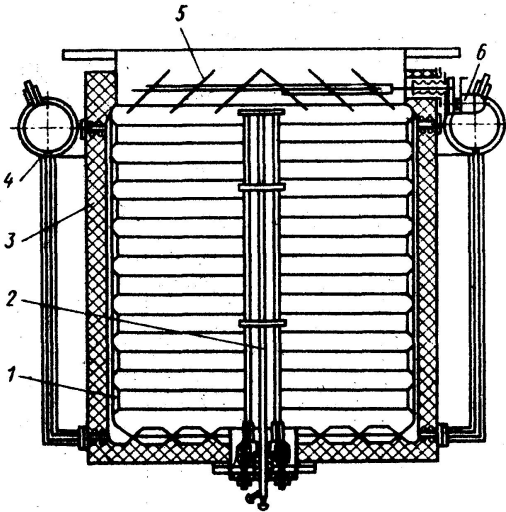
1- корпус, 2- сосуд Дьюара, 3- электронно-лучевой жидкостной испаритель с системой подачи проволоки, 4 – ловушка, 5 – дифнасос, 6 – охлаждаемый вкладыш.

Недостатки:

ограниченный ресурс,

при высоком давлении происходит отравления пленками соединений.

Испарительные геттерные насосы типа НИБ



Испаряется титановая или биметаллическая проволока (титан на молибдене).

Жалюзи для защиты вакуумной камеры от геттера.

Скорость по H_2 до $200\text{ м}^3/\text{с}$,

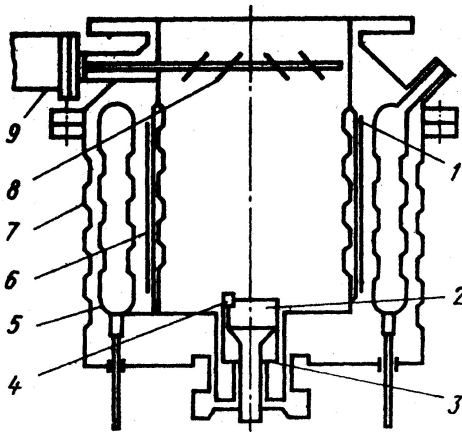
давление от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-9}$ Па при охлаждении азотом.

1- корпус, 2- блок испарителей, 3- теплоизоляция, 4 – накопитель жидкого азота, 5 – поворотный экран-жалюзи, 6 привод жалюзей.

Недостатки:

- ограниченный ресурс,
- при высоком давлении происходит отравления пленками соединений.

Дуговые насосы типа НДМ



Дуговой разряд возбуждается плазмой по поверхности катода – испарителя.

Жалюзи для защиты вакуумной камеры от геттера.

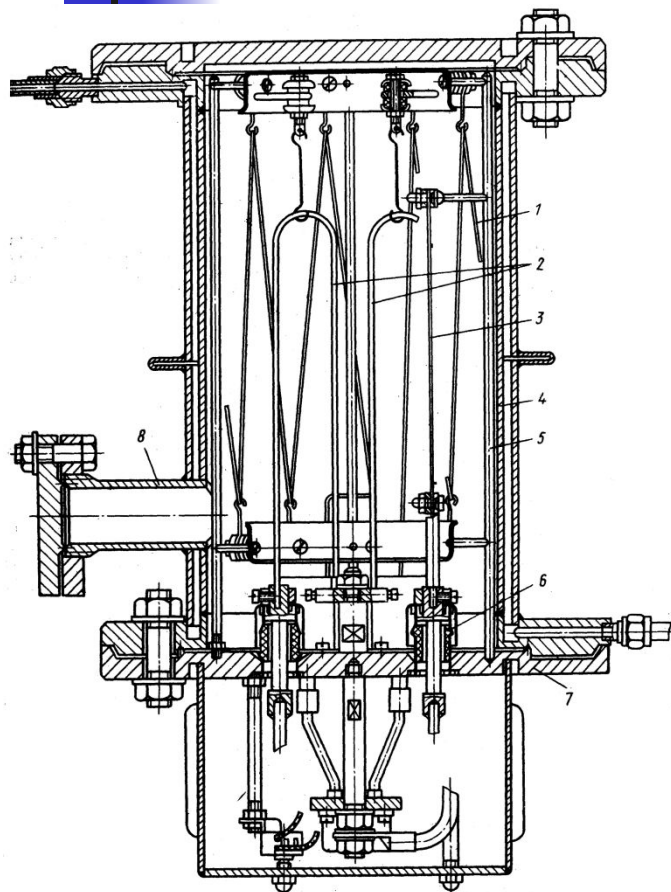
Скорость по H_2 до $200\text{ м}^3/\text{с}$, давление от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-8}$ Па при охлаждении азотом.

1- корпус, 2- блок испарителей, 3- экран, 4 – поджигатель, 5-накопитель азота, 6 –нагреватель, 7- кожух, 8 – поворотный экран-жалюзи, 9 - привод жалюзей.

Недостатки:

- ограниченный ресурс катода,
- Все геттерные плохо качают инертные газы .

Геттерно-ионный насос типа ГИН



Кроме хемосорбции происходит ионизация газов, с последующим внедрением ускоренных ионов в поверхность распыленного геттера.

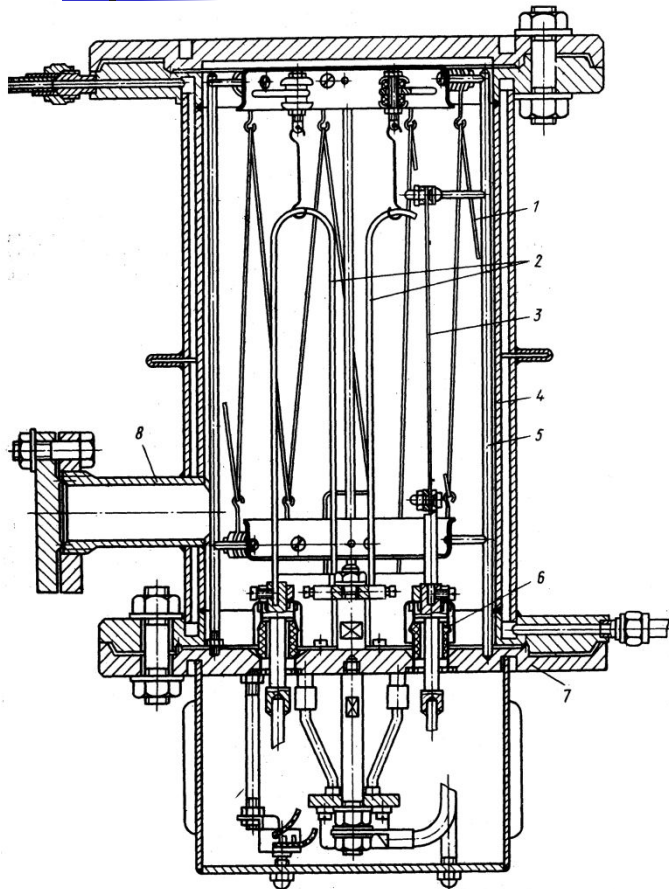
Ионизация и ускорение увеличивает и скорость откачки и объем поглощения геттера.

Функции испарения и ионизации разделены.

Испаритель резистивный – 2, а система ионизации состоит из сеточного анода 1 (1,2кВ) и катода 3.

Электроны с катода и испарителя колеблются вокруг сетки и эффективно ионизуют остаточный газ.

Геттерно-ионный насос типа ГИН



Скорость по H_2 до $20\text{м}^3/\text{с}$,
давление от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-9}$ Па при охлаждении азотом.

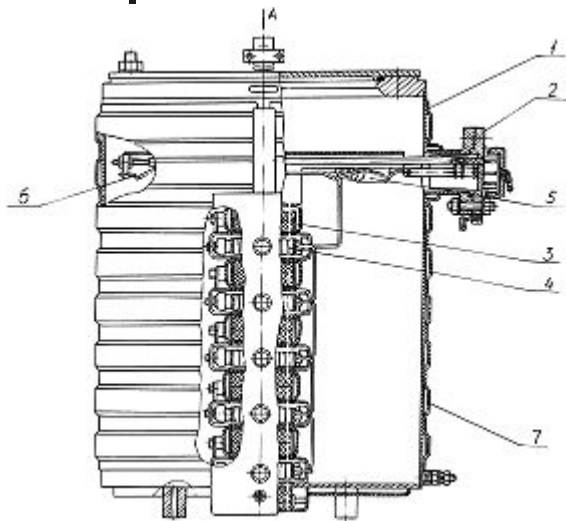
1- анод, 2- испаритель, 3- катод, 4 – корпус, 5 – каркас, 6 - токоввод.

Недостатки:

- ограниченный ресурс по титану,
- чувствительность к разгерметизации.

Имеются миниатюрные насосы типа НГ для поддержания высокого вакуума.

Электроразрядные геттерно-ионные насосы типа ЭГИН (<http://vacsta.ru>):

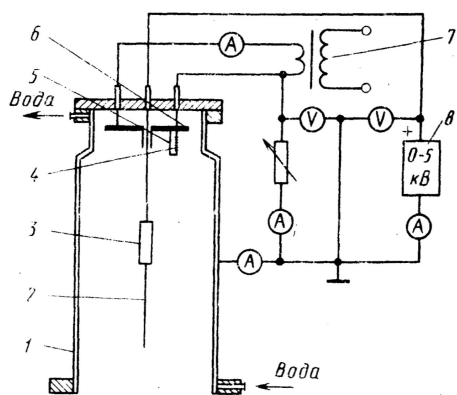


Откачка в насосе основана на удалении частиц газа в результате взаимодействия основных процессов: ионизации и катодного распыления посредством тлеющего разряда в магнитном поле, внедрения и замуровывания ионов в катодах, хемосорбции газов пленками напыляемого геттера.

Скорость по воздуху до $10\,000\text{ л}^3/\text{с}$,
давление от 6 до $6 \cdot 10^{-8}\text{ Па}$

1 - корпус, 2 - узел испарителей, 3 - магнитный блок, 4 - электродный блок, 5 - высоковольтный блок, 6 - испаритель, 7 - рубашка водяного охлаждения

Орбитальный геттерно-ионный насос типа ОГИН



Эмитируемые нитью накала электроны вращаются вокруг анода, ионизируя газ. Часть попадает на геттер и испаряет его. Титан осаждается на охлаждаемый корпус.

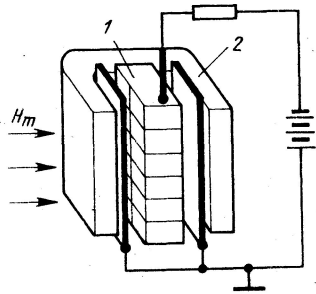
Скорость по воздуху до $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$,
давление от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-12} \text{ Па}$ при охлаждении азотом.

1- корпус, 2- анод, 3- геттер, 4 – источник электронов, 5 – экран-токоввод, 6 – отражательный электрод, 7 – трансформатор нагрева, 8- источник питания.

Недостатки:

- ограниченный ресурс по титану,
- чувствительность к разгерметизации.

Магнитные электроразрядные насосы



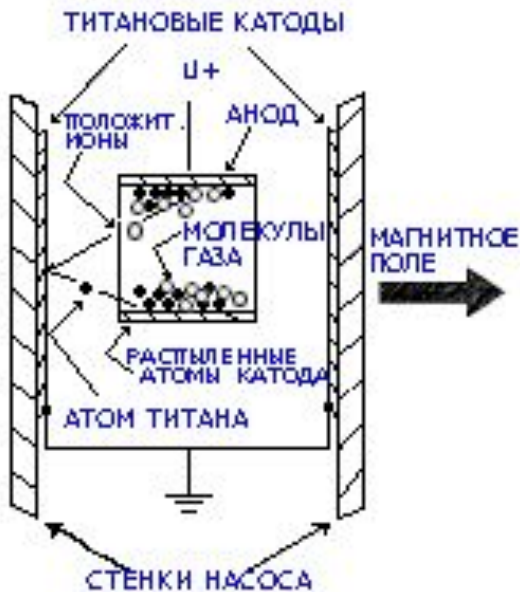
Саморегулирование скорости испарения геттера обеспечивается в магнитных электроразрядных насосах, в которых горит газовый разряд в скрещенных полях.

В диодном насосе между двумя катодными пластинами 1 расположен ячеистый катод 2, на который подается напряжение в несколько кВ.

Разряд возбуждается и горит тем интенсивнее, чем выше давление. Ионы попадают на катод и вызывают испарение геттера, который осаждается на ячейках анода и сорбирует газ.

Насосы надежны, просты конструктивно, имеют высокий ресурс и устойчивы к авариям.

Принцип работы магнитных электроразрядных насосов

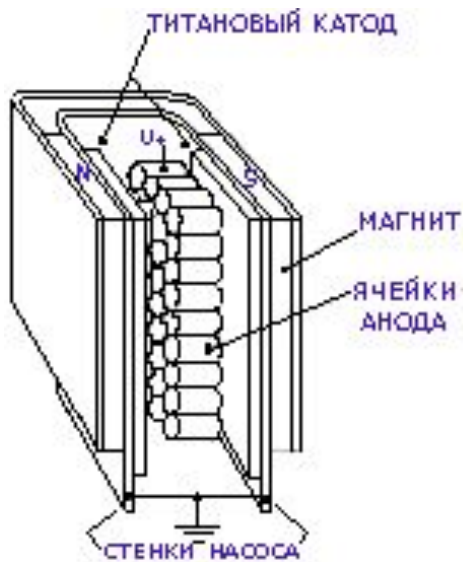


В насосе анод может представлять собой короткую секцию металлической трубки с круглым или квадратным сечением.

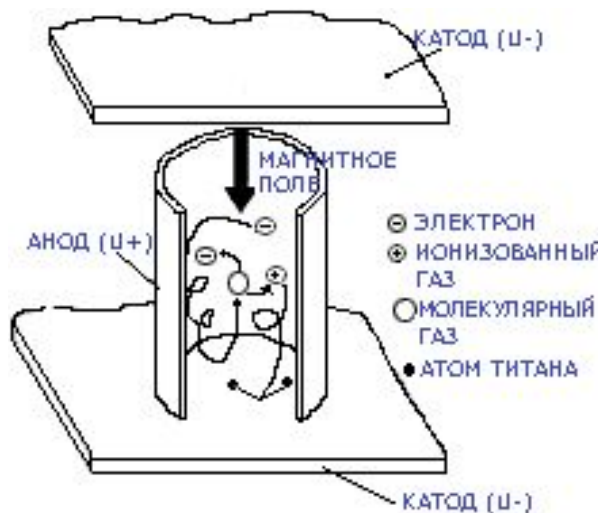
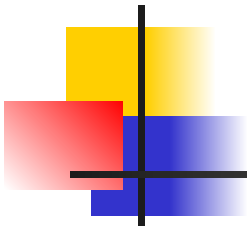
Напротив каждого открытого торца расположена подсоединенная к «земле» титановая пластина, которая является катодом.

