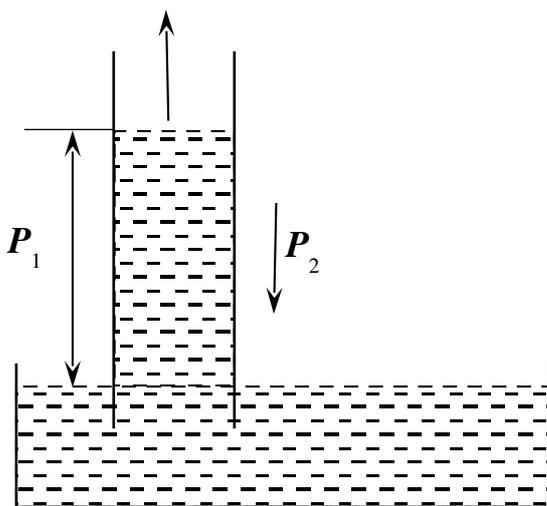


Вакуумная техника – это наука, которая изучает физико-химические процессы в разреженных газах, вопросы получения, сохранения и измерения вакуума. Вакуум (лаб.) – пустота.

В течение не менее 2-х тысячелетий до н.э. до середины 17-го века происходит «философский этап» развития вакуума. Древнегреческий философ Демокрит одним из «начал мира» выбирает пустоту. Несколько позже Аристотель вводит понятие эфира – неощутимой среды, способной передавать давление.

Научных основ, научных знаний о свойствах разреженных газов, но вакуум уже достаточно широко используется в пожарных, водоподъемных сооружениях и пневматических устройствах. В I веке до н.э. появляются первые упоминания об устройствах, способных создавать небольшие разрежения (шприц Герона, водяной насос Ктезибия). Изучение вакуума не проводится в частности и в основном из-за того, что церковь положила на это запрет. «Пустота может быть создана только всемогуществом божьим» - решение Парижского собора, 13 век. Изучением пустоты должны были заниматься только богословы, а никак не естественники. На это ссылается еще в 14 веке ректор Парижского университета Иоганн Буриден.

Только в 17 веке Галилео Галилей вычислил «силу боязни пустоты» из факта невозможности подъема воды всасывающим насосом на высоту более 10 метров, какого бы диаметра труба не была.



$$p_1 = p_2; \quad \rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2; \quad \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

$$h_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot h_2 \quad h_2 = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$\rho_1 = 1 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_2 = 13,6 \text{ кг/м}^3$$

$$h_1 = \frac{13,6}{1} \cdot 760 = 10,3 \text{ м}$$

если создать тут разрежение то:

$$p_a = 760 \text{ мм рт. ст.} \times 13,6 \text{ кг/м}^3 \approx 9,88 \text{ м}$$

Откачивая всасывающим насосом, вода уходит в атмосферу, т.е. можно создать разрежение, которое уравнивается столбом воды 9,88 метра и не более.

В 1643 году Эванджелисто Торричелли открыл, что атмосфера создает давление равное 760 мм рт. ст. Пространство **над** ртутью в барометрической трубке Торричелли назвал «абсолютной пустотой», и в ее честь ее называют «торричеллиевой пустотой» (опыт с Магдбургскими полушариями провел немецкий физик Отто фон Герике в 1650 году, с помощью им же изобретенного механического воздушного насоса с водяным уплотнением).

В 1825 году французский химик Жан Батист Дюма достиг понижения давления, вытеснив воздух из сосуда водяным паром, и сконденсировал его охлаждением.

К середине 19 века немецкий химик Роберт Вильгельм Бутцен осуществил откачку газа струей быстро **истекающей** жидкости, увлекающей газ.

В 1884 году итальянец Малиньяни применил в производстве ламп накаливания связывание газа парами фосфора – это было началом применения различных газопоглотителей, на основе чего позднее были разработаны **гетерные полосы**.

В 1904 году Дьюар разработал способ получения вакуума путем поглощения газов активированным углем, охлажденного жидким азотом.

В 1905 году появляется первый вращательный механический насос Геде ( $10^{-4}$  мм рт. ст.).

В 1914-1915 годах Геде, Ленгмюр и проф. Петроградского университета Боровин разработали ртутный диффузионный насос, способный откачивать до  $10^{-7}$  мм рт. ст.

В 1928 году первый паромасляный диффузионный насос Бэрга.

В технике измерение низких давлений отметили изобретения компрессионного манометра Ленк-Лиода (1874), теплового манометра Пирани (1909) и ионизационного Бикли (1916).

Современные средства откачки способны обеспечивать давление  $\sim 10^{-18}$  мм рт. ст. (около 30 мол в  $1 \text{ см}^3$ ).

В  $1 \text{ см}^3$  при  $p=760$  мм рт.ст.  $N=2,63 \cdot 10^{19}$  част/см<sup>3</sup>.  $N$  – число Лошмидта.

В 1 моле  $N_A=6,0225 \cdot 10^{23}$  – число Авогадро.

За единицу количества вещества принимается моль – определяемое как количество вещества, содержащее столько же атомов, молекул, ионов и других структурных элементов, сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода  $C^{12}$ . Это и есть число Авогадро.

### Применение вакуума

- Радиоэлектроника – создание элементов микроэлектроники, полупроводниковых приборов невозможно без вакуумной техники.
- Металлургия – улучшение физ.-мех. характеристик металлов. А титан, ниобий, цирконий, бериллий вообще невозможны без ВТ (их получают при  $p=10^{-4}$ - $10^{-6}$  мм рт. ст.)
- Химическая промышленность – синтетические волокна, полиамиды, полиэтилен, органические растворители получают в условиях вакуума.
- Фармацевтическая промышленность – антибиотики, синтетические гормоны, сахар, сыворотки (дисциплиционные установки), консервирование.
- Легкая промышленность – нанесение декоративных покрытий.
- Оптика – фильтры, просветленные линзы, зеркала.
- Научные исследования – атомная, атомно-ядерная физика, имитация космического пространства, новые материалы.

### Понятие о вакууме и давлении

В физике и технике понятие «вакуум» определяется как состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного.

Свойства газов при низких давлениях изучаются физикой вакуума, которая есть раздел молекулярно-кинетической теории газов.

Состояние газа определяется тремя параметрами: давлением  $P$ , объемом  $V$  и температурой  $T$ .

Для решения многих задач физики вакуума удобно пользоваться понятием **идеального газа**. Идеальным считается газ, у которого:

1. Молекулы можно представить как упругие материальные частицы.
2. Взаимодействие между молекулами ограничивается упругими столкновениями.

3. Пространство, занимаемое молекулами, исчезающее мало по сравнению с пространством свободным от них.

Реальные газы тем сильнее отличаются от идеальных, чем больше их плотность и ниже температура. И наоборот, разреженные газы, которыми занимается физика вакуума, по своим свойствам мало, чем отличаются от идеальных.

### Давление газа

Согласно кинетической теории, газ оказывает на стенки сосуда, в котором он заключен, давление, которое заключается в том, что молекулы газа ударяются о стенки сосуда.

Рассматриваем идеальный газ, поэтому молекула при ударе о стенки сосуда не теряет свою энергию. Столкновения идеально упругие. Молекула отражается с той же скоростью, что и ударилась.

Предположим, что молекула массой  $m$ , имеет скорость  $v$ . Ее импульс  $mv$ . Ударившись о стенку сосуда, она приобретает дополнительный импульс равный тоже  $mv$ . Ее суммарный импульс будет  $2mv$ . Пусть за единицу времени об единицу площади поверхности ударяется  $U$  молекул. Тогда давление, которое они оказывают, будет:

$$p=2mv \cdot U$$

Определим  $U$ .

Пусть  $n$  – число молекул в  $1 \text{ см}^3$  (единице объема). Можно сказать, что для любого момента времени к стенке кубика движется  $1/6 \cdot n$  молекул. Тогда, т.к. скорость молекулы  $U$ , то в единицу времени о стенку кубика ударится  $U=1/6n \cdot v$  молекул, и тогда

$$p = 2mv \cdot v = 2mv \cdot \frac{1}{6} \cdot n \cdot v = \frac{1}{3} mnv^2,$$

$n \cdot m = \rho$  – плотность газа,

$$p = \frac{1}{3} \rho v^2 \quad \text{– закон Бойля} \quad (1)$$

(При  $T=const$   $p \sim n \sim v^2$ )

Полная кинетическая энергия молекул газа в объеме  $V$  будет равна

$$\frac{1}{2} mv^2 \cdot nV = \frac{3}{2} pV \quad (2)$$

Температура – это по определению величина, которая пропорциональна кинетической энергии, т.е.

$$\frac{mv^2}{2} = cT \quad c=const$$

Если ввести  $k = \frac{2}{3}c$ , можно получить

$$p=nkT \quad (3)$$

$k$  – постоянная Больцмана  $=1,38 \cdot 10^{-2}$  дж/градус

Уравнение (3) можно переписать

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (4)$$

где  $T$  абсолютная температура,  $T=273,16^0C$

Уравнение (3) можно записать в виде

$$p = nkT = \frac{N}{V} \cdot \frac{m}{M} \cdot RT \quad \text{– это уравнение Менделеева-Клайперона,} \quad (5)$$

Где:

$N$  – число молекул в объеме  $V$        $N = V \cdot n$ ,

$m$  – масса одной молекулы,

$M$  – масса газа, выраженная в тех же единицах, что и  $m$ , и численно равная его молекулярной массе,

$T$  – абсолютная температура,

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = k \cdot N_A$

$$R = 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{дж}}{\text{град} \cdot \text{к.моль}}$$

$$\frac{M}{m} = N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{к.моль}} - \text{постоянная Авогадро.}$$

Масса любого вещества, измеряемая в  $g$  и  $kg$  и численно равная его молекулярной массе, называется  $g$ - или  $kg$ - молекулой вещества. Соотношение  $\frac{m \cdot N}{M}$  - определяет сколько  $g$ - или  $kg$ - молей вещества взято.