Внешние магниты создают постоянное магнитное поле, обычно в диапазоне от 800 до 2000 Гс, параллельное оси анода.

Сгонфигурированная подобным образом ячейка представляет собой диодный насос.



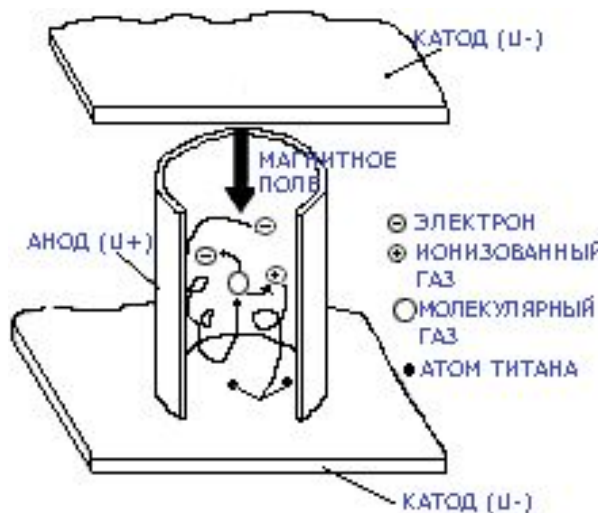
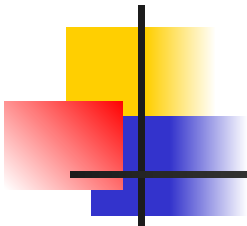
Затем ячейки заключаются в подходящую оболочку и данная сборка становится насосом. Для увеличения скорости откачки в корпус необходимо заключить больше ячеек с соответствующим образом увеличенным катодом



Функция анодной ячейки заключается в создании с помощью магнитного поля «облака» электронов с высокой энергией.

Магнитное поле заставляет двигаться электроны по спиральной траектории, что увеличивает вероятность их соударений с атомами и молекулами газа, увеличивая количество образующихся ионов.

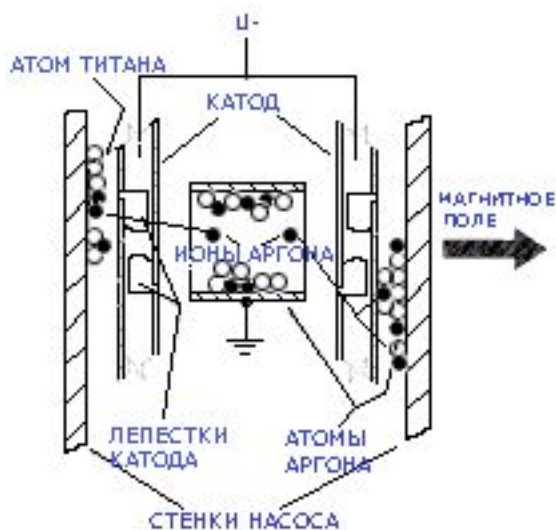
Данные ионы разгоняются высоким анодным напряжением в направлении катода, бомбардируют его, и в результате соударения выбивают атомы титана.



Выбитые из катода атомы осаждаются на внутренних поверхностях насоса, где вступают в химическую реакцию с активными газами, образуя устойчивые химические соединения.

В результате, эффективность откачки зависит от плотности электронного облака (которая определяет количество образующихся электронов) и коэффициента распыления (которая определяет количество образующегося геттерного материала). Плотность электронов зависит от геометрии ячейки Пеннинга и от напряженностей электрического и магнитного полей.

Регулируя данные параметры, можно модифицировать характеристики насоса, чтобы они соответствовали конкретному приложению



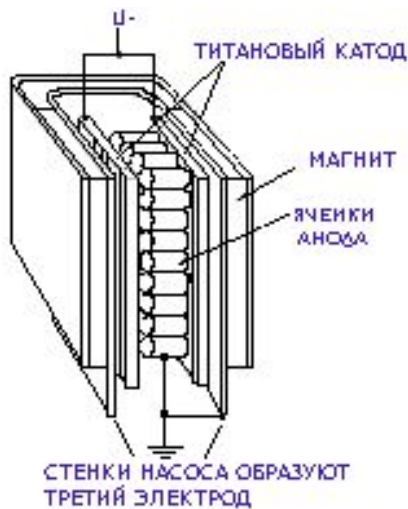
Количество образованной пленки из геттерного материала является функцией от количества соударений с ионами откачиваемого газа. Таким образом, ионно-геттерный насос является саморегулирующимся – он распыляет столько геттерного материала, сколько необходимо при данном давлении.

По этой причине при очень низких давлениях катодная пластина практически не эродирует и потребление электрической энергии очень мало.

Некоторые благородные газы откачиваются в результате ионизации. В этом случае под действием ускоряющего напряжения они имплантируются (по крайней мере, временно) в катод. Другие инертные газы откачиваются в результате того, что атомы, оказавшиеся на поверхности элементов и стенок насоса, «заштукатуриваются» распыленными атомами катода

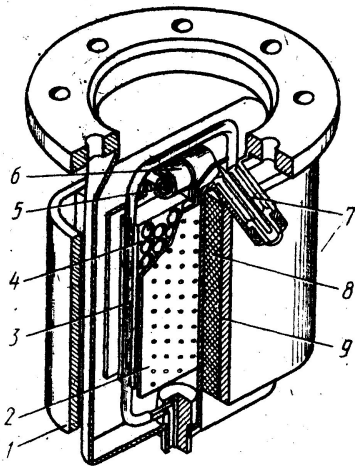
Thermionic, США

Varian Vacuum Technology, Швейцария



Когда необходимо иметь дело со значительным количеством благородных газов, необходимо использовать конфигурацию триод ионного насоса. В триодном насосе катод находится под отрицательным потенциалом и состоит из тонких пластин, благодаря чему выбивание атомов катода происходит при наклонно-скользящем соударении ионов по катоду. Благодаря этому они не имплантируются в катод в заметном количестве и нет большого выхода из катода ранее внедренных атомов. Вместо этого атомы газа или вступают в химическую реакцию, или покрываются слоем распыленных атомов геттера.

Магнитные электроразрядные насосы НМДО



Скорость по воздуху до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$,
давление от 10^{-1} до 10^{-5} Па при охлаждении водой.

Особенность – потенциал подается на катод.

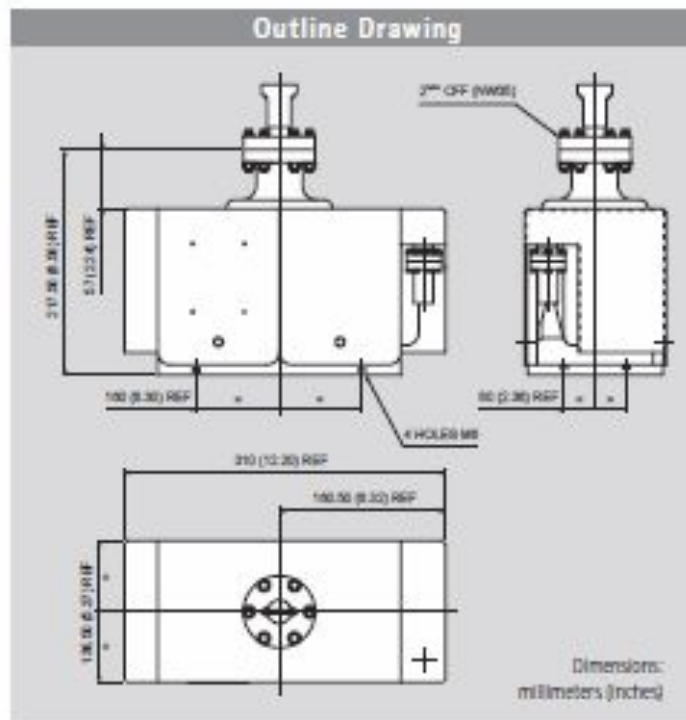
1 – корпус, 2 – катод, 3 – трубка охлаждения, 4 – анод, 5 – изолятор, 6 – экран, 7- токоввод, 8 – магнит, 9 – магнитопровод.

Промышленное технологическое оборудование ООО
"Призма«, г. Искитим <http://www.ooo-prizma.ru/>

Производительность от 6 до 1200 л/с,
Предельное остаточное давление, $4,0 \cdot 10^{-8}$ Па



Vaclon Plus 40

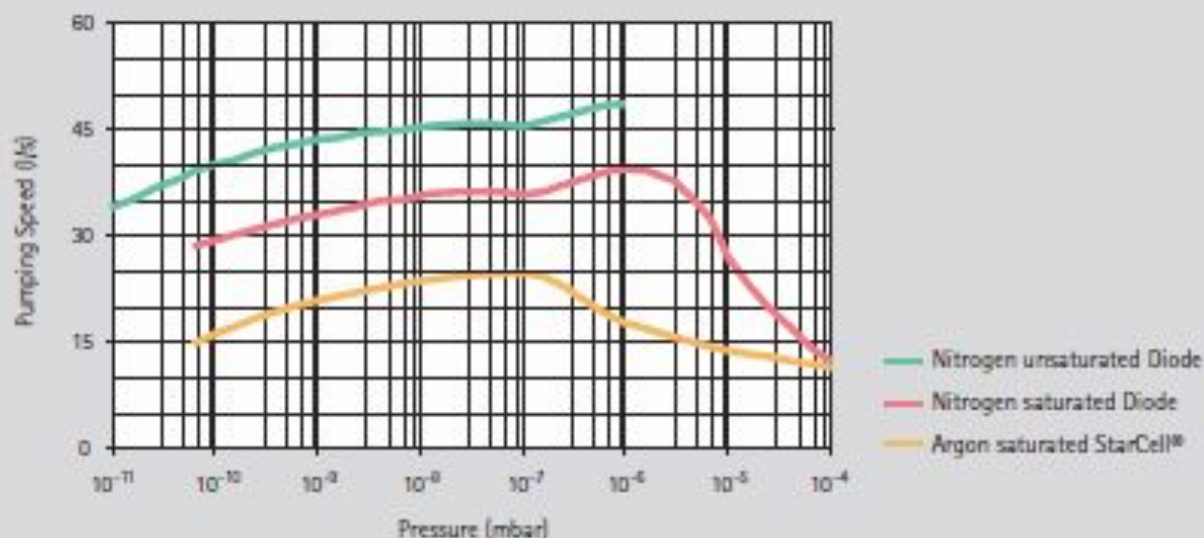


Technical Specifications

| | StarCell® | Noble Diode | Diode |
|---|---------------------------------|-------------------------|--------|
| Nominal pumping speed for Nitrogen (*) (l/s) | 34 | 36 | 40 |
| Operating life at 1×10^{-6} mbar (hours) | 80,000 | 50,000 | 50,000 |
| Maximum starting pressure (mbar) | $\leq 5 \times 10^{-2}$ | $\leq 1 \times 10^{-3}$ | |
| Ultimate pressure | Below 10^{-11} | | |
| Inlet flange | 2" CFF (NW 35) AISI 304 ESR SST | | |
| Maximum baking temperature (°C) | 350 | | |
| Weight, kg (lbs) | 17 (37) | | |

(*) Tested according to ISO/DIS 3556-1-1992

Vaclon Plus 40 - Pumping Speed vs Pressure



Ordering Information

| Description | Part Number |
|---|-------------|
| Pumps | |
| Diode | 9191210 |
| Diode with additional 2 3/4" CFF port | 9191213 |
| Diode without magnets | 9191214 |
| Noble Diode | 9191220 |
| Noble Diode with additional 2 3/4" CFF port | 9191223 |
| Noble Diode without magnets | 9191224 |
| StarCell® | 9191240 |
| StarCell® with additional 2 3/4" CFF port | 9191243 |
| StarCell® without magnets | 9191244 |

| Description | Part Number |
|--|-------------|
| HV Cables | |
| HV Bakeable cable, radiation resistant, 4 m (13 ft.) long, with interlock | 9290705 |
| HV Bakeable cable, radiation resistant, 7 m (23 ft.) long, with interlock | 9290707 |
| HV Bakeable cable, radiation resistant, 10 m (33 ft.) long, with interlock | 9290708 |
| HV Bakeable cable, radiation resistant, 20 m (66 ft.) long, with interlock | 9290709 |

Replacement Parts



Комбинированные насосы

Это совокупность нескольких типов насосов в одном корпусе:

- Сорбционного и испарительно-ионного насосов,
- Дугового и магнитно-разрядного насосов и т.п.

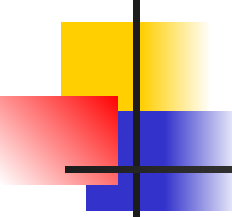
Целесообразность связана с тем, что геттерные насосы лучше откачивают химически активные газы, но не пригодны для инертных и углеводородов.

Агрегаты сверхвысоковакуумные комбинированные магниторазрядные геттерные типа АСВМГ (<http://vacsta.ru>):



Принцип действия агрегата определяется работой сверхвысоковакуумного комбинированного насоса, который представляет собой комбинацию магниторазрядных модулей, испарителя титана и криогенного экрана, охлаждаемого жидким азотом.

Скорость по воздуху до $5000 \text{ л}^3/\text{с}$,
давление до $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$



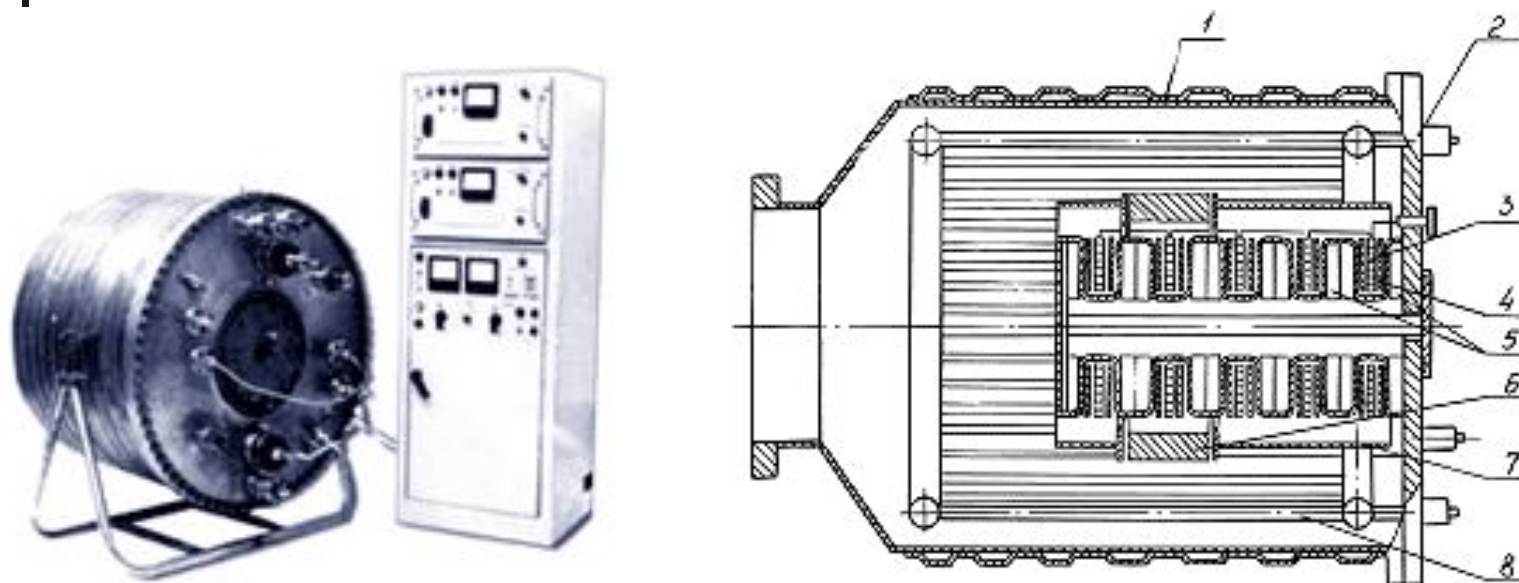
Насос магниторазрядный диодный испарительный НМДИ-16/40(<http://vacma.ru>):

Применяется для получения высокого и сверхвысокого вакуума в устройствах криогенной техники, имитаторах космических условий, в металлургии в процессе очистки металлов, в напылительной технике, в установках термоядерного синтеза и др.

Откачка основана на удалении частиц газа в результате взаимодействия основных процессов: ионизации и катодного распыления посредством тлеющего разряда в магнитном поле, возгонки титана с электродугового испарителя, внедрение и замуравывание ионов в катодах, хемосорбции газов пленками напыляемого геттера.

Откачивание насоса происходит в результате приложения разности потенциалов 7 кВ между ячеистым анодом и катодами электродного блока, а также за счет распыления титана под действием низковольтного дугового разряда в вакууме, возбуждаемого между электродуговым испарителем и корпусом насоса, служащим анодом дугового испарителя.

Насос магниторазрядный диодный испарительный НМДИ-16/40(<http://vacma.ru>):



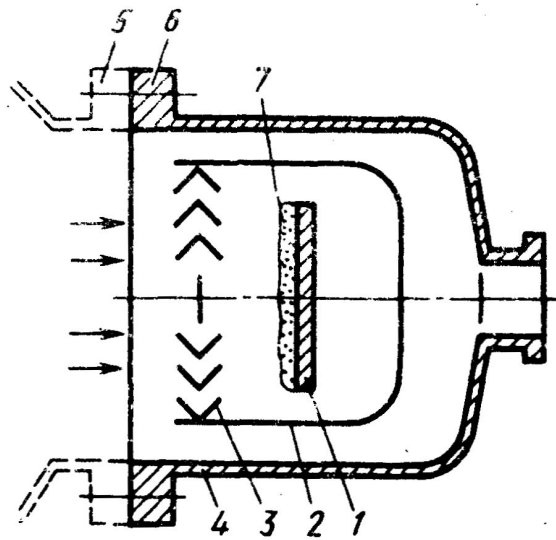
1 - корпус, 2 - днище, 3 - анод, 4 - катод, 5 - постоянные магниты, 6 - электродуговой испаритель титана, 7 - защитный экран, 8 - сорбционная панель



Насос магниторазрядный диодный испарительный НМДИ-16/40(<http://vacma.ru>):

| Наименование параметра | НМДИ-16/40 |
|--|---|
| Наибольшая быстрота действия в диапазоне давлений $1,3 \times 10^{-3}$ - $6,6 \times 10^{-6}$ Па, л/с: | по азоту и воздуху 16000; по водороду 40000 |
| Наибольшее давление запуска, Па | 13 |
| Наибольшее рабочее давление, Па | $6,6 \times 10^{-2}$ |
| Предельное остаточное давление, Па | $6,6 \times 10^{-8}$ |
| Расход охлаждающей воды, л/ч | 1500 |
| Расход жидкого азота, л/ч | 11 |
| Диаметр условного прохода входного патрубка, мм | 630 |
| Габаритные размеры, мм | 1230x1020x1060 |
| Масса, кг | 500 |

Схема крионасоса



1 – криопанель, 2 – экран, 3 – жалюзи,
4 – корпус, 5 – и 6 фланцы, 7 –
криоосадок – конденсат.

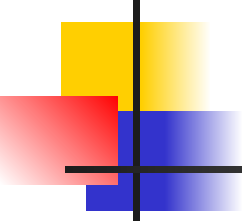
Быстродействие до 4000 л/с,
Время регенерации насоса 2-3 часа.

Криогенный насос НВК-200-1,5





1.6. Измерение вакуума



Манометры, предназначенные для измерения давления ниже атмосферного называются вакуумметрами. Они состоят обычно из измерительного преобразователя давления и измерительного блока. Преобразователь давления герметично присоединяется к вакуумной камере.

Вакуумметры классифицируют:

- по принципу действия
- и по методу измерения давления.

По методу измерения делятся на прямые и косвенные.

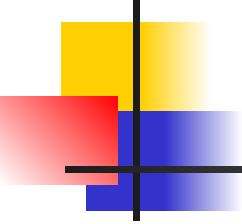


Прямые – измеряющие непосредственно давление, как отношение силы к площади. Имеются:

- Жидкостные,
- Грузопоршневые,
- Деформационные.

Показания этих вакуумметров не зависят от рода газа.

Нижний предел измерений 10^{-5} Па.



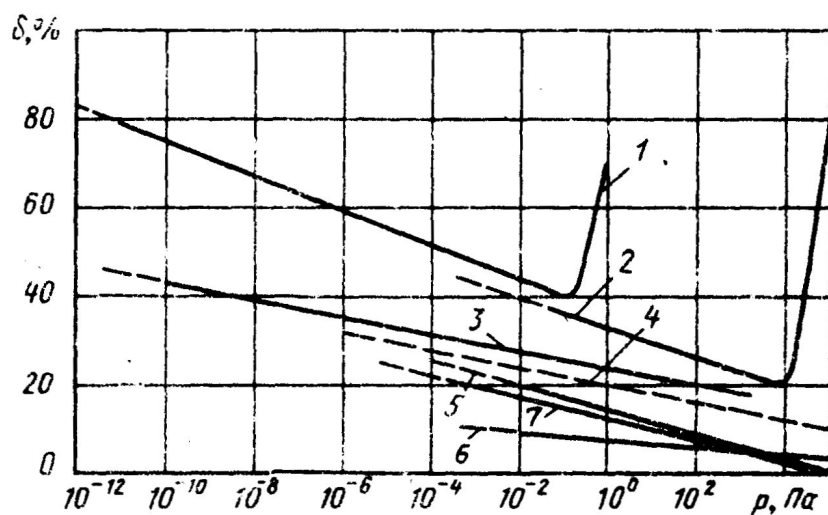
Косвенные – принцип действия основан на использовании зависимости некоторых физических процессов от давления.

Эти приборы измеряют ФВ, связанные с давлением определенной функциональной зависимостью. Различают:

- Ионизационные
- Вязкостные,
- Радиометрические,
- Тепловые.

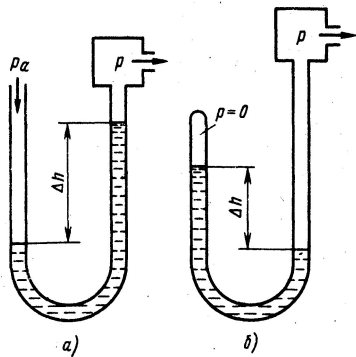
Их показания зависят от рода газа. Диапазон измерений и вид градуировочной характеристики устанавливаются по результатам градуировки для определенного газа.

Погрешности и диапазоны измерений различных вакуумметров



- 1- ионизационных магнитных электроразрядных,
- 2 – тепловых,
- 3 – ионизационных электронных,
- 4 – вязкостных,
- 5 – деформационных,
- 6 – жидкостных.

Жидкостные U-образные вакуумметры



Работа основана на уравнивании измеряемого давления или разности давлений столба жидкости.

Для исключения действия капиллярных сил диаметр трубки не менее 7 мм.

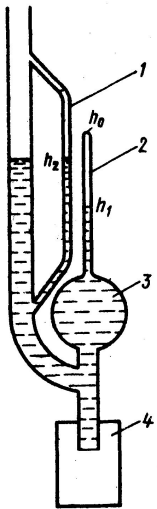
Измеряемое давление, Па:

$p = p_a - \rho_{ж} * g * \Delta h$, p_a – атмосферное давление, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, Δh – разность уровней.

Наиболее подходят жидкости с большой плотностью – ртуть.

Диапазон – 0-100 гПа.

Жидкостные компрессионные вакуумметры



Находящийся в измерительном баллоне 3 объемом V газ, давление p которого надо измерить, сжимается в измерительном капилляре 2 до некоторого объема V_1 , в следствии принудительного подъема жидкости из резервуара 4. Давление p_1 в измерительном капилляре уравнивается давлением столба жидкости в сравнительном капилляре 1 и давлением газа в вакуумной системе:

$$p_1 = pV / V_1 = \rho_{\text{ж}} * g * (h_2 - h_1) + p.$$

Измеряемое давление, Па: $10^{-3} - 10^3$. Погрешность 1-3%

Наиболее подходят жидкости с большой плотностью – ртуть.



Деформационные вакуумметры

Давление определяется по деформации упругого элемента под действием разности давлений. Различают:

- Трубчатые,
- Мембранные,
- Сильфонные.

Трубчатые (Трубка Бурдона)



Чувствительный элемент – тонкостенная металлическая или кварцевая трубка кругового или плоского сечения свернутая в спираль. диапазон измерения от 10^2 до 10^5 Па при точности 1% и времени запаздывания 0.2с.

Прочный, недорогой, однако наблюдается старение и гистерезис. Увеличение числа витков повышает чувствительность (диапазон до $1..10^5$ Па) при пренебрежимо малом гистерезисе отклонения от линейности не более 1%.

Используется при высоких температурах

Деформация трубка приводит к движению стрелки, которая связана с концом системой передач. Промышленность выпускает типы ВО и ВТИ.

Принцип работы трубки Бурдона



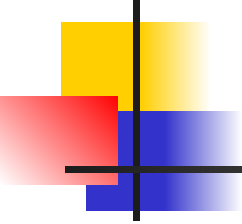


Сильфонные и мембранные вакуумметры

Давление определяется по деформации сильфона или мембраны под действием разности давлений.

При применении различных датчиков деформации (рассмотренных ранее) возрастают пределы и точность.

Пределы измерений датчиков типа ВС-Э1, МАС-Э1:
0,025- 0,1МПа, класс точности до 0,6.



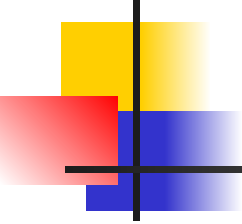
Для измерения деформации используются тензорезисторы, то есть такие резисторы, сопротивление которых изменяется при их линейной деформации. Существует три вида тензорезисторов:

- проволочные,
- фольговые
- и полупроводниковые.

Механизм возникновения тензочувствительности у проволочных и фольговых тензорезисторов имеет одну природу.

Сопротивление электрического проводника длиной l , с площадью поперечного сечения S выражается формулой:

$$R = \rho(l/S).$$



При увеличении длины проволоки вследствие ее упругой деформации на Δl ее диаметр уменьшается на Δd , причем относительные величины $\Delta l/l$ и $\Delta d/d$ связаны прямо пропорционально:

$$\Delta d/d = - 0.4 \Delta l/l.$$

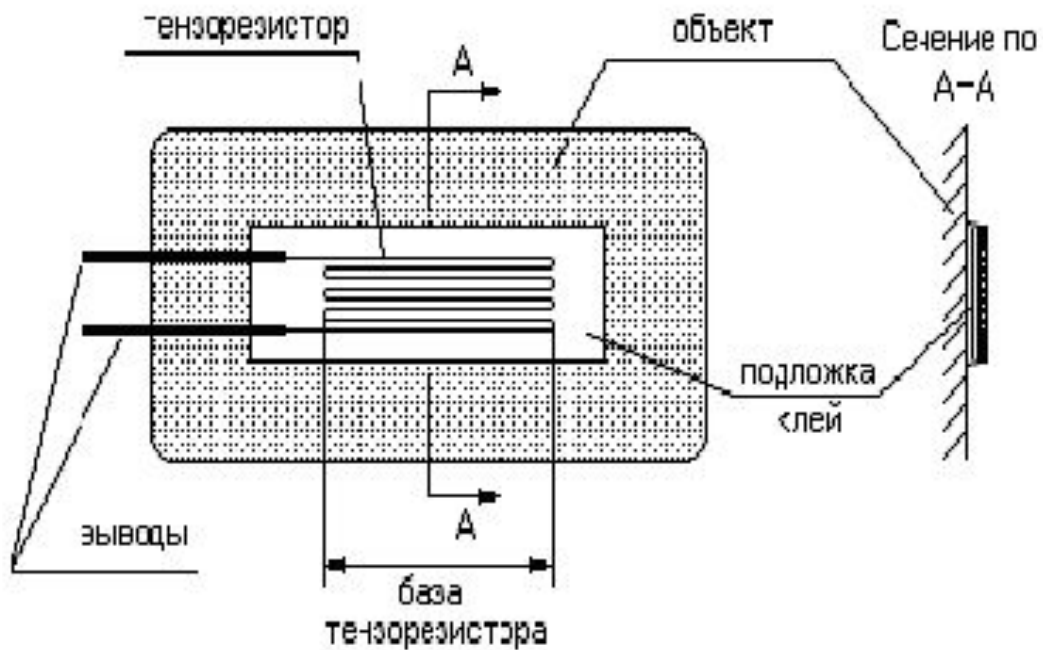
Кроме того при деформации проводника незначительно изменяется его удельное сопротивление ρ .