Если  $\frac{m \cdot N}{M} = 1$ , т.е. для 1  $g$ - или  $kg$ - моля вещества, тогда (5) можно переписать в виде

$$pV = RT$$

Используя определение числа Авогадро  $\frac{M}{m} = N_A$

$$pV = \frac{N}{N_A} RT = NkT$$

### Законы идеальных газов

1. Закон Бойля-Мариотта

Если  $T = \text{const}$        $mN = \text{const}$

$$pV = \text{const}$$

2. Закон Гей-Люссака

Если  $p = \text{const}$        $mN = \text{const}$

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

3. Закон Шарля

Если  $V = \text{const}$        $mN = \text{const}$

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

4. Закон Авогадро

$$pV = NkT \quad N = \frac{pV}{kT}$$

При постоянных  $p$ ,  $T$ , в одинаковых объемах содержится одинаковое количество молекул газа.

5. Закон Дальтона

Полное давление смеси химически не взаимодействующих газов, равно сумме его парциальных давлений

$$p_{см} V_{см} = p_1 V_{см} + p_2 V_{см} + \dots + p_n V_{см} \Rightarrow p_{см} = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

Пример газовой смеси – атмосфера

$$N_2 = 5,94 \cdot 10^2 \text{ мм рт.ст.}$$

$$O_2 = 1,59 \cdot 10^2 \text{ мм рт.ст.}$$

$$Ar = 7,1 \text{ мм рт.ст.}$$

$$CO_2 = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$$

$$Ne = 14 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$$

$$He = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$$

$$760 \text{ мм рт.ст.}$$

$$CH_4 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$$

$$K_2 = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$$

$$H_2 = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$$

$$Xe = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$$

### Единицы давления

В системе СИ единица давления – 1 Па (паскаль) =  $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Дж/м}^3$ .

Наиболее распространенная единица – 1 мм рт. ст.

1 мм рт. ст. – то давление, которое создает столб ртути в 1 мм при  $t^{\circ}C = 0$  на широте  $45^{\circ}$

$$\rho_{рт} = 13595,1 \text{ кг/м}^3; \quad g = 9,80665 \text{ м/с}^2$$

$$F = mg = \rho V \cdot g = \rho h \cdot Sg; \quad p = \frac{F}{S} = \rho gh, \quad \text{тогда}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 10^{-3} \cdot 13595,1 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,80665 \text{ м/с}^2 = 133,322 \text{ Н/м}^2 = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1333,22 \text{ дин/см}^2$$

Нормальная или физическая атмосфера – давление, производимое на 1 см<sup>2</sup> столбом ртути  $h = 76 \text{ см}$  при  $t = 0^{\circ}C$ .

$$\rho_{рт} = 13,595 \text{ г/см}^3$$

$$p = \rho gh = 76 \cdot 13,595 \cdot 980,67 = 1013247,857 \text{ дин/см}^2 = 1,013 \text{ бар}$$

Внесистемная единица бар =  $10^5 \text{ Н/м}^2 = 10^6 \text{ дин/см}^2 = 750,6 \text{ мм рт. ст.}$

$$1 \text{ торр} = 1/760 \text{ атм} = 1333,16 \text{ дин/см}^2 = 133,316 \text{ Н/м}^2 = 133,316 \text{ Па}$$

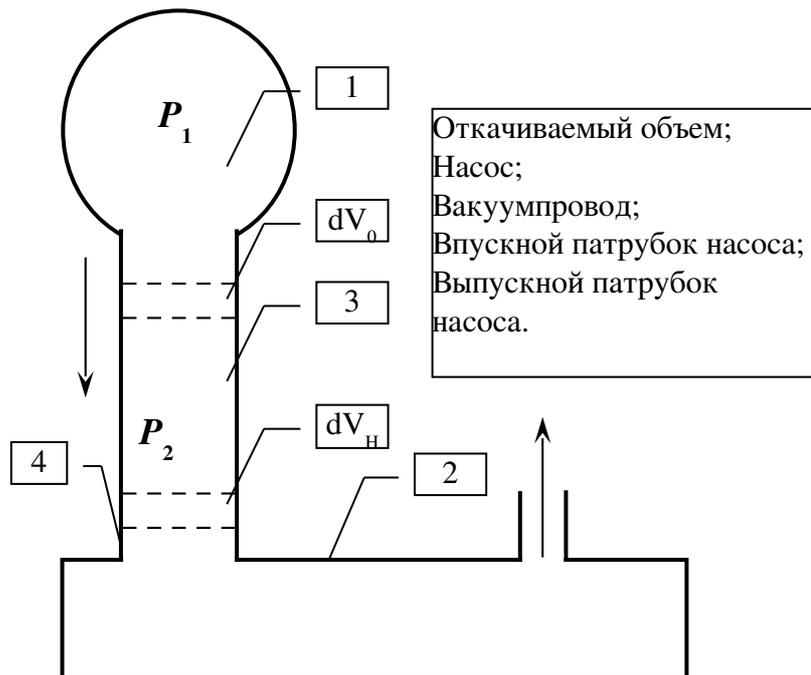
$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ торр} \quad 1 \text{ мм рт.ст.} = 1,0001 \text{ торр}$$

$$1 \text{ техн. атм. (ат.)} = 1 \text{ кг/см}^2 = 735,52 \text{ мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ микробар} = \text{дин/см}^2$$

## Понятие о процессе откачки вакуумной системы

Помним, что в откачиваемый объект извне не поступает газ. И внутри его нет



натекания. Температура газа постоянна.

До начала откачки, т.е. до начала работы насоса, давление во всей системе (объект, труба-вакуумпровод, насос) одинаковое, и газ в целом неподвижен.

При включении насоса начинается перемещение газа из объекта по вакуумпроводу в насос. Это свойство насоса: отбирать из объекта порцию газа и выталкивать ее в атмосферу. На место этой порции газа приходит, вследствие диффузии, другая и т.д. Поскольку  $T=const$   $V=const$ . Количество газа уменьшается, соответственно ( $p=nkt$ ) уменьшается его давление.

Понижение давления происходит по всему объему. Но, как показывает эксперимент, давление на конце трубки, обращенном к насосу, убывает быстрее, чем в объеме. Следовательно, на концах трубки всегда будет разность давлений  $p_1-p_2$ , где  $p_1$  – давление в объеме,  $p_2$  – давление на входе в насос, а величина  $p_1-p_2$  – называется движущая разность давлений.

В связи с различием в скорости снижения давления в объекте и у входа в насос, следует различать понятия в скорости откачки объекта и скорости действия откачивающего насоса.

Скоростью откачки объекта называется объем газа, поступающий в единицу времени у объекта в вакуумпровод при давлении  $p_1$  в откачиваемом объекте. Т.к. скорость откачки объекта величина не постоянная и изменяется при изменении давления, то ее значение относится к определенному моменту времени. В следующий момент времени скорость откачки будет другая, т.к. изменяется давление. Поэтому для определения скорости откачки берется бесконечно малый отрезок времени  $dt$ , в течении которого в вакуумпровод поступает бесконечно малый объем газа  $dV$ . Тогда

$$S_0 = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{p_1} \rightarrow \text{скорость откачки объекта при давлении } p_1.$$

Скоростью откачивающего действия насоса при данном впускном давлении  $p_2$  называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени

$$S_n = \left. \frac{dV_n}{dt} \right|_{p_2}$$

По аналогии с  $S_0$  и  $S_n$  можно говорить о быстроте откачивающего действия вакуумной системы в целом в любой точке вакуумпровода при каком-либо давлении  $p$

$$S = \left. \frac{dV}{dt} \right|_p$$

Размерность величин  $S_0$ ,  $S_n$ ,  $S$  есть объем газа в единицу времени  $см^3/с$ ,  $м^3/с$ ,  $л/с$ .

### Поток газа

Количество газа, протекающее в единицу времени через поперечное сечение вакуумпровода, называется потоком газа в данном сечении. Поток газа удобно выражать в единицах

$$p \cdot V / \text{сек}$$

Если давление в данном месте вакуумпровода  $p$ , а быстрота действия системы в том же месте  $S$ , то  $Q$  – поток газа в рассматриваемом месте равен

$$Q = p \cdot S \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{сек}} \right] \left[ \frac{\text{ммртст.} \cdot \text{см}^3}{\text{сек}} \right] [\text{Вл}]$$

$p_2 \cdot S_n$  – у входа в насос – это производительность насоса

$$\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{сек}} = \frac{\partial \text{жс} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^3 \cdot \text{сек}} = \frac{\partial \text{жс}}{\text{сек}} = \text{Вл}; \quad \text{Па} = \frac{\partial \text{жс}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad \partial \text{жс} = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Как показали исследования, движущая разность давлений  $p_1 - p_2$  возникает потому, что трубопровод оказывает сопротивление потоку газа. По аналогии с законом Ома ( $I = \frac{U}{R} = \frac{E_1 - E_2}{R}$ ) можно записать

$$I = \frac{U}{R} = \frac{E_1 - E_2}{R}$$

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{W} \rightarrow Q = U(p_1 - p_2),$$

где  $W$  – это сопротивление трубопровода и  $W = \frac{1}{U}$ ;  $U$  – пропускная способность трубопровода ~ аналогия с проводимостью проводника.