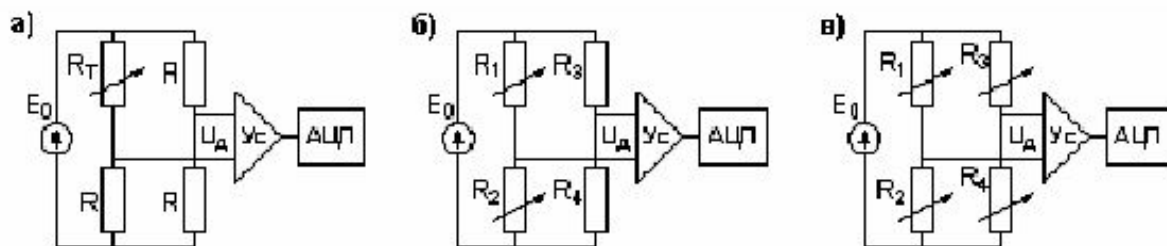
Прологарифмируем теперь исходное выражение и вычислим его дифференциал, заменив бесконечно малые на конечные приращения.

В результате получим выражение, связывающее относительные приращения:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \cdot \frac{\Delta d}{d}$$

Конструкция тензорезистора и его крепление





Для этого применяются мостовые схемы, которые уравниваются при отсутствии деформации.

В зависимости от доступности поверхностей объекта схемы включения тензорезисторов именуется «четверть моста» а), «половина моста» б) и «целый мост» в).

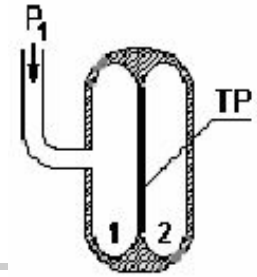
Сопротивления всех плеч моста, в том числе, сопротивления недеформированных тензорезисторов равны R .

Напряжение питания моста E_0 .

Выходное напряжение, вызванное деформацией тензорезисторов, возникает в измерительной диагонали и обозначено через $U_д$.

Измерительные преобразования при измерении давления с помощью тензорезистивного датчика





Внутренняя камера всех датчиков давления герметично делится упругой или мягкой мембраной на две полости.

В полости 2 датчика абсолютного давления создается вакуум. Упругим элементом является мембрана, на которой с помощью полупроводниковой технологии сформированы тензорезисторы ТР.

Эти тензорезисторы расположены на той стороне мембраны, которая находится в полости 2 и не подвергается воздействию среды, которая может быть агрессивной.

Площадь и жесткость этой мембраны должны быть известны с высокой точностью ибо в этом случае мембрана выполняет два преобразования: преобразование давления в силу через площадь мембраны и преобразование силы в деформацию тензорезисторов.

Датчик давления 408

(ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов на Дону)



Электронное устройство обеспечивает питание тензорезисторов, преобразует изменение сопротивления тензорезисторов в изменение токового выходного сигнала, компенсирует нелинейность тензопреобразователя и дополнительные погрешности, обусловленные температурой и другими влияющими факторами.

Датчик имеет корректоры для плавной настройки .

Измеряемые среды: газ, жидкость, пар

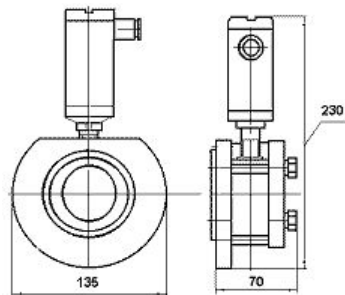
Пределы измерений:

- избыточное давление от 0,1 кПа до 100 МПа
- абсолютное давление от 25 кПа до 16 МПа
- разрежение от 0,1 кПа до 100 кПа
- давление-разрежение от +0,05 кПа до - 0,1...2,4 МПа
- разность давлений от 0,25 кПа до 2,5 МПа
- гидростатического давления от 0,25 м в.ст. до 25 м в.ст.

Выходной сигнал 0-5; 4-20 мА

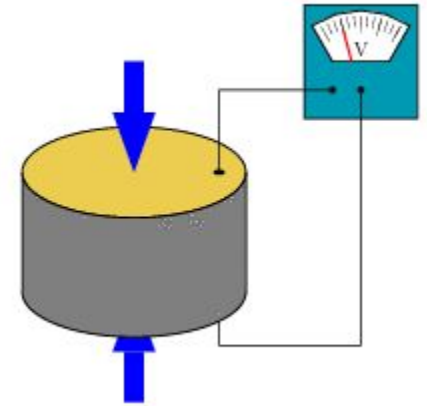
Основная погрешность 0,5 (0,25; 0,15)%

Рабочая температура 5...50 (1...80; -30...50, -50...80)°С



$$R = \frac{U - 12E}{20 \text{ mA}} + 50 \text{ Ом}$$

Датчики на основе пьезоэффекта



Пьезоэлектрический эффект — эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект).

Пьезоэлектрические датчики относятся к генераторным датчикам. ы.

Это означает, что материал, обладающий пьезоэффектом, выполняет преобразование силы в электрический заряд.

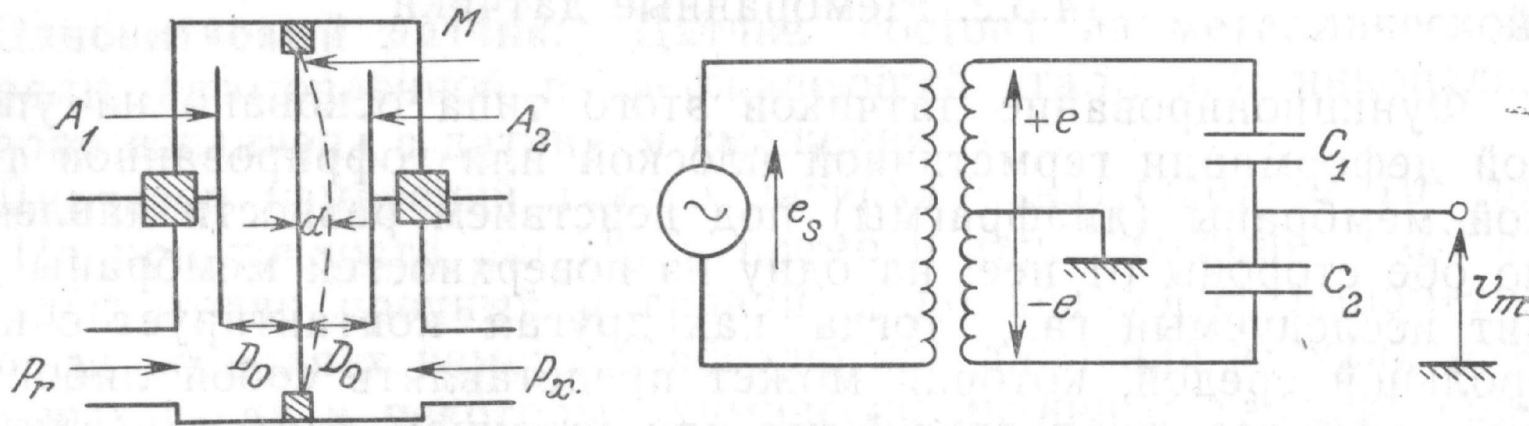
Природным материалом, который обладает пьезоэффектом, является кварц или горный хрусталь.



Датчики на основе пьезосопротивления

пьезорезистивные датчики прикрепляются к мембране либо наносятся на поверхность путем
прочные, малочувствительные к вибрации, постоянная времени 20-50 мкс
пригодны для использования в химически активных средах

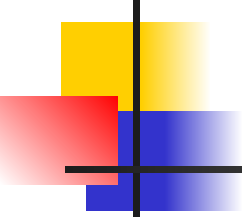
Емкостные вакуумметры



$$v_m = e \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

$$v_m = -e(d / D_0) = -E(d / D_0) \cos \omega t$$

При смещении мембраны из ее начального положения в плоскости симметрии емкости изменяются пропорционально соответственно $1/(D+d)$ и $1/(D-d)$.



Особенности емкостных вакуумметров

необходимо учитывать кривизну мембраны: вогнутые обкладки,
линеаризация сигнала
один и тот же газ по обе стороны мембраны(диэлектрическая постоянная),
нежелателен частично ионизованный газ
высокая чувствительность,
отличное разрешение,
диапазон применения от 10^{-2} Па до $10^5..10^6$ Па
одна модель до 4..5 порядком, точность 0.1..0.03% от величины показания
отклонение от линейности 0,02%
разрешение до 10^{-5} от верхнего предела измерений
постоянна запаздывания от миллисекунд до 0.1с
Выпускается промышленностью серия «Сапфир»



Тепловые вакуумметры

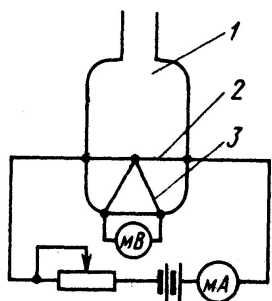
Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности разряженного газа от давления.

Преобразователь теплового вакуумметра есть баллон, внутри которого расположен нагреваемый электрическим током чувствительный элемент — обычно прямолинейная металлическая нить .

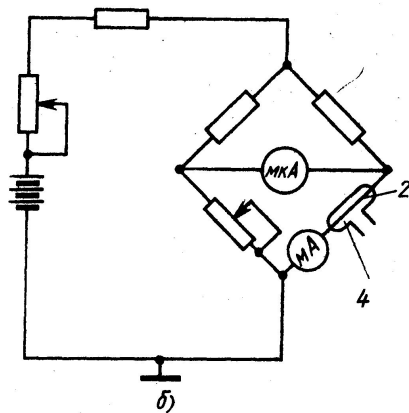
Температура нити накала зависит от тепловых потерь в результате теплопроводности в газе, которые тем больше чем выше давление;

Измерения температуры нити или мощности необходимой для поддержания этой температуры постоянной позволяют определить давление.

Тепловые вакуумметры



а)



б)

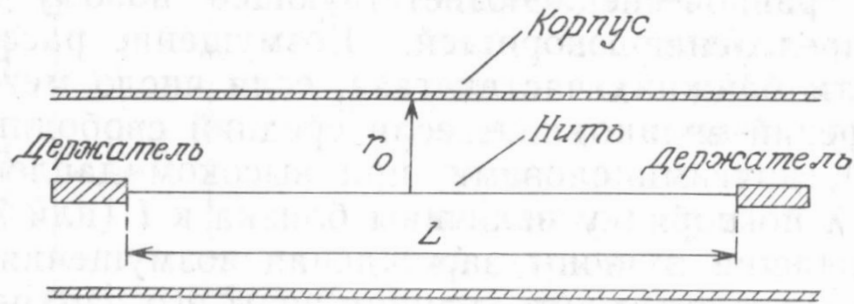
Температуру нити можно определить путем измерения ее сопротивления (датчик Пирани - терморезистивный) либо с помощью термопары, прикрепленной к нити.

1 – термопарный преобразователь,

2 - нагреваемая нить,

3 – термопара,

4 – терморезисторный преобразователь.



Чувствительность датчика тем выше, чем длиннее и тоньше нить (платина, вольфрам, никель)

Датчики обычно достаточно прочны, невысокие по стоимости.

Диапазон от 10^5 до 10^{-2} Па, одна модель до трех порядков

Датчик необходимо градуировать для каждого газа

Постоянная времени 0.02..0.2 с

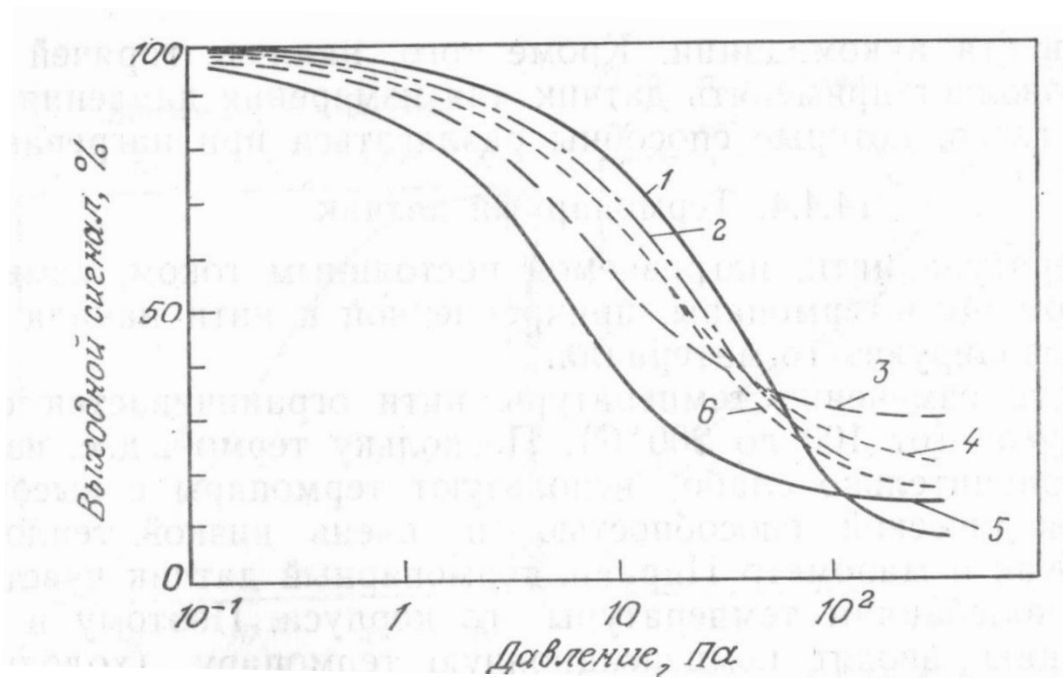
Точность $\sim 10..20\%$ от величины показания

Не чувствительны к разгерметизации, т.к. температура нити не более 420К.

Промышленность выпускает датчики:

- ПМТ- 2 термопарный, стеклянный корпус,
- ПМТ- 4 термопарный, стальной корпус,
- ПМТ- 6 терморезисторный, стальной корпус,

Градуировочная кривая термопарного датчика для различных газов



значение выходного сигнала 5..10мВ.

Преобразователь манометрический терморезисторный ПМТ-6-3М-1 (<http://www.niivt.ru>)



Предназначен для контроля давлений в диапазоне $2,7 \times 10^{-1} - 10^5$ Па (в режиме постоянного сопротивления 116,5 Ом). Сопротивление нагревателя при температуре 200С ($72 \pm 4,5$) Ом.

Работает в комплекте с вакуумметрами ВТБ-1, ВТБ-2.

Присоединяются к системе через «грибковое» (штуцерное) соединение ДУ-16 с резиновым уплотнением.

Преобразователь представляет собой тонкостенный цилиндрический баллон из нержавеющей стали и смонтированного вдоль его оси нагревателя из платиновой проволоки диаметром 12 мкм и длиной 8 см.

Режим работы преобразователя – режим постоянной температуры, которую контролируют по электрическому сопротивлению преобразователя.

Преобразователь манометрический терморезисторный ПМТ-6-3Ф (<http://www.niivt.ru>)



Этот прибор предназначен для работы в прогреваемых установках.

Преобразователь состоит из тонкостенного цилиндрического баллона из нержавеющей стали и смонтированного вдоль его оси нагревателя из платиновой проволоки диаметром 12 мкм и длиной 8 см.

Обычный режим работы преобразователя – режим постоянной температуры, которую контролируют по электрическому сопротивлению нагревателя.

Мерой давления служит падение напряжения на нагревателе.

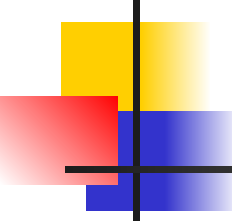
Диапазон измеряемых давлений от **0,4 до 10^5 Па** (при нормированной погрешности в пределах от 1,3 до 4×10^3 Па).

Преобразователь смонтирован на фланце ДУ-20 с металлическим уплотнением, которым и присоединяется к установке.

Блок индикации и регулирования давления термопарный ИРДТ-2



Блок предназначен для измерения, индикации и регулирования давления в вакуумных установках. Диапазон индикации давления сухого воздуха: $(6,6 \times 10^1 \dots 1,3 \times 10^{-2})$ Па, $(5 \times 10^{-1} \dots 10^{-4})$ мм рт.ст. Допускается использование блока для индикации и регулирования давления других газов с учетом пересчетных коэффициентов. ИРДТ-2 измеряет давление в комплекте с первичными манометрическими преобразователями типа ПМТ-2 и обеспечивает регулирование давления путем управления клапаном натекателем, имеющим дискретное или аналоговое управление.



Блок индикации и регулирования давления термопарный ИРДТ-2

Основные характеристики:

Единицы индикации – Па, мм рт.ст., мВ;

Количество каналов измерения и индикации – 2;

Диапазон изменения тока нагревателя термопарного преобразователя от 90 мА до 150 мА с дискретностью 0,1 мА;

Тип регулирования по выбору:

- *ручное дискретное;*
- *ручное аналоговое;*
- *автоматическое 2-хпозиционное;*
- *автоматическое широтно-импульсное по ПИД-закону;*
- *автоматическое аналоговое по ПИД-закону;*

Уровень выходных аналоговых сигналов 0... 10 В на нагрузку не менее 2 кОм;

Количество каналов регулирования — 1;

Допустимый ток дискретных выходов управления клапаном-натекателем — 0,5 А при напряжении постоянного тока не более 30 В;

Количество каналов блокировки — по 2 на каждом канале измерения;

Допустимый коммутируемый ток контактов выходных реле — 0,1 А при напряжении 220 В переменного и 24 В постоянного тока;

Интерфейс связи с внешними устройствами RS232.;



Ионизационные вакуумметры

Действие ионизационных вакуумметров основано на зависимости ионного тока, возникшего в результате ионизации молекул разряженного газа от давления.

Имеется три типа преобразователей:

- 1) Электронные ионизационные, в которых ионизация газа осуществляется ускоренными электронами,
- 2) радиоизотопными, в которых для ионизации применяется излучение изотопа,
- 3) магнитные электроразрядные – на зависимости тока электрического разряда в магнитном поле (Пеннинга).



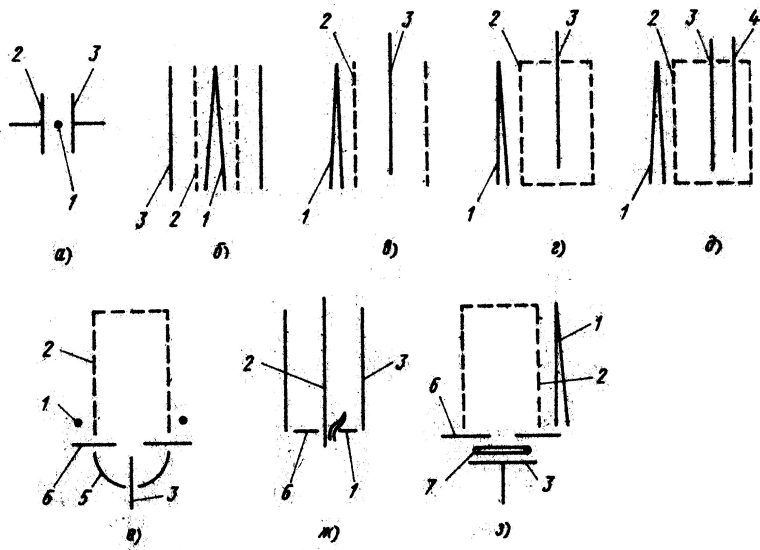
Коэффициент ионизации

среднее число пар ион-электрон на один первичный электрон с заданной энергией при единичной длине пробега и единичной давлении

коэффициент ионизации для α -частиц примерно в 10^4 раз больше чем для электронов

энергия ионизации от 24,5 эВ для He до 3,9эВ для Cs

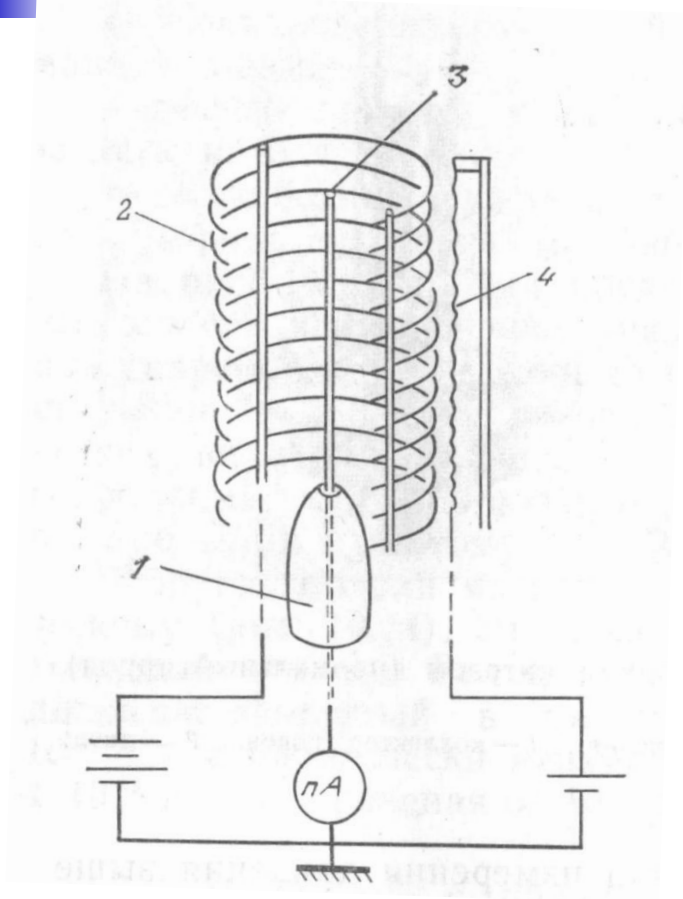
Принципиальные схемы ионизационных преобразователей



1- катод, 2 – анод, 3- коллектор,
4 - модулятор, 5- отражатель
ионов, 6 – экран, 7-супрессор.

- А) прямопролетный для высоких давлений;
- Б) с цилиндрическим коллектором,
- В) с осевым коллектором (Байарда-Альперта),
- Г) с осевым коллектором и торцевыми сетками,
- Д) с осевым коллектором и модулятором,
- Е) экстракторный,
- Ж) орбитронный,
- З) супрессорный.

Триод Байярда-Альпетра



Преобразователь манометрический ионизационный ПМИ-3-2 (<http://www.niivt.ru>)



Преобразователь предназначен для измерения давления от **1 до 10^{-5} Па** в металлических установках, прогреваемых до $+400^{\circ}\text{C}$.

Электродная система преобразователя смонтирована на фланце ДУ-50 и состоит из прямонакального катода, анодной сетки и цилиндрического никелевого коллектора ионов.

Катод выполнен воздухостойким и сделан из иридиевой проволоки, с покрытием двуокиси иттрия, благодаря чему этот преобразователь имеет повышенный срок службы и более широкий диапазон измеряемых давления (по сравнению с ПМИ-2).

Преобразователь применяется в комплекте вакуумметров ВИТ-2 и ВИТ-3.

Блок индикации и регулирования давления ионизационный ИРДИ-2

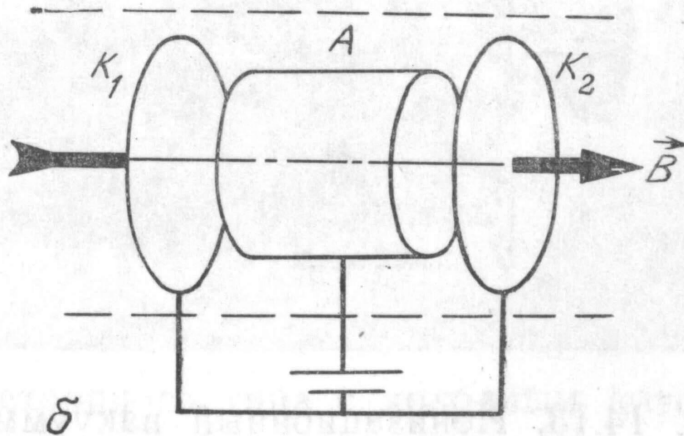


Блок предназначен для индикации и регулирования давления в вакуумных установках. ИРДИ-2 работает в комплекте с манометрическим преобразователем ПМИ-2.

Основные характеристики:

- цифровая индикация давления в диапазоне от 8×10^{-1} Па до $1,3 \times 10^{-3}$ Па с возможностью вывода на индикатор значения давления в Па, мм рт.ст. и мА;
- индикация значения тока эмиссии, режимов работы блока и информации о нештатных ситуациях (обрыв цепей накала или анода манометрического преобразователя, отклонение тока эмиссии, давление больше предельного и др.);
- формирование дискретных сигналов по двум каналам блокировки и по двум информационным каналам;
- местное и дистанционное управление включением (отключением) режимов измерения и регулирования давления;
- ручное и автоматическое регулирование давления в комплекте с клапаном натекателем с дискретным или аналоговым управлением;
- интерфейс связи с внешними устройствами RS232.

Манометр Пеннинга



чтобы увеличить длину пробега и коэффициент ионизации помещается вокруг разрядной трубки постоянный магнит индукция B порядка $0,1$ Тл до давлений порядка 10^{-5} Па. постоянная времени $0,5$ с.



Преобразователь магнитный электроразрядный ПММ-32-1 (<http://www.niivt.ru>)



Прибор ПММ-32-1 является газоразрядным преобразователем инверсно-магнетронного типа.

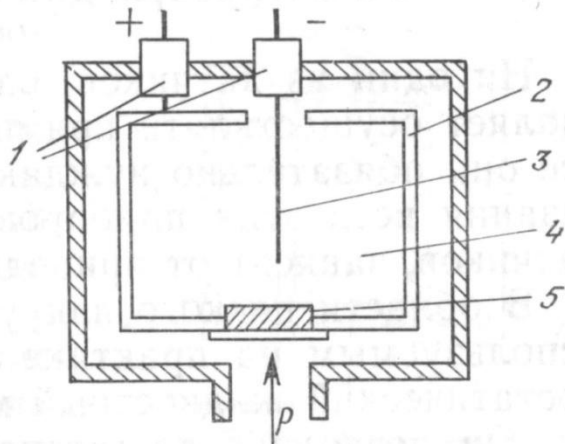
Диапазон от 10^{-7} до **1 Па** .

Преобразователь рассчитан на применение в металлических установках высокого и сверхвысокого вакуума в комплекте вакуумметров ВМБ-8, ВМБ-14 и ВМЦБ-12.

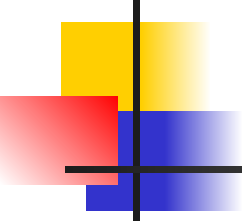
Электродная система преобразователя смонтирована на фланце ДУ-50. Анодом служит центральный стержень, катодом – цилиндрический постоянный магнит, создающий в зазоре его полюсных наконечников индукцию 0,1 Тл.

Анод и катод (магнит) изолированы от корпуса. В нормальном рабочем режиме на анод подается напряжение +2500 В через резистор 1,1 Мом; разрядный ток, служащий мерой давления, измеряется в цепи катода.