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2} \text{ - это пропускная способность трубопровода.}$$

$U$  – можно рассматривать как поток газа через трубопровод при движущей разности давления равной единице.

$$[U] = \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{сек}} \right] \text{ - размерность.}$$

Отметим, что аналогия с законом Ома справедлива лишь в случае постоянства потока, т.е.

$$p_1 \cdot S_0 = U(p_1 - p_2) = p_2 S_n = Q \quad (*)$$

Равенство потоков возможно лишь в случае, когда поток удаляемого газа равен потоку натекающего газа, т.е. поток стационарный. Это происходит в случае предельного для насоса вакуума. Однако это происходит и в какие-то моменты времени. Квазистационарный поток. Из соотношения (\*) можно определить быстроту откачивающего действия системы в любом месте вакуумной системы

$$S_0 = \frac{Q}{p_1} \text{ при давлении } p_1.$$

Быстрота действия насоса при выпускном давлении  $p_2$  будет

$$S_n = \frac{Q}{p_2}$$

И вообще быстрота действия вакуумной системы будет

$$S = \frac{Q}{p} \text{ при давлении } p.$$

Видно, что если  $p_2 < p_1$ , то  $S_n > S_0$ , т.е. Быстрота действия системы в целом  $S_0$  меньше быстроты действия насоса  $S_n$ .

И только, когда насос присоединен непосредственно к объему, т.е.  $p_1 = p_2 \rightarrow S_0 = S_n$ .

Иногда  $S_0$  называют эффективной быстротой действия насоса.

### Основное уравнение вакуумной техники

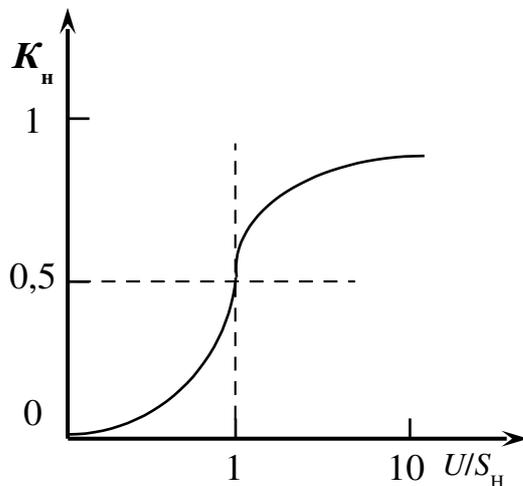
Из соотношения (\*) можно получить

$$S_0 = U \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_1}$$

$$S_n = U \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_2}$$

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} \cdot \frac{p_1}{p_1 - p_2}; \quad \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U} \cdot \frac{p_2}{p_1 - p_2}$$

$$\frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U} \left( \frac{p_1}{p_1 - p_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}$$



$$S_0 = \frac{S_n U}{S_n + U} \text{ - это основное}$$

уравнение вакуумной техники, которое связывает быстроту действия системы с пропускной способностью трубопровода и быстротой действия насоса. Коэффициент использования

$$\text{насоса } K_n = \frac{S_{\text{эфф}}}{S_n} = \frac{U}{S_n + U}.$$

$$\text{Если } S_n = U$$

$$S_{\text{эфф}} = 0,5 S_n$$

$$U \rightarrow \infty \quad S_{\text{эфф}} \rightarrow S_n$$

$$U \rightarrow 0 \quad S_{\text{эфф}} \rightarrow 0$$

### Классификация вакуумных насосов

Высоковакуумные и низковакуумные

В зависимости от физических процессов, заложенных в основу работы насосов, они делятся на: механические, сорбирующие, ионные.

**Механические:** объемные, молекулярные. Это насосы, принцип действия которых связан с передачей количества движения молекулам газа от движущихся поверхностей.

*Объемные:* их принцип действия основан на изменении объема рабочей камеры насоса (поршневые, ротационные, жидкостно-кольцевые).

*Молекулярные:* водоструйные, эжекторные, диффузионные, молекулярные.

**Сорбционные:** адсорбирующие, конденсационные.

Принцип действия – поглощение (сорбция) газа различного рода поглотителями (сорбентами).

**Ионные:** используется принцип направленного движения предварительно ионизованных молекул газа.

### Основные параметры насосов

*Быстрота действия насоса* – объем газа, протекающий через впускной патрубок насоса в единицу времени

$$S_n = \frac{dV}{dt}.$$

*Быстрота откачки объекта или эффективная быстрота откачки насоса* – объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени

$$S_0 = S_{эфф} = \frac{S_n U}{S_n + U}.$$

*Предельное давление насоса  $p_{np}$*  – это минимальное давление, которого может достичь насос, работая без откачиваемого объема. Оно определяется газовыделением материала, натеканием газа через щели, давлением паров рабочей жидкости. Отметим, что при  $p \rightarrow p_{np}$   $S_n \rightarrow 0$ .

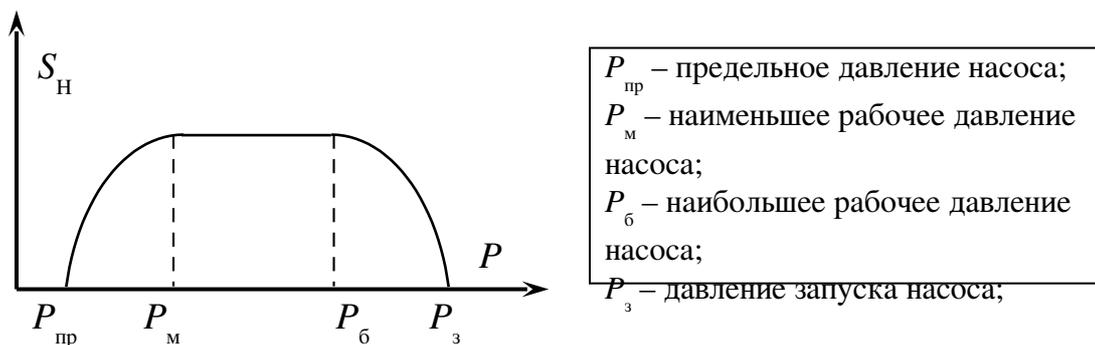
*Наименьшее рабочее давление насоса  $p_m$*  – это минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную (паспортную) быстроту действия. Отметим, что  $p_m \sim 10 p_{np}$ . В диапазоне между  $p_{np}$  и  $p_m$  насос использовать не выгодно.

*Наибольшее рабочее давление насоса  $p_b$*  – это наибольшее давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Отметим, что диапазон давлений  $p_m - p_b$  – оптимальный диапазон действия насоса.

*Наибольшее выпускное давление насоса  $p_v$*  – максимальное давление в выпускном патрубке насоса, при котором он может осуществить откачку, либо при котором он прекращает откачку ввиду прорыва газа с выпускной стороны.

*Давление запуска насоса  $p_z$*  – это максимальное давление во входном патрубке насоса, при котором он может начать работу. Отметим, что  $p_z \gg p_b$ . Разница между  $p_z$  и  $p_b$  может достигать нескольких порядков (ф.н.  $10^3 - 10^4$ ; д.н.  $10^{-1} - 10^{-9}$ ; т.м.п.  $10^{-7} - 10^{-10}$  и т.д.).

Насосы, у которых выпускное давление ниже атмосферного (молекулярные,

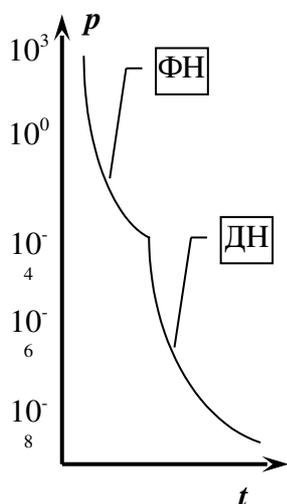


двухроторные, ионные и др.), предполагают подсоединение своего выпускного клапана к выпускному клапану насоса предварительной откачки.

Вакуумная техника имеет дело с диапазоном давлений от  $10^3$  до  $10^{-14}$  мм рт. ст. Очевидно, что один насос не может обеспечить работу в таком диапазоне.

Водокольцевые, водоструйные	$10^3$ -10 мм рт. ст.
Многопластинчатые	$10^3 - 10^0$ мм рт.ст.
Эжекторные, пароводяные	$10^3 - 10^{-2}$ мм рт.ст.
Вращательные, масляные	$10^3 - 10^4$ мм рт.ст.
Двухроторные	$10 - 10^{-5}$ мм рт.ст.

Пароструйные –  $10^0 - 10^{-7}$  мм рт.ст.  
 Молекулярные –  $10^{-1} - 10^{-10}$  мм рт.ст.



Адсорбирующие –  $10^3 - 10^{-10}$  мм рт.ст.  
 Ионно-сорбционные –  $10^{-2} - 10^{-10}$  мм рт.ст.  
 Конденсационные –  $10^{-3} - 10^{-12}$  мм рт.ст.

Ловушки, поглотители –  $10^{-2} - 10^{-12}$  мм рт.ст.