С источником ИИ



источник α -частиц 5 – соли радия или полония с активностью порядка $100 \mu\text{Ки}$
коллектор ионов 3 заряжается отрицательно по отношению к камере ($50..100 \text{ В}$).
давления от 10^{-2} до 10^3 Па
чувствительность зависит от природы газа
верхний предел повышение рекомбинации ион-электрон
нижний – остаточный ток вторичных электронов, высвобождающихся в результате бомбардировки коллектора α -частицами



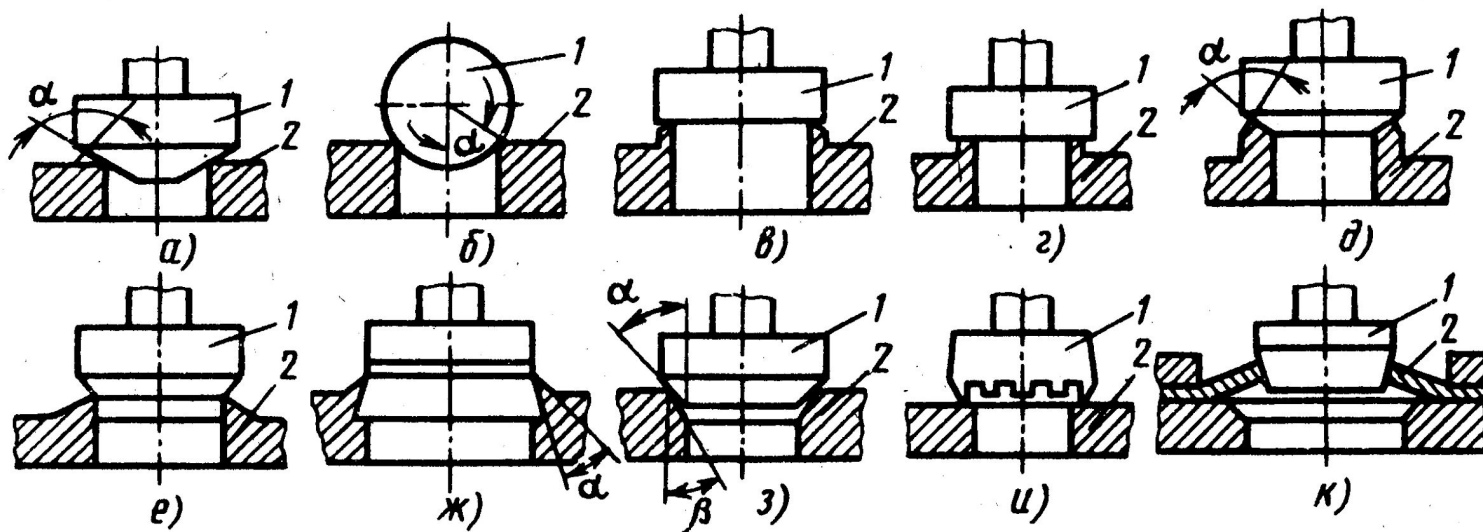
1.7. Компоненты вакуумных систем



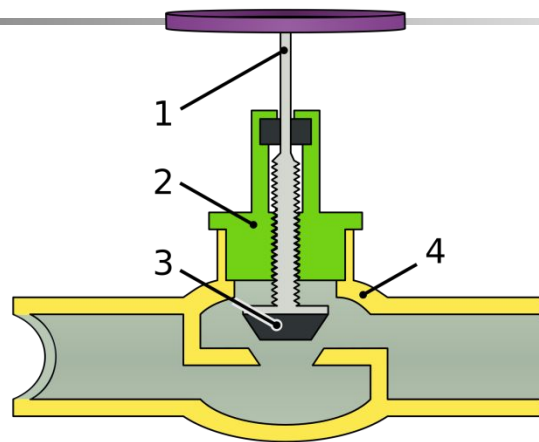
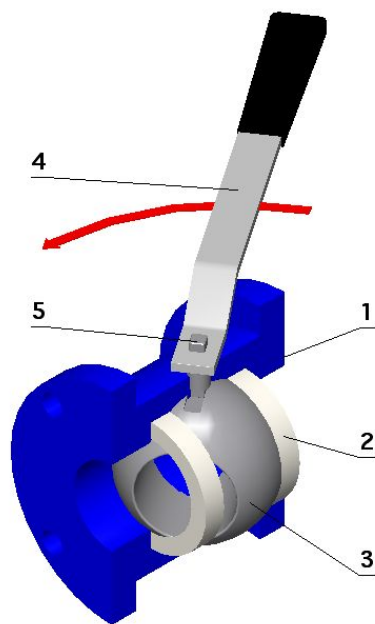
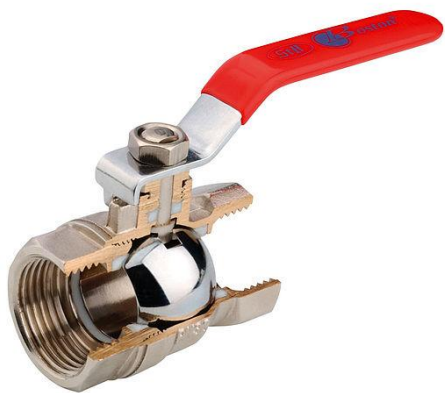
ВАКУУМНАЯ АРМАТУРА

- Клапаны вакуумные с ручным приводом,
- Клапаны вакуумные с электромеханическим приводом,
- Клапаны вакуумные с электромагнитным приводом,
- Клапаны-натекатели,
- Затворы вакуумные с электромеханическим приводом.

Седла запорной аппаратуры



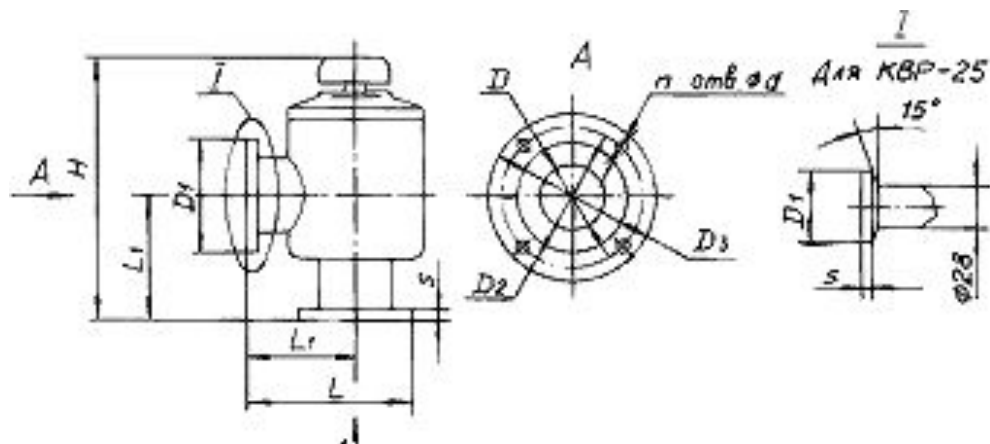
Шаровой кран и запорный вентиль



Клапаны вакуумные с ручным приводом типа КВР (<http://vacma.ru>):

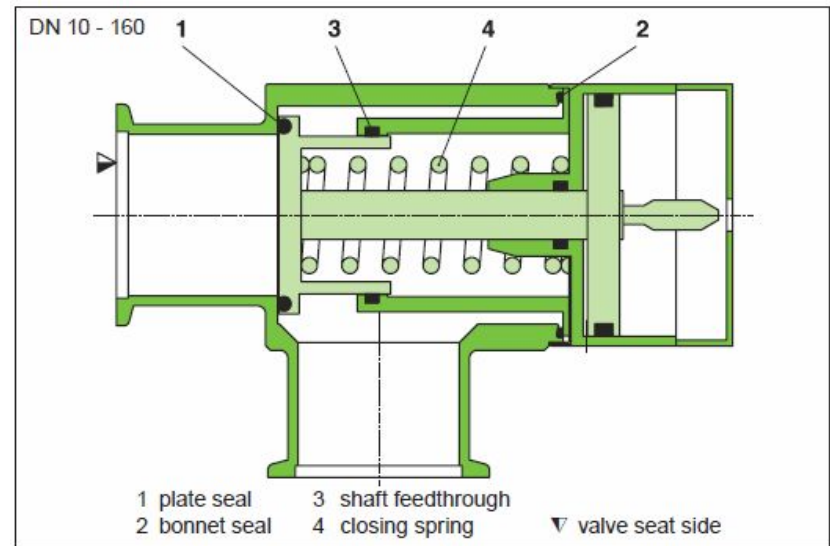
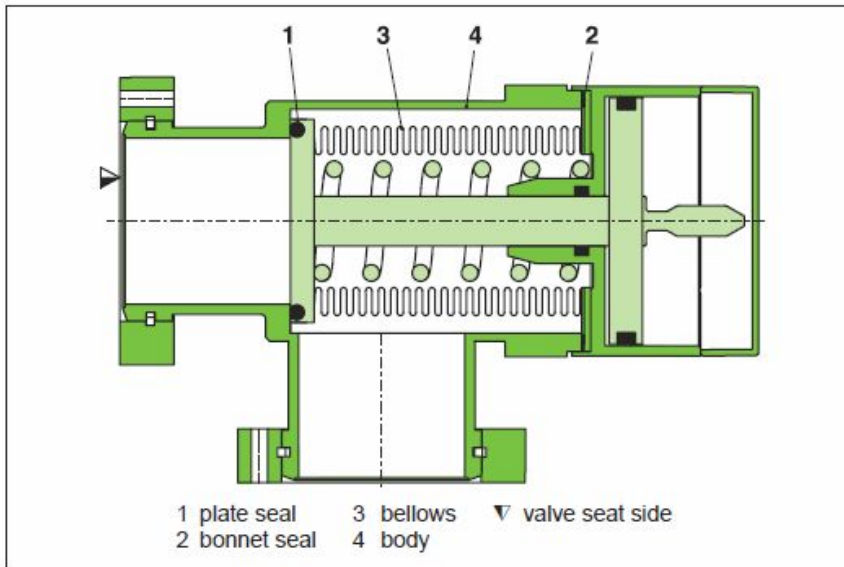
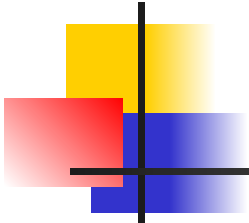
| Наименование параметра | КВР-25 | КВР-63 | КВР-100 |
|---|---|-------------|-------------|
| Проводимость (теоретическая) в молекулярном режиме, л/с, не менее | 16 | 180 | 470 |
| Наибольшая величина натекания, л Па/с (л мм рт.ст./с), не более | 1×10^{-7} ($7,5 \times 10^{-7}$) | | |
| Диапазон давлений, Па (мм рт.ст.) | 1×10^{-5} - 5×10^5 ($7,5 \times 10^{-8}$ - $3,8 \times 10^3$) | | |
| Габаритные размеры, мм, не более (высота/длина/ширина) | 110/80/60 | 215/150/120 | 250/185/150 |
| Масса, кг, не более | 0,65 | 3,8 | 6,5 |
| Средний ресурс до капитального ремонта, цикл, не менее | 120000 | | |
| Средний срок службы до капитального ремонта, лет, не менее | 8 | | |

Внешний вид и чертеж клапанов типа КВР

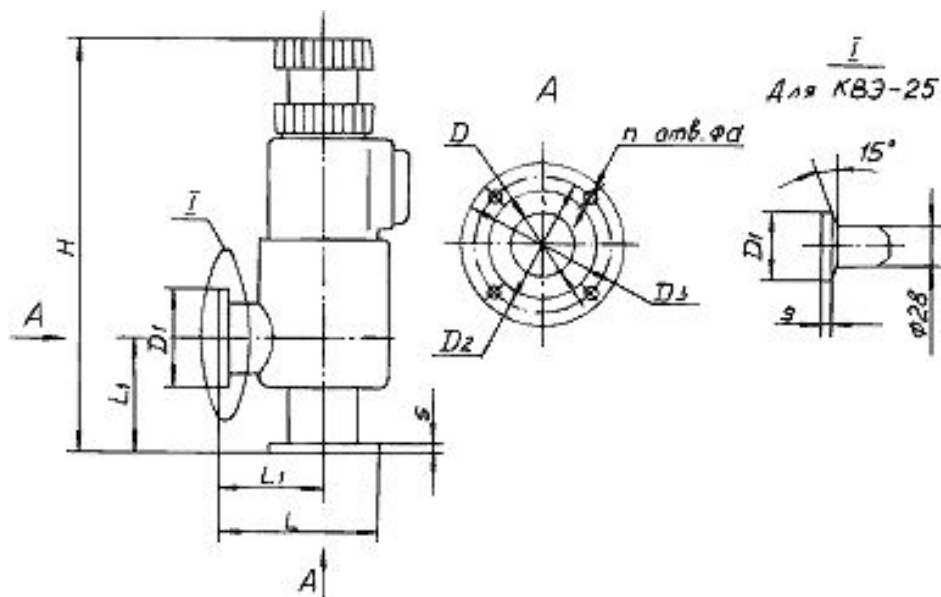


Клапаны вакуумные с электромеханическим приводом типа КВЭ (<http://vacma.ru>):

| Наименование параметра | КВЭ-25 | КВЭ-63 | КВЭ-100 |
|---|---|-------------|-------------|
| Проводимость, л/с, не менее | 14,2 | 180 | 470 |
| Наибольшая величина натекания, л Па/с (л мкм рт. ст./с), не более | 1×10^{-7} ($7,5 \times 10^{-7}$) | | |
| Диапазон давлений, Па (мм рт. ст.) | 1×10^{-5} - $1,07 \times 10^5$ ($7,5 \times 10^{-8}$ - 800) | | |
| Время открывания (закрывания), с, не более | 0,3 | 0,5 | 0,8 |
| Габаритные размеры, мм, не более высота/длина/ширина | 270/110/75 | 345/155/120 | 450/200/150 |
| Масса, кг, не более | 3,2 | 5,2 | 10 |
| Средний ресурс, цикл, не менее | 60000 | | |
| Средний срок службы, лет. | 8 | | |
| Мощность электродвигателя, Вт | 25 | 25 | 60 |
| Напряжение, В | 380 | | |



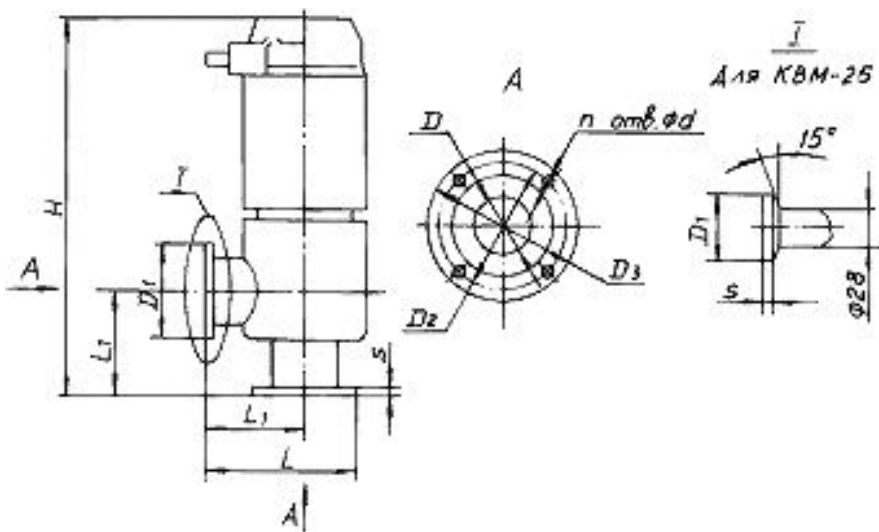
Внешний вид и чертеж клапанов типа КВЭ



Клапаны вакуумные с электромагнитным приводом типа КВМ (<http://vacma.ru>):

| Наименование параметра | КВМ-25 | КВМ-63 |
|---|---|--------|
| 1. Диаметр условного прохода | 25 | 63 |
| 2. Проводимость (теоретическая) в молекулярном режиме, л/с, не менее | 14,2 | 180 |
| 3. Наибольшая величина натекания воздуха в вакуумную полость клапана, л Па/с (л мкм рт.ст./с) | 1×10^{-7} ($7,5 \times 10^{-7}$) | |
| 4. Питание электромагнита, В/Гц | 220/50 | |
| 5. Потребляемый ток, А, не более, в открытом состоянии | 0,35 | 0,6 |
| 6. Время открывания (закрывания), с, не более | 0,1 | 0,5 |
| 7. Продолжительность включения, % | 100 | |
| 9. Средний ресурс до капитального ремонта, циклы | 60000 | |
| 11. Масса, кг, не более | 1,9 | 8,0 |
| 12. Масса УУК-1, кг, не более | 0,6 | |

Внешний вид и чертеж клапанов типа КВМ

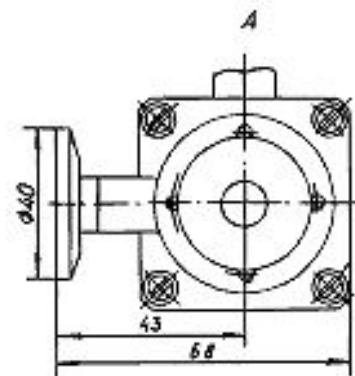
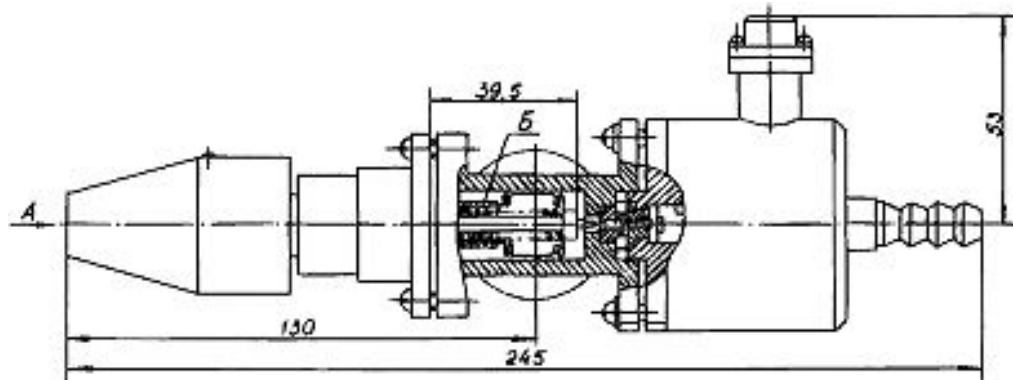




Клапан-натекатель КН-2М'(<http://vacma.ru>):

| Наименование параметра | КН-2М |
|---|--|
| Норма герметичности, м ³ хПа/с (лхмкм рт. ст./с) | 2,7х10 ⁻⁴ (2,1х10 ⁻³) |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 40 |
| Наименьший поток напускаемого газа, лхПа/с (мм рт.ст.) | 2,7х10 ⁻⁴ (2,0х10 ⁻³) |
| Наибольший поток напускаемого газа, лхПа/с (мм рт.ст.) | 66 (0,5) |
| Условный проход, мм | 1,2 |
| Масса, кг, не более | 1,7 |

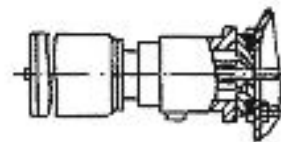
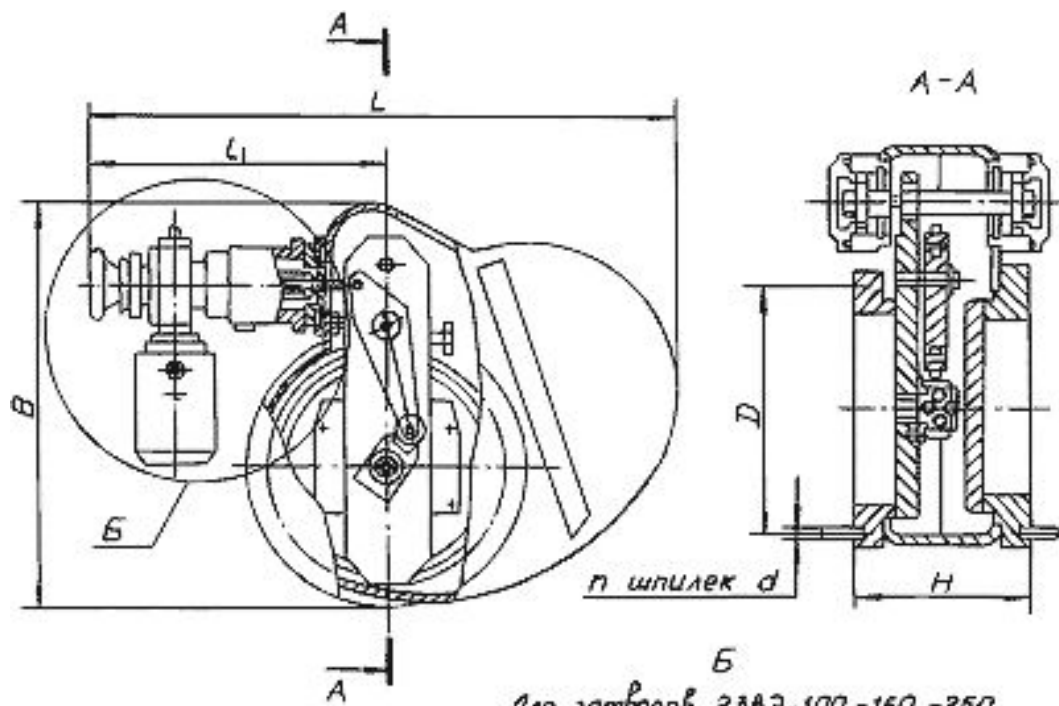
Внешний вид и чертеж клапанов типа КВМ

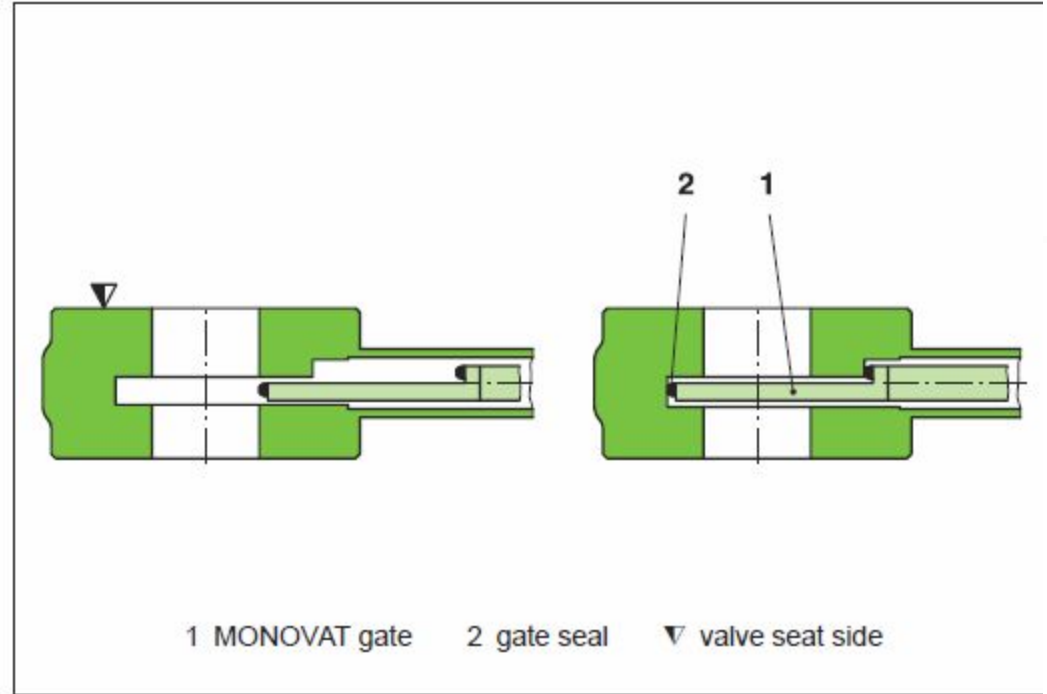
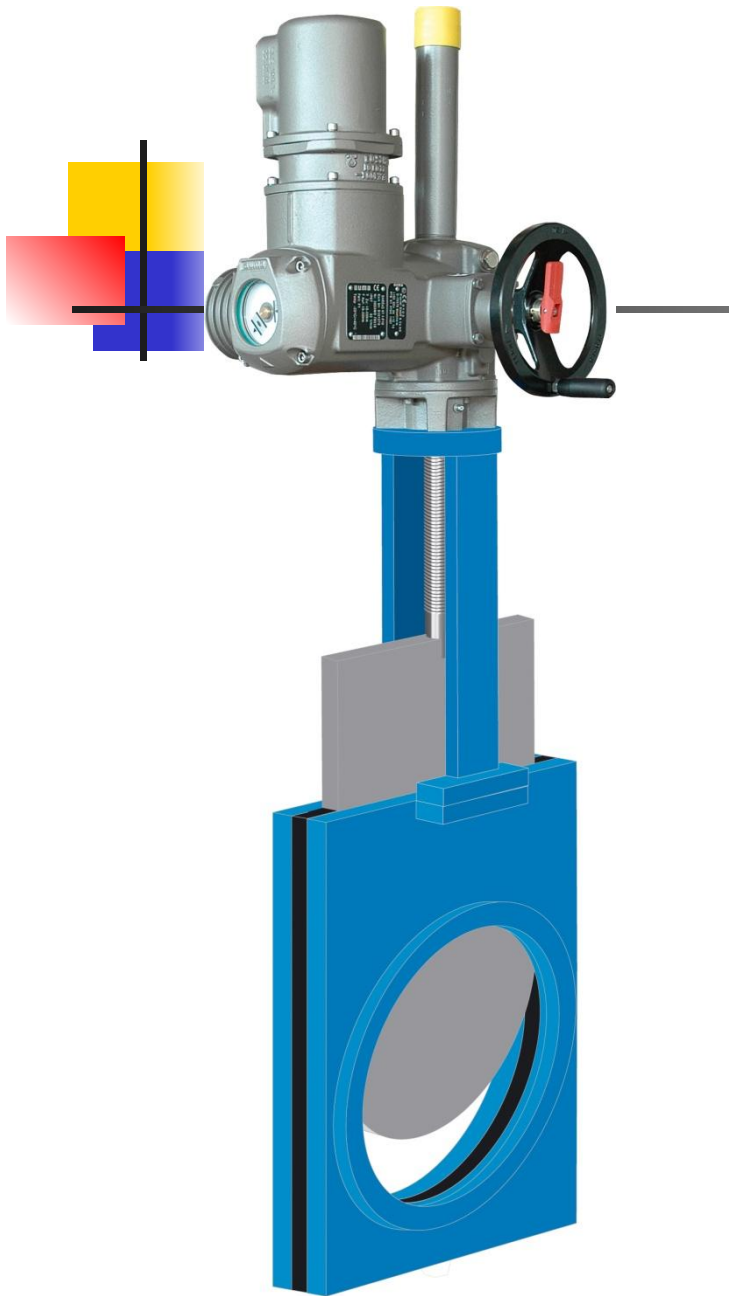


Затворы вакуумные с электромеханическим приводом типа 23ВЭ (<http://vacma.ru>):

| | 23ВЭ-100 | 23ВЭ-160 | 23ВЭ-250 | 23ВЭ-400 | 23ВЭ-630 |
|---|--|----------|----------|----------|----------|
| Проводимость в молекулярном режиме, л/с | 1300 | 3340 | 13400 | 46250 | 146000 |
| Время открывания (закрывания), с, не более | 3 | 4 | 9 | 27 | 55 |
| Наибольшая величина натекания, л Па/с, не более (л мкм рт.ст/с) | 1×10^{-7} ($7,5 \times 10^{-7}$) | | | | |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 63 | 100 | 100 | 200 | 460 |
| Напряжение, В | 220/380 | | | | |
| Частота, Гц | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Средний ресурс до капитального ремонта, циклы | 50000 | | | | |
| Масса, кг, не более | 17 | 24 | 46 | 110 | 350 |

Внешний вид и чертеж затворов типа 23ВЭ





MONOVAT configuration (see glossary)

Bellows-sealed

Mechanism free of lubricants

Leak rate: body / valve seat

$< 5 \cdot 10^{-10} / < 1 \cdot 10^{-9} \text{ mbar ls}^{-1}$

Pressure range

$1 \cdot 10^{-10} \text{ mbar to 2 bar (abs)}$

Differential pressure on the gate

$\leq 2 \text{ bar in either direction}$

Differential pressure at opening

$\leq 30 \text{ mbar}$

VAT Vakuumentile AG, CH-9469 Haag, Switzerland

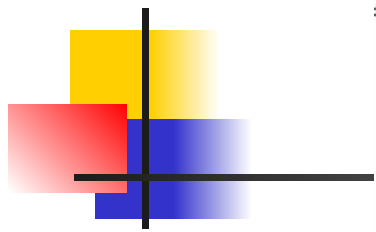


| DN | | Ordering numbers | | |
|----|------|------------------|------------------------|---------------------|
| mm | inch | ISO-KF | CF-F metric threads | CF-F UNF threads |
| 25 | 1 | 01028-KE01 | | |
| 40 | 1½ | 01032-KE01 | 01032-CE01 | 01032-UE01 |
| 50 | 2 | 01034-KE01 | | |

VAT Series 10



| DN | | Ordering numbers | | | |
|-----|------|------------------------|---------------------|------------|------------|
| mm | inch | CF-F metric threads | CF-F UNF threads | ISO-F | ASA-LP |
| 63 | 2½ | 10836-CE01 | 10836-UE01 | 10836-PE01 | 10836-TE01 |
| 80 | 3 | 10838-CE01 | 10838-UE01 | 10838-PE01 | on request |
| 100 | 4 | 10840-CE01 | 10840-UE01 | 10840-PE01 | 10840-TE01 |
| 160 | 6 | 10844-CE01 | 10844-UE01 | 10844-PE01 | 10844-TE01 |
| 200 | 8 | 10846-CE01 | 10846-UE01 | 10846-PE01 | 10846-TE01 |
| 250 | 10 | 10848-CE01 | 10848-UE01 | 10848-PE01 | 10848-TE01 |
| 320 | 12 | on request | on request | 10850-PE01 | 10850-TE01 |