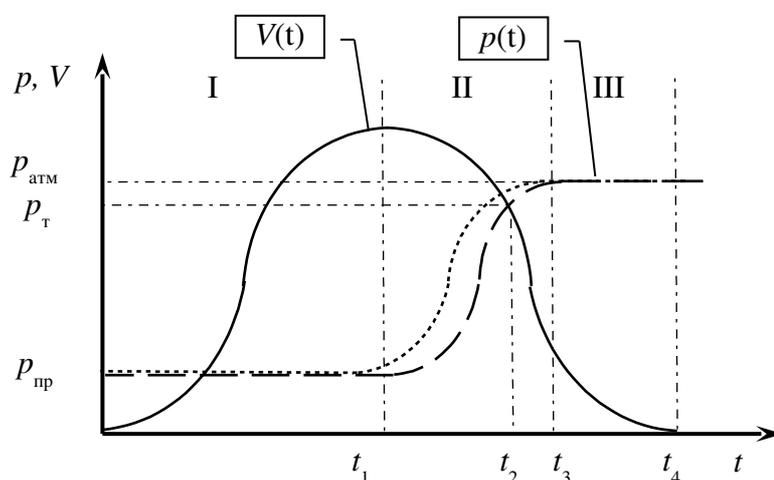
Существуют два типа насосов: насосы, выталкивающие газ в атмосферу, и насосы, связывающие откачиваемый газ в своем объеме.

Обычно, для достижения высокого вакуума, вакуумная установка состоит из нескольких насосов.

### Объемная откачка

В процессе объемной откачки выполняются следующие основные операции: I – всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса; II – уменьшение объема камеры насоса и сжатие газа; III – удаление сжатого газа из рабочей камеры насоса в атмосферу или насос предварительного разрежения:

I. - всасывание газа за счет расширения камеры насоса.



II – сжатие до  $p=p_{атм}$ .

III – выброс (выхлоп) газа в атмосферу.

$p_{пр}$  – предельное значение давления.

$p_{атм}$  – максимальное выпускное давление (в нашем случае  $p_{пр}=p_{атм}$ ).

$p_г$  – давление насыщенных паров рабочей жидкости.

Геометрическая быстрота объемной откачки равна:

$$S_z = V \cdot n;$$

где  $V$  – объем рабочей камеры насоса,

$n$  – количество циклов откачки.

Максимальная быстрота откачки насоса:

$$S_{\max} = \frac{S_z U}{S_z + U}$$

Реальная же скорость объемной откачки еще меньше за счет обратного потока газа в насос. А он (обратный поток) появляется за счет диффузии, вредного пространства и т.д.

Производительность откачки равна разности прямого и обратного потока газа

$$Q = Q_{np} - Q_{обр},$$

где  $Q = pS_n$ ;  $Q_{np} = pS_{\max}$

Когда достигается предельный вакуум, т.е.  $p=p_{np}$ , поток газа равен 0, и тогда можно записать:

$$Q_{np} = Q_{обр} = S_{\max} \cdot p_{np}, \quad \text{т.к. } Q = 0$$

$$p \cdot S_n = p \cdot S_{\max} - p_{np} \cdot S_{\max}$$

$$S_n = S_{\max} \left(1 - \frac{p_{np}}{p}\right)$$

$$S_{\max} = \frac{S_z U}{S_z + U}$$

$$S_n = \frac{S_z U}{S_z + U} \left(1 - \frac{p_{np}}{p}\right) \equiv k_\lambda \cdot S_z$$

$$k_\lambda = U \cdot \frac{1 - \frac{p_{np}}{p}}{S_z + U} - \text{коэффициент подачи.}$$

Т.е. реальная скорость объемной откачки в  $k_\lambda$  раз меньше  $S_{\max}$ . Т.е. чтобы увеличить скорость, надо увеличить  $U$  и  $V$ , т.к.  $S_z = V \cdot n$ , где  $n$  – оптимальное, какое-то, значение, которое увеличивать бесконечно нельзя (перегрев, не будет успевать наполняться рабочая камера).

### Предельное давление объемной откачки

Напишем уравнение материального баланса

$$G_0 + G_B = G_1,$$

где:

$G_0$  – количество газа в откачиваемом объекте до начала откачки;

$G_B$  – количество газа, поступающее в объем в процессе откачки (течи, гажение);

$G_1$  – количество газа в объеме и в насосе после одного цикла откачки.

Перепишем уравнение материального баланса в другом виде:

$$p_0 V_p + \alpha_1 V_B p_{вых} = p_1 (V_p + V_k),$$

где  $p_{вых}$  – давление выходное (выхлопа);

$p_1$  – давление в вакуумном объеме после одного цикла откачки;

$p_0$  – начальное давление;

$V_p$  – откачиваемый объем;

$V_k$  – объем камеры насоса;

$V_B$  – объем вредного пространства;

$\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий газовыделение, степень прорыва газа.

Тогда

$$p_1 = p_0 \frac{V_p}{V_p + V_k} + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} \cdot p_{\text{вых}} \cdot \frac{V_p}{V_p + V_k}.$$

Если осуществить еще один цикл откачки (в этом случае давление в откачиваемом объеме будет уже  $p_1$ )

$$p_2 = p_1 \frac{V_p}{V_p + V_k} + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} \cdot p_{\text{вых}} \cdot \frac{V_p}{V_p + V_k} = p_0 \left( \frac{V_p}{V_p + V_k} \right)^2 + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} \cdot p_{\text{вых}} \left[ \frac{V_p}{V_p + V_k} + \left( \frac{V_p}{V_p + V_k} \right)^2 \right]$$

После  $n$ -го числа откачки  $p_n$  будет

$$p_n = p_0 \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{V_k}{V_p} \right) \right]^n} + \sum_{m=1}^n \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} p_{\text{вых}} \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{V_k}{V_p} \right) \right]^m}$$

$n \rightarrow \infty$

бесконечно убывающая геометрическая прогрессия:

$$\sum \frac{1}{\left( 1 + \frac{V_k}{V_p} \right)^m} \rightarrow \frac{V_p}{V_k}$$

Тогда

$$p_\infty = \alpha_1 \frac{V_B}{V_k} \cdot p_{\text{вых}}.$$

Видно, что все определяется соотношением  $\frac{V_B}{V_k}$ , давлением выхлопа и  $\alpha_1$  (газовыделение в насосе, пары рабочей жидкости, натекание). Видно, что если уменьшить  $p_{\text{вых}}$  (вторая ступень), то уменьшится и  $p_\infty$ . Кроме этого уменьшают как можно больше  $V_B$ .

Мощность, потребляемая при объемной откачке,  $W$  расходуется на сжатие газа до выхлопного давления (это полезная мощность  $W_{\text{п}}$ ) и на преодоление сил трения.

В координатах  $p$  и  $V$  (объем) цикл откачки можно представить диаграммой (одного цикла)



- $p_1$  – давление всасывания;
- $p_a$  – давление выхлопа (в данном случае  $p = p_{\text{атмосферы}}$ );
- $V_1$  – максимальный объем рабочей камеры насоса;
- $V_a$  – объем рабочей камеры насоса при давлении выхлопа  $p = p_a$ .

$A_1$  – это работа на сжатие газа. При политропическом сжатии:

$$A_1 = p_1 V_1 \cdot \frac{1}{1-m} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

(Полиетропический процесс – это обратимый процесс при постоянной теплоемкости  $c = \text{const}$   $m=1,2$  для воздуха) ( $m$ - показатель политропы).

Работа, совершаемая за один цикл откачки, исходя из диаграммы, равна

$$A = A' + p_a V_a - p_1 V_1.$$

А поскольку для политропического процесса справедливо соотношение

$$p_a V_a^m = p_1 V_1^m, \text{ то}$$

$$p_a V_a - p_1 V_1 = p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$A = p_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$p_a V_a^m = p_1 V_1^m; \quad p_a^{\frac{1}{m}} V_a = p_1^{\frac{1}{m}} V_1; \quad V_a = \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot V_1;$$

$$p_a V_a = p_a \cdot \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot V_1;$$

$$p_a V_a - p_1 V_1 = p_a \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{1}{m}} - p_1 V_1 = p_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right) \cdot \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot V_1 - 1 \right] = p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{1}{m}-1} - 1 \right] =$$

$$= p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = p_1 V_1 \frac{1}{m-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] + p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = p_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$W_n = \frac{A}{t_{\text{цикла}}} = nA \text{ - мощность, потребляемая насосом,}$$

где  $t_u$  – время одного цикла =  $1/n$ .

$$W_n = n V_1 \cdot p_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

$$\text{А, как известно, } S_{\text{геом}} = S_z = n V_1.$$

$$W_n = S_z \cdot p_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

Видно, что  $W_n \rightarrow 0$  при  $p_1 \rightarrow 0$ , т.е. при достижении насосом максимального вакуума.

$W_n \rightarrow 0$  при  $p = p_a$ , т.е. до начала откачки.

$$W_{n(\text{max})} \text{ при } p_1 = \frac{p_a}{m} \left( 1,2^{\frac{1,2}{0,6}} = 1,2^6 \approx 3 \right)$$

$$\frac{\partial W}{\partial p_1} = S_z \cdot \frac{m}{m-1} \left( p_a^{\frac{m-1}{m}} \cdot \frac{1}{m} \cdot p_1^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right) = 0$$

$$p_1 = p_a \cdot \frac{1}{m^{\frac{m}{m-1}}} = \frac{p_a}{m^{\frac{m}{m-1}}}$$

Для  $m=1,2$   $p_a=10^5$  Па;  $p_1=3,3 \cdot 10^4$  Па.

## Механические насосы

### Вращательные масляные насосы. Пластинчато-роторные насосы

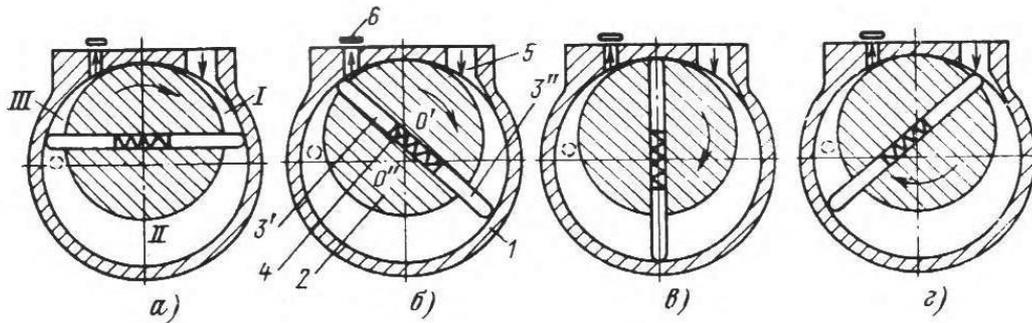


Схема пластинчато-роторного насоса.

В цилиндрической камере 1 насоса вращается в направлении, указанном стрелкой, эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно вставлены пластины 3 с пружиной 4. При вращении ротора пластины скользят по внутренней поверхности цилиндра, и в камере насоса образуются две полости переменного объема: I – полость всасывания, II – полость сжатия.

Полость I при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из выпускного патрубка 5, связанного с откачиваемым объемом.

Объем полости 2, расположенный на выпускной стороне, уменьшается при вращении ротора, и в ней происходит сжатие газа. Эта полость соединена с клапаном 6. Когда давление в полости II станет достаточным для открытия клапана 6, произойдет выхлоп. Клапан 6 – выхлопной клапан – находится под уровнем масла, которое препятствует попаданию атмосферного воздуха в насос.

В процессе работы зазоры в роторном механизме заполняются маслом, т.е. уплотняются маслом. Масло – вакуумное уплотнение. Такие насосы позволяют производить откачку до давления  $p \sim 10^{-3}$  мм рт.ст. Эффективным способом уменьшения предельного давления, исходя из формулы:

$$p_{\infty} = \alpha \cdot \frac{V}{V_k} \cdot p_{\text{вх}}$$

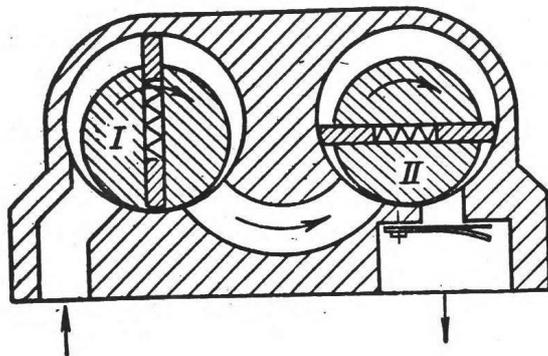
Есть сдвиг насосов:

Частота вращения у этих насосов 1500 – 3000 об/мин.

$p \sim 10^3$  мм рт.ст.;  $S_n = 1-100$  л/сек

$p_{\text{пред}} \sim 10^1-10^2$  – одна ступень

$p_{\text{пред}} \sim 10^4$  – две ступени



## Пластинчато-статорные насосы

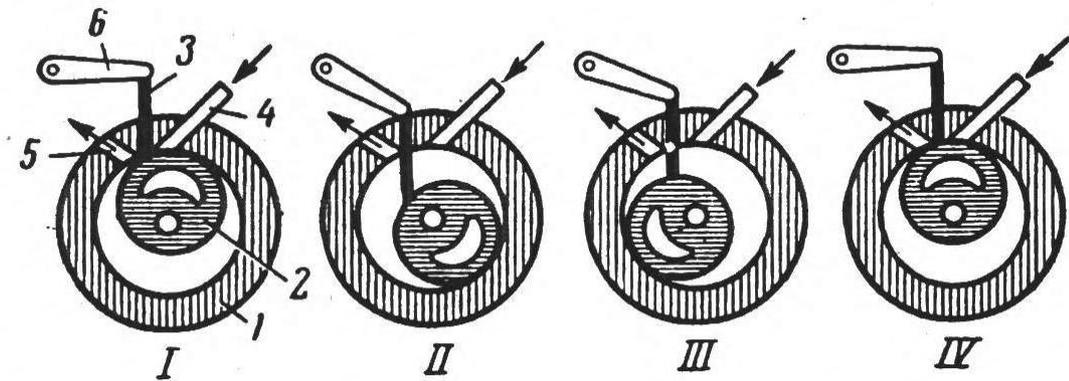


Схема пластинчато-статорного насоса

Основное отличие от пластинчато-роторных насосов – барабан 2 расположен не соосно оси вакуумной камеры насоса, но вращается по оси, совпадающей с геометрической осью вакуумной камеры.

Одной из своих образующих барабан скользит по внутренней полости вакуумной камеры и, благодаря наличию пластины 3, разделяет объем вакуумной камеры на участки так же, как и пластины в ПРН. Пластина 5, с помощью кронштейна 5 и пружины 4, прижимается к поверхности барабана 3. И при его вращении совершает движения вверх-вниз. Те же циклы – всасывание, перенос, сжатие, выхлоп. Преимущества - это уменьшение опасных мест (только место соприкосновения барабана с камерой и пластиной). Отсутствие прорезей в барабане тоже уменьшает возможность просачивания газа в сторону выпускного клапана.

Применяются и двухступенчатые насосы. В этом случае барабан первой ступени выбрасывает газ с второй – производит всасывание.

Частоты вращения до 600 об/мин

$p_{пред} \sim 10^{-2}$  – одноступенчатые,  $p_{пред} \sim 10^{-4}$  – двухступенчатые.

## Золотниковые (плунжерные) насосы

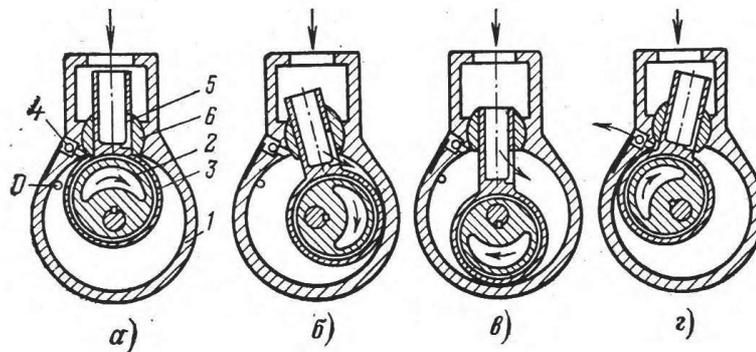


Схема золотникового (плунжерного) насоса.

На валу, размещенном по центру вакуумной камеры насоса, закреплен эксцентрик 2, который совершает движения, аналогичные барабану ПСН. Но он помещен в обойму 3, которая представляет собой цилиндр, от которого вверх идет дополнительная плоская часть в виде полого и открытого сверху параллелепипеда 5 с отверстием на одной из сторон.

При движении эксцентрика обойма скользит по внутренней поверхности вакуумной камеры и совершает колебательные движения: в золотнике 6 – вверх-вниз и колебания из стороны в сторону.

Те же положения обоймы, которая разделяет вакуумную камеру на части: всасывание, перенос, сжатие, выхлоп. Преимущество – уменьшение ответственных мест по герметичности. Всасывающая сторона отделена от выхлопной – не пластиной, скользящей по барабану, а жестко скрепленной с обоймой плоской частью, скользящей только по вкладышу 6. Вследствие меньшего трения между подвесными частями, золотниковые насосы требуют меньшего охлаждения, что устраняет необходимость погружения вакуумной камеры насоса в бак с маслом. Благодаря надежности золотниковые насосы можно делать большой мощности и скорости откачки. В этом случае корпус насоса охлаждается водой.

Частоты вращения до  $500 \text{ об/мин}$ .  $p_{\text{пред}} \sim 10^{-3}$  мм рт.ст.

## Принцип газобалласта

Одним из недостатков вращательных масляных насосов есть неэффективная работа при откачке газопаровой смеси. Если рассмотреть соотношение  $V_{кн}/V_{к сжс}$ , где  $V_{кн}$  – рабочий объем камеры насоса,  $V_{к сжс}$  – это объем камеры насоса в момент открывания опекона. Соотношение  $V_{кн}/V_{к сжс} \sim 700-800$ , но то же можно сказать и о давлении, т.е. газ сжимается до давления  $\sim p_a$ , т.е. *760 мм рт.ст. ~ 1000 мм рт.ст.* (А на выпуске насоса как-то  $\sim 1$  мм рт.ст.) В газопаровой смеси присутствуют газ и пары воды (например).

Давление насыщенных паров воды  $\sim 13$  мм рт.ст., т.е. пар, находящийся в смеси очень быстро сконденсируется, и насос будет «сжимать» газ и воду. При открывании клапана эта вода попадает в масло, ухудшает его свойства и через «вредное пространство» попадает опять в насос. Воду куда-то надо убрать. Эффективный метод предотвращения конденсации паров в масле – это напуск газобалластного газа.

В камеру насоса через специальный клапан напускается газобалластный газ, причем количество этого газа определяется из условия, чтобы к моменту достижения смесью (газа и пара) давление выхлопа, парциальное давление паров, не достигало давления насыщения пара.

$$[p_b + (p_z + p_n)]V_1 = p_a V_2, \text{ где}$$

$p_b$  – давление балластного газа,

$p_z$  – давление газа на выпуске в насос,

$p_n$  – давление пара на выпуске в насос,

$p_a$  – давление выхлопа,

$p_{нас}$  – давление насыщенных паров.

Учтем, что  $p_z < p_n$  всегда, т.к. газ эффективно удаляется, а  $p_n$  – нет и оно большое, если есть источник пара. Можно записать, что:

$$(p_n + p_z)V_1 \leq p_{нас} V_2 \Leftrightarrow p_{см} V_1 \leq p_{нас} V_2,$$

Тогда, т.к.  $p_z \ll p_n$ , можно записать

$$p_n V_1 \leq p_{нас} V_2 \Rightarrow p_{нас} \frac{V_1}{V_2} \leq p_n.$$

Если определить количество балластного газа через  $Q_b$  оно будет равно

$$Q_b = p_b \cdot V_2 \cdot n = p_b \cdot S_n$$

В предельном случае, когда давление пара в насосе достигло  $p_{нас}$ , можно записать

$$p_n \cdot \frac{V_1}{V_2} = p_{нас}.$$

Учтем, что в момент открывания клапана (выхлопного), полное давление смеси достигает  $p_{атм}$ , т.е.

$$p_b + p_{нас} = p_a \Rightarrow p_b = p_a - p_{нас} = p_{нас} \left( \frac{p_a}{p_{нас}} - 1 \right) = p_n \frac{V_1}{V_2} \left( \frac{p_a}{p_{нас}} - 1 \right)$$

$$Q_b = p_b \cdot V_2 \cdot n = p_n \cdot V_1 \cdot n \left( \frac{p_a}{p_{нас}} - 1 \right)$$

$$Q_b > p_n \cdot V_1 \cdot n \left( \frac{p_a}{p_{нас}} - 1 \right) \Rightarrow p_n \cdot S_n \left( \frac{p_a}{p_{нас}} - 1 \right).$$

Насос требует тем большего количества балластного газа, чем выше его скорость, чем больше выпускное давление пара  $p_n$  и чем меньше  $p_{нас}$  в  $V_2$  при какой-то рабочей температуре.

## Масло для вращательных насосов

Требования:

- 1 – достаточно низкое давление насыщенных паров – вытекает из того, что практически предельный вакуум определяется полным давлением всех остаточных газов и паров, включая пары масла, которые диффундируют в откачиваемый объем из насоса.
- 2 – определенная вязкость – малая вязкость – слабое вакуумное уплотнение; большое – затруднение вращения.

Еще одна характеристика – температура вспышки.

$$T_{\text{вспышки}} > 200 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По мере работы масло постепенно меняет свои свойства, состав, за счет разложения на фракции (местный перегрев из-за трения разложению, тяжелых молекул).

Кроме этого – осмоление – образовавшиеся слои накапливаются и приводят к «заеданию» насоса. Признак – разогрев чрезмерный. Особенно при откачке паров хлора, фтора, кислот. Масло надо периодически менять.

Масло для вращательных насосов это:

ВМ-4	$p_{\text{нас}} \sim 10^{-5} \text{ тор}$
ВМ-1	$p_{\text{нас}} \sim 3 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ тор}$
ВМ-5	$p_{\text{нас}} \sim 10^{-8} - 10^{-6} \text{ тор}$
ВМ-7	$p_{\text{нас}} \sim 10^{-6} \text{ тор}$
ВМ-3	$p_{\text{нас}} \sim 10^{-3} \text{ тор}$

## Сравнительные характеристики насосов

ПСН:

ВН-461 ~ 0,86 л/сек; 540 об/м	}	$p_{\text{нр}} \sim 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$
РВН-20 ~ 3,3 л/сек; 400 об/м		

ПРН:

НВР-5D ~ 5 л/сек	}	1200 об/м	$p_{\text{нр}} \sim 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$
НВР-1D ~ 1 л/сек;			
НВР-16D ~ 16 л/сек			

Золотниковые:

АВЗ-20	20 л/сек	ДУ – 20 м	}	$p_{\text{нр}} \sim 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$
АВЗ-300	300 л/сек	ДУ – 300 м		
АВЗ-500	500 л/сек	ДУ – 500 м		

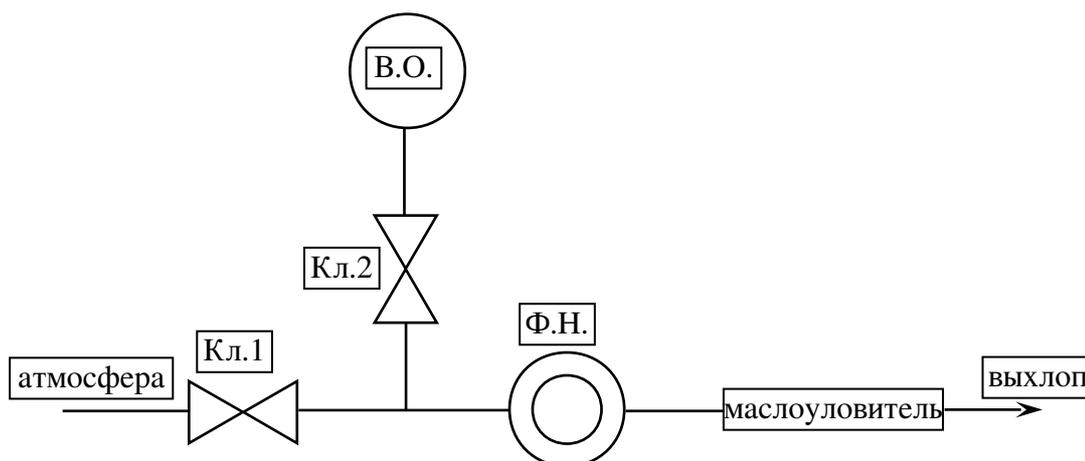
Старые названия:

ВН-1	22,5 л/сек	500 об/м	}	$p_{\text{нр}} \sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{ мм рт.ст.}$
ВН-1	60 л/сек	500 об/м		
ВН-1	153 л/сек	360 об/м		

## Правила эксплуатации вращательных масляных насосов

Установка: прочное закрепление на полу. Если большой, то болтами к полу. Поддоны под масло. Поддоны на резиновый коврик для снижения шума. Ввиду неизбежной вибрации между вакуумным объемом и насосом сиффон или резиновый шланг.

Схема подсоединения.



После расконсервации: проверяют двигатель, направление вращения, натяжение ремня, легкость вращения вала, уровень масла.

Ремень – нижняя часть ремня 2-3<sup>0</sup> провисания – стоящий насос.

Верхняя часть ремня 1,5-2<sup>0</sup> колеблется от среднего положения – работающий насос.

После предварительной проверки насос должен поработать «сам на себя» с проверкой предельного вакуума. Перед включением – 2-3 раза провернуть вал насоса или 2-3 раза резко включить и выключить, т.к. осевшее масло может повредить лопадки. Заклинить, перегреть двигатель. Следить за скоростью вращения по паспорту.

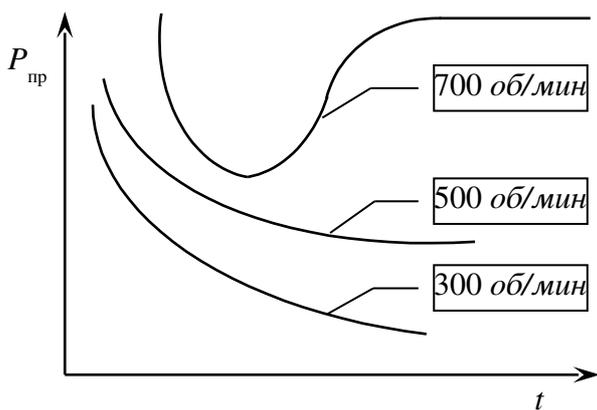
Осмотреть уровень масла в окошке. При работе посередине окошка. Не работать долго на «атмосфере», т.к. перегрев насоса и выброс капель в атмосферу.

Отметим, что при работе вакуумных насосов (вращательных масляных) с

масляным уплотнением происходит разбрызгивание масла в выпускное отверстие насоса. Кроме этого существует обратный поток углеводородов в откачиваемый объем (различен для разных насосов, указывается в паспорте). Особенно это заметно при работе на давлениях близких к атмосфере.

На давлениях от 700 до 0,7 мм рт.ст. – образуется «масляный туман» - сизо-белый дым. Это неизбежно. Это загрязнение вакуумной камеры и окружающей среды. Выхлоп «на улицу». Чтобы уменьшить этот эффект, надо правильно конструировать вакуумную систему:

1. Должна обладать высокой пропускной способностью (не должна пропускать  $S_n$ ).
2. Не допускать попадания рабочей жидкости в вакуумный объем.



3. Не допускать попадания посторонних предметов в насос.

Оптимальный трубопровод  $D_{y\text{тр}} = D_{y\text{вх. натр. насоса}}$

$L_{\text{тр}} = 5-10 D_{y\text{нас}}$ . Поворот 1-2  $D_y$ .

Этот трубопровод создает эффективные условия для конденсации и возврата масла в насос, а не попадания его в вакуумную камеру.

Если мало места, то надо маслоуловитель. Некоторые насосы снабжены подобными устройствами. «Туман» маслоуловитель не уловит, надо применять пористые фильтры: стекловата, керамика и т.д. Ставят на «выхлопе» насоса и периодически меняют.

Итак. Толчками 2-3 раза запустить. На себя 1-5 мин., потом на камеру. Желательно клапан открывать постепенно. Ограничение потока снижает выброс масла.

Обращать внимание на уровень и качество масла. Наличие бензина, ацетона, спирта, воды снижает его качество и повышает предельное остаточное давление.

Эффективным способом борьбы с «водой» является газобалластное устройство. Пользование газобалластом состоит в следующем. Насос качают «сам на себя» и открывают «газобалласт», насос работает. Давление сначала растет, а потом постепенно падает. Время – опытным путем. Если ~ 30 мин не будет улучшения вакуума, масло менять.

Смена масла. Включают насос и с «газобалластом» ~ 30 мин. Выключают и сливают масло. Когда все выльется, снова включают на сек. Или вручную. Наливают новое. На газбалласт ~ 10 -15 мин. И готов к работе.

Если после смены масла не восстанавливается  $p_{\text{пред}}$ , то разборка и механическая чистка. Если  $p_{\text{пред}} \rightarrow 0$ , то:

1. Долить масло.
2. Плохое масло  $\rightarrow$  газобалласт, если не помогло, то смена масла.
3. Осмотреть клапана и почистить.
4. Загрязнение каналов, по которым масло поступает в камеру насоса.
5. Износ насоса.

### Быстрота действия. Метод постоянного объема

$pV = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$  – закон Бойля-Мариотта.

За время  $\Delta t$  из системы откачивается объем газа  $\Delta V_n$ , а давление уменьшается на  $\Delta p$ .

$$pdV_n = Vdp \Rightarrow \frac{dV_n}{dt} \cdot dt = -V \frac{dp}{p};$$

«-» за счет того, что равны по величине, но убыль, т.е. разные по знаку.

$$S_n = \frac{dV_n}{dt} \quad \frac{dp}{p} = -\frac{S_n}{V} \cdot dt.$$

Предположим, что  $S_n = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$ .

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{S_n}{V}t} \quad p_0 = p \text{ при } t=0.$$

$$S_n = \frac{V}{t_1} \cdot \ln \frac{p_0}{p_1} \text{ в какой-то момент времени } t.$$

Время откачки  $t = \frac{V}{S_n} \ln \frac{p_1}{p_2}$ .

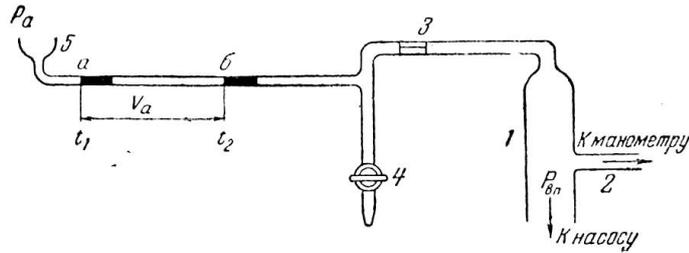
*Пример.*  $V=100$  л;  $S=5$  л/сек;  $p_1=1$  атм= $760$  мм рт.ст.,  $p_2=100$  мм рт.ст. Узнать время откачки.

$$t = \frac{V}{S_n} \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{100}{5} \cdot \ln \frac{760}{100} = 20 \cdot \ln 7,6 = 40 \text{ сек}$$

*Пример.*  $V=100$  л;  $p_1=760$  торр,  $p_2=460$  торр,  $\Delta t=5$  сек.

$$S_n = 2,3 \cdot \frac{100}{5} \ln \frac{760}{460} = 20 \cdot \ln 1,65 \cdot 2,3 = 46 \ln 1,65 = 46 \cdot 0,21 = 10 \text{ л/сек}$$

### Устройство для определения быстроты действия насоса. Метод постоянного давления



$S = \frac{Q}{p}$  – быстрота действия насоса.

3 – регулируемый натекатель, для создания постоянного давления в насосе  $p_{вн}$ , при котором определяется  $S_n$ .

Сообщение входного конца натекателя с  $p_{атм}$  осуществляется клапаном  $K_1$ . Предварительно в трубку вливается капля масла. При открытом натекателе 4, 3-им выставляется то давление, при котором хотят определить  $S_n$ . выставим с помощью 3 и 4-открытом какое-то  $p_{вн}$ . Закрываем 4 и засекаем  $t_1$ . Капля начнет перемещаться за какое-то время  $t_2$ . Это будет объем  $V_a$ .

Потом газ  $Q_1 = p \cdot S = p_{вн} \cdot S_n$   $Q_1 = Q_2$

$$Q_2 = p_a \cdot S_n \quad S = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{p_a}$$

$$p_{вн} S_n = p_a S_n = p_{вн} S_n = p_a \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow p_a \cdot \frac{V_a}{t_2 - t_1}$$

$$S_n = \frac{V_a}{t_2 - t_1} \cdot \frac{p_a}{p_{вн}}$$

### Многопластинчатые насосы

Для грубой откачки больших объемов, а также для поддержания вакуума в больших объемах, в централизованных трубопроводах применяются многопластинчатые насосы. Устройство то же, что и у пластинчато-роторных.

Тут нет масляного уплотнения, как у ПРН, а масло используется только для смазки подшипников, поэтому  $r_{пр} \sim 15 \text{ мм рт.ст.}$ ,  $r_{пр.2x ступ.} \sim 4 \text{ мм рт.ст.}$ . Зато  $S_n \rightarrow 1000 \text{ л/сек}$ . Число оборотов  $1500 \text{ об/мин}$ ,  $p \sim 100 \text{ кВт}$ .

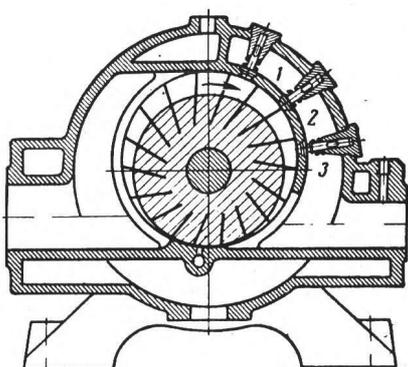
Марка РВН-8  $\rightarrow 100 \text{ л/сек}$

РВН-30  $\rightarrow 475 \text{ л/сек}$

РВН-60  $\rightarrow 840 \text{ л/сек}$

Предусмотрено охлаждение водой.

### Жидкостно-кольцевые насосы



Напоминает многопластинчатый насос, но лопасти закреплены. При вращении под действием центробежной силы образуется кольцо жидкости, которое и служит уплотнением. Между кольцом жидкости и лопатками – пустое пространство – туда через специальное отверстие поступает газ. В процессе вращения объем пустоты увеличивается (газ всасывается), затем уменьшается и газ выталкивается.

В качестве рабочей жидкости для воздуха – вода, для агрессивных газов – хлора – серная кислота.

Предельное давление определяется давлением насыщенных паров рабочей жидкости. У воды  $p \sim 13 \text{ мм рт.ст.}$  при  $t=20^\circ\text{C}$ .

ВВН-3; 6, 12, 25, 50 м<sup>3</sup>/мин.

### Двухроторные насосы

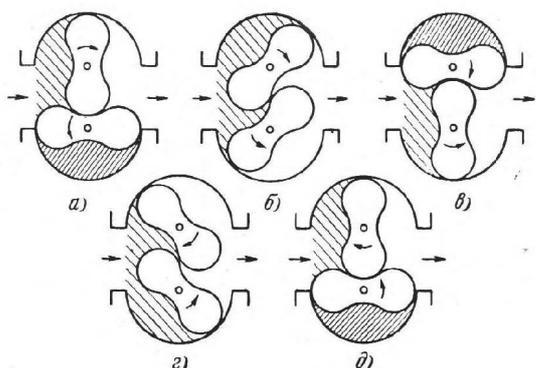
Двухроторные насосы сходны с вращательными масляными. Принцип их действия – изменение объема вакуумной камеры насоса – благодаря этому откачка. Но тут большие зазоры, вращение  $3000 \text{ об/мин}$ . Из-за наличия больших зазоров происходит большой обратный поток газа.

$Q_{обр} = U(p_{выт} - p_{вп})$  – это пропускная способность зазоров.

Известно, что пока средняя длина свободного пробега молекулы мала, т.е.  $p$  – велико,  $U_a$  – тоже уменьшается и становится минимальным и постоянным.

А надо уменьшить  $Q_{обр}$ . Т.е., чтобы его уменьшить, надо уменьшить  $p_{выт} - p_{вп}$ , т.е.

это можно сделать, уменьшив и  $p_{выт}$  и  $p_{вп}$ , т.е. уменьшить давление с обеих сторон. А это можно сделать, включив на выхлопе двухроторного насоса еще один фор. вакуумный насос. Т.е. впускное давление двухроторных насосов должно быть меньше атмосферного. Оптимально  $p_{вп} \sim 1 - 0,01 \text{ мм рт.ст.}$



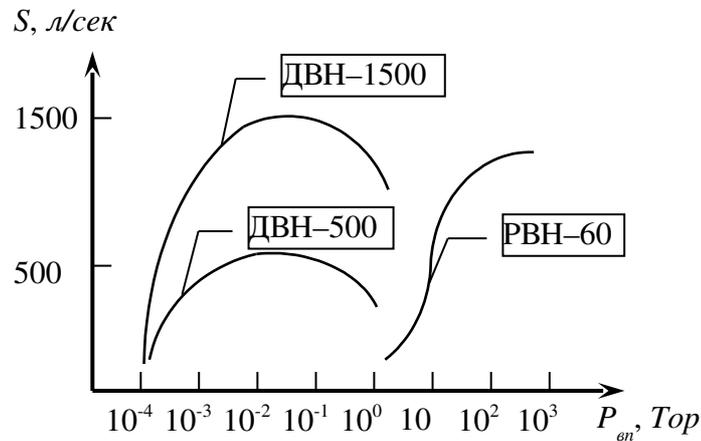
Предельное давление двухроторного насоса находится в прямой зависимости от впускного давления, которое создается дополнительным фор. насосом.

$$p_{\text{вых}} \sim 10^{-5} \text{ торр}; p_{\text{одн}} \sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ торр.}$$

Если качать в атмосферу, то  $p_{\text{пред}} \sim 100 \text{ мм рт.ст.}$

ДВН-150, ДВН-500, 2ДВН-1500.

$$S_n \cdot p_{\text{вн}} = S_{n_{\text{расч}}} \cdot p_{\text{вн}} - Q_{\text{обр}}$$



$$S_n \cdot p_{\text{вн}} = S_{n_{\text{расч}}} \cdot p_{\text{вн}} - U_3 (p_{\text{выт}} - p_{\text{вн}})$$

$$S_n = S_{n_{\text{расч}}} - U_3 \left( \frac{p_{\text{выт}}}{p_{\text{вн}}} - 1 \right)$$

Скорость откачки двухроторного насоса тем больше, чем меньше  $U_3$  и отношение  $p_{\text{выт}}/p_{\text{вн}}$ .

$S_{n_{\text{расч}}}$  - ?

За один оборот один ротор описывает объем

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot L, \text{ где}$$

$L$  - длина ротора,

$D$  - диаметр описываемой окружности.

Ротор занимает  $\approx 0,5$  объема вакуумной камеры.  $n/60$  - число оборотов в секунду.

Два ротора в одну секунду описывают объем  $2 \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \cdot \frac{n}{60}$ .

$$S_{n_{\text{расч}}} = \frac{\pi D^2}{2} \cdot L \cdot \frac{n}{60} \sim \text{объему и частоте вращения.}$$

### Замечание

1. В паспорте указывается быстрота действия в диапазоне  $1,0 - 10^2$  мм рт.ст.
2. Насосы → в виде агрегатов с фор. насосом. Откачивают до  $1 - 10^2$  торр и тогда включают двухроторный  $S_{ф.н} \sim 1/15 S_{двухрот.}$
3. При эксплуатации следить за уровнем масла в подшипниках и шестеренках, отсутствием течей в масло, шумами.  
Недостижение предельного вакуума обычно связано с течью на фланцах либо плохим фор. насосом.

### Запуск двухроторного насоса

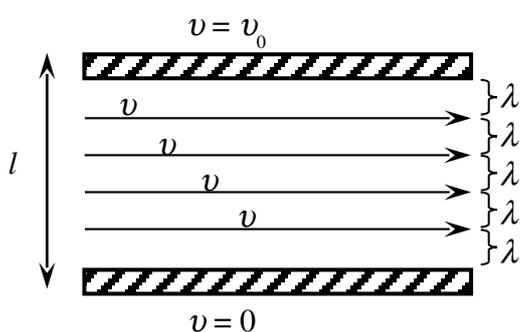
1. Включить фор. насос, откачать до  $p \sim 1 - 0,001$  торр.
2. Включить двухроторный насос
3. Открыть вакуумную камеру

### Выключение двухроторного насоса

1. Закрыть объем
2. Выключить двухроторный насос.
3. Закрыть фор. насос.
4. Выключить фор. насос.

Агрегаты (двухроторный + фор. насос) → АВМ-5-2; 50-1; 150-1.

## Молекулярная откачка Внутреннее трение газа



$$\lambda \ll l$$

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{P_{\text{мртст}}} [\text{м}]$$

Две пластины. Одна движется со скоростью  $v_0$ , вторая  $v=0$ , подвижная. Молекулы газа, ударившись о движущуюся пластину, приобретают дополнительную скорость в направлении движения пластины. Газ можно представить в виде слоев толщиной  $\lambda$ . Два крайних слоя – это адсорбированные молекулы газа. Вследствие взаимных

столкновений, происходит передача импульсов от одного слоя газа к другому. Возникает распределение скоростей (см. схему). И в конце концов неподвижная пластина тоже начнет двигаться. Явление переноса количества движения в среде – это явление внутреннего трения среды (газа).

На среду сила внутреннего трения

$$f = -\eta \frac{dv}{dl} \cdot A,$$

где  $A$  – площадь пластин,

$\eta$  – это коэффициент внутреннего трения, коэффициент динамической вязкости.

В СИ, если  $f$  – в ньютонах

$$\eta = 4,99 \cdot 10^{-2} \cdot \rho \cdot \lambda \cdot v_T,$$

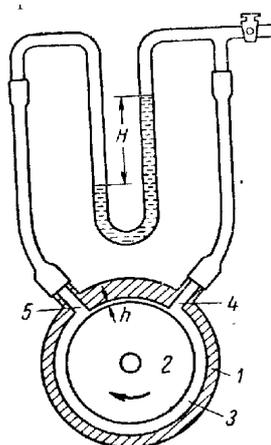
$v_T$  – тепловая скорость, зависит от  $T$ ,

$\rho \cdot \lambda$  – не зависит от  $p$ , т.е.  $\eta$  растет с температурой и не зависит от  $T$ .

Другой случай  $\lambda \gg l$ .

Такой передачи импульсов уже не будет, а будет свободное перемещение частиц и их столкновения с пластинами (а не друг с другом). И, соответственно, частицы будут ускоряться или тормозиться в зависимости от направления движения (начального). Такая передача импульса от движущейся пластины к неподвижной, посредством, не зависящих друг от друга столкновений, называют молекулярной вязкостью. Очевидно, что ввиду отсутствия потерь на взаимные столкновения, молекулярная вязкость (коэффициент) должен быть  $\sim n \sim p$ .

## Молекулярные насосы



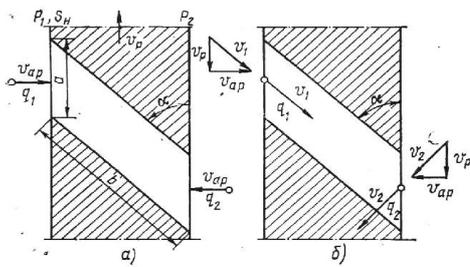
В статоре 1 вращается ротор 2. 5 – выпускной, 4 – впускной клапаны. Перегородка разделяет вакуумный объем камеры на 2 части. Ввиду того, что канал 3 больше, чем зазор между перегородкой и ротором, движение газа будет преимущественно в отверстия 5.

$$H = p_{\text{выпуск}} - p_{\text{впуск}}$$

Если  $\lambda \ll d$ , т.е. режим внутреннего трения, динамической вязкости ( $d$  – зазор).  $H$  зависит от величины зазора, скорости вращения, они не зависят от  $p$  и  $\eta$  – не зависит от  $p$  при  $\lambda \ll d$ . Т.е. установится какое-то  $H$  и оно будет постоянным.

Если  $\lambda \gg d$  (работает фор. насос,  $N$  – начнет уменьшаться, т.к. зазор и частота вращения не зависит от  $p$ , но  $\eta$  – зависит, а постоянным будет соотношение  $\frac{P_{\text{вып}}}{P_{\text{вп}}}$ , т.е. степень сжатия. А это значит, что во сколько раз мы понизим выпускное давление (которое зависит от скорости вращения, величины зазора), во столько же раз уменьшится и  $p_{\text{выпуск}} \equiv p_{\text{пред}}$ . Т.е. работа насоса эффективна при  $\min p_{\text{выпуск}}$ , т.е. хорошей работы фор. насоса.

Вторая схема молекулярной откачки использует зависимость проводимости наклонного канала, движущегося перпендикулярно газовому потоку со скоростью  $v_{\perp}$ .  $v_{\perp} \perp$  направлению течения газа.



Предположим, что пластину бомбардируют потоки  $q_1$  и  $q_2$  перпендикулярно ее поверхности. Пластина движется со скоростью  $v_p$ . Остановив пластину (отсюда  $\downarrow v_p$ ) и сложив соответствующие векторы скоростей, получим, что  $q_1$  – проходит вдоль

канала,  $q_2$  – оседает на стенках, если  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_{ap}}{v_p}$ . Т.е. проводимость канала для  $q_1$  и  $q_2$  различные, т.е.

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

$\downarrow$   
 $W_1$

$\downarrow$   
 $W_2$

$U_{12}$  – проводимость канала для  $q_1$ ,

$U_{21}$  – проводимость канала для  $q_2$ .

Обычно  $p_{\text{вып}}/p_{\text{вп}}$  – степень сжатия =  $k$ .

Степень сжатия для пары пластин не велика  $\sim 2-4$ . Выход в большом количестве  $\sim 40$  дисков.  $k \sim 10^2-10^3$  по водороду, по азоту –  $10^7-10^{12}$  в зависимости от скорости вращения. Отметим, что скорость откачки слабо зависит от рода газа, но предельный вакуум – сильно. Лучше качают тяжелые газы, а гелий, водород – хуже.

$$p_{\text{ax}} \sim 10-10^{-6} \text{ Па}, \quad p_{\text{np}} \sim 10^{-7}-10^{-8} \text{ Па}.$$

Частота вращения  $10-40$  тыс. об/мин,  $S_n \sim f_{\text{вращения}}$  и  $S_{\text{пластин}}$ .

$p_{\text{max ax}} \sim 10^{-2}$  торр,  $p_{\text{max np}} \sim 10^{-3}$  торр

$f \sim 6000 - 1800$  об/мин

$S_{\text{ф