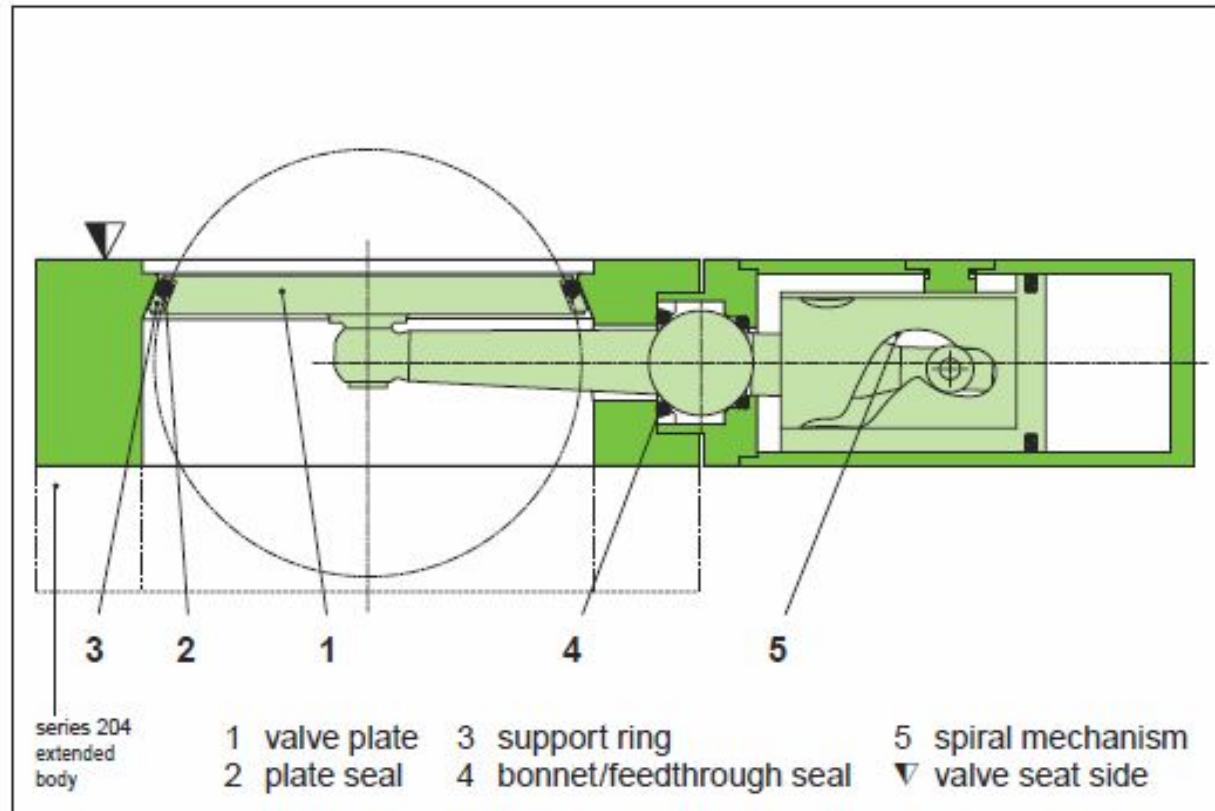
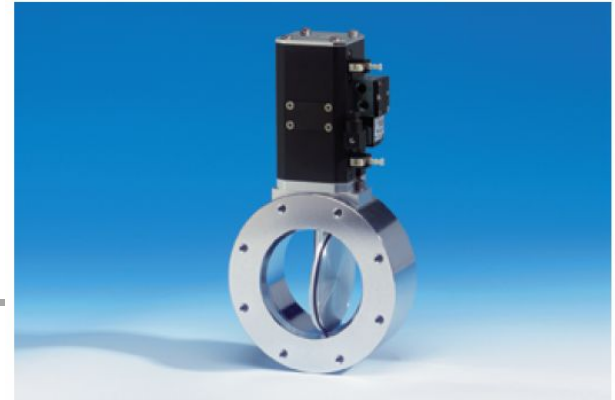
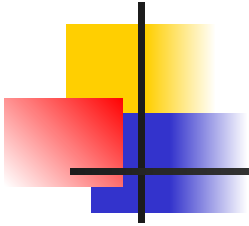


Series 190 HV gate valve



Series 192 UHV gate valve

| DN | | Ordering numbers (specify control voltage) | |
|------|------|--|---------------------------------------|
| mm | inch | Series 190 HV gate valve ISO-F | Series 192 UHV gate valve ISO-F |
| 400 | 16 | 19052-PE44 | 19252-PE44 |
| 500 | 20 | 19054-PE44 | 19254-PE44 |
| 630 | 25 | 19056-PE44 | 19256-PE44 |
| 800 | 32 | 19058-PE44 | 19258-PE44 |
| 900 | 36 | 19059-PE44 | 19259-PE44 |
| 1000 | 40 | 19060-PE44 | 19260-PE44 |
| 1250 | 50 | 19062-PE44 | 19262-PE44 |



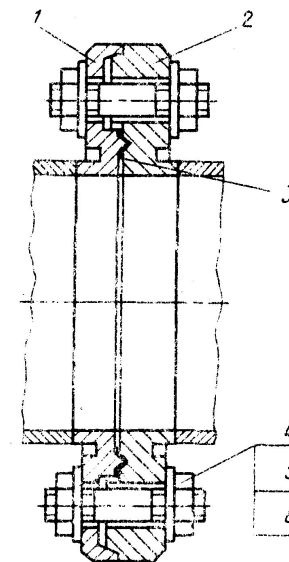
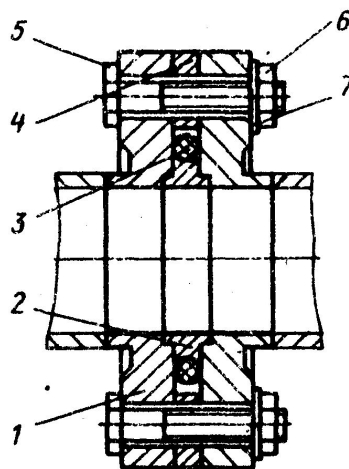
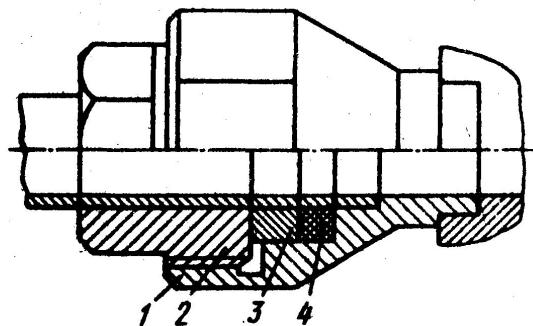
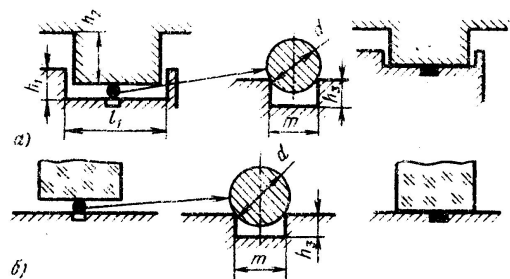


Требования к материалам для изготовления вакуумных систем:

- Иметь давление паров при рабочей температуре значительно меньше рабочего давления;
- Иметь минимальное газо-выделение при рабочей температуре и давлении;
- Обеспечивать вакуумную плотность при малой толщине;
- Быть коррозионно-стойким, иметь повышенные пределы выносливости и текучести.

Например: серебро проницаемо для кислорода, железо, никель, платина - для водорода, стекло – для гелия и водорода, резина – для гелия, водорода и азота...

Разъемные вакуумные соединения



Разъемные вакуумные соединения



DN16KF
DN25KF
DN40KF
DN50KF

Этот тип фланца получил название от сокращений: Quick Flange (QF), Klein Flange (KF) или NW.

Обозначение KF принято в системе ISO, DIN, и Pneurop.

KF фланец изготавливается со специальным пазом для эластичного уплотнителя, надетого на металлическое кольцо.

Крепится фланец с помощью круглого зажима («хомута»).

Стандартные размеры нормируются по номинальному диаметру (DN) проходного отверстия фланца в миллиметрах (от 16 до 50 мм)

Разъемные вакуумные соединения



DN63LF (63.5 мм)
DN100LF (102 мм)
DN160LF (160 мм)
DN200LF (200 мм)
DN250LF (254 мм)
DN320LF (316 мм)
DN400LF (400 мм)
DN500LF (500 мм)

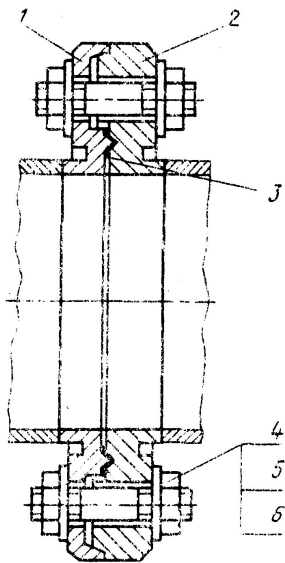
ISO стандарт для фланцев большого размера, известный как LF, LFB, MF, или часто просто ISO фланец. Также как и KF-фланец, ISO-фланец присоединяется с помощью центрального кольца и эластичного кольца-уплотнителя.

Существует две разновидности ISO-фланцев. ISO-K (или ISO LF) фланцы присоединяются с помощью двузубчатых зажимов, которые зацепляются за круговой паз на поверхности трубки фланца. ISO-F (или ISO LFB) фланцы имеют отверстия для соединения двух фланцев болтами.

Два ISO-фланца разных типов могут быть соединены вместе зажимом с единственным зубцом со стороны ISO-K, который затем привинчивается болтами к отверстиям на стороне ISO-F.

ISO-фланцы имеют диаметр от 63 до 500 мм (номинальный диаметр проходного отверстия)

Разъемные вакуумные соединения



Для работы с сверхвысоким вакуумом (менее 10^{-6} мбар) используют фланцы типа CF (ConFlat), которые имеют медную прокладку, зажимаемую между острыми выступами фланца. За счет деформации мягкой поверхности меди достигается максимально плотный контакт поверхностей и обеспечивается должный уровень изоляции.

Этот тип фланца может работать с вакуумом вплоть до 10^{-13} мбар (10^{-11} Па) и температуре до 450°C .

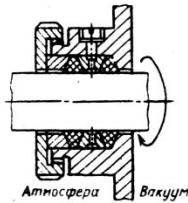
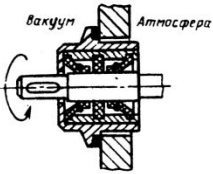
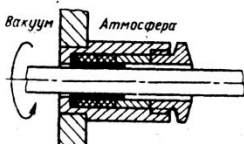
Стандарт США размеров фланца дается в дюймах внешнего диаметра : $1\frac{1}{3}$ («mini»), $2\frac{3}{4}$, $4\frac{1}{2}$, 6, 8, 10, 12, $13\frac{1}{4}$, 14 и $16\frac{1}{2}$. В Европе и Азии размер определяется внутренним диаметром в миллиметрах:

DN16 DN40 DN63 DN100 DN160 DN200 DN250

Ввод напряжения в вакуум

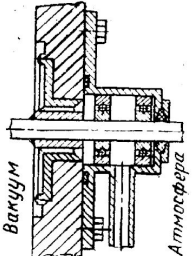
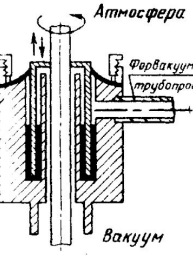
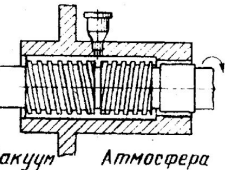


Ввод вращения в вакуум

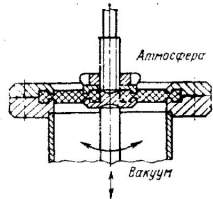
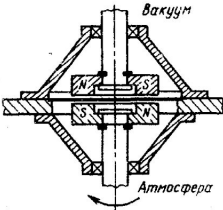
| Способ передачи движения | Уплотнение | | Принципиальная схема | Ориентировочные допусаемые значения | | | Особенности передачи |
|--------------------------|-------------|-----------------|---|-------------------------------------|--------------------|--|--|
| | Тип | Вид | | $p, \text{Па}$ | $n, \text{с}^{-1}$ | $M_0 \cdot 10^{-2}, \text{Н} \cdot \text{м/м}$ | |
| Через отверстие в стенке | Сальниковое | Пластичное |  | 10^{-5} | 2 | 70 | Уплотнители — фторопласт, асбест, вакуумные резины. Недостаток — необходимость периодического поджима сальника |
| | | Упругое |  | 10^{-4} | 50 | 15 | Герметизацию движущегося контакта обеспечивают силы упругости сальника (манжеты с пружинящими кольцами), что позволяет уменьшить площадь движущегося контакта |
| | | Комбинированное |  | 10^{-5} | 100 | 15 | Высокие вакуумные свойства эластомеров в сочетании с каким-либо устройством (антимиграционные пояски, кольцевые сорбционные ловушки, поджимы и др.), позволяющим уменьшить поток выделяющихся или натекающих газов |

Ввод вращения в вакуум

Через отверстие в стенке

| | | | | | |
|------------------------|---|-----------|-----|----|--|
| Капиллярное |  | 10^{-6} | 0,2 | 10 | <p>Явление капиллярности позволяет уплотняющей жидкости удерживать атмосферное давление. Применяют хорошо смачивающие жидкости, в частности, легкоплавкие металлы и сплавы (ртуть, галлий, индий, олово, сплав, содержащий 62,5% Ga, 21,5% In, 16% Sn и др.)</p> |
| Жидкостное Сифонное |  | 10^{-6} | 50 | 2 | <p>Гидростатическое давление столба жидкости компенсирует разность давлений в сообщающихся сосудах. Для уменьшения размеров предусмотрена формвакуумная полость. Работает только в вертикальном положении</p> |
| Импеллерное |  | 10^{-4} | 100 | 70 | <p>Включает устройства для принудительной подачи жидкости к краю или середине зазора, где находится резервуар с этой жидкостью. Необходимы дополнительные уплотнения для обеспечения герметичности в статических условиях</p> |

Ввод вращения в вакуум

| Способ передачи движения | Уплотнение | | Принципиальная схема | Ориентировочные допускаемые значения | | | Особенности передачи |
|--------------------------|----------------------|------------|--|--------------------------------------|--------------------|--|--|
| | Тип | Вид | | $p, \text{Па}$ | $n, \text{с}^{-1}$ | $M_0 \cdot 10^{-2}, \text{Н} \cdot \text{м/м}$ | |
| Через сплошную стенку | С эластичной стенкой | Мембранное |  | 10^{-5} | 50 | 5 | Мембраны из эластомерных материалов (часто из вакуумной резины) |
| | | Магнитное |  | 10^{-8} | 50 | 0,05 | Принцип магнитного притяжения разноименных полюсов постоянных магнитов, разделенных немагнитной герметизирующей стенкой, один из которых закреплен на ведущем валу в атмосфере, а другой — на ведомом валу в вакууме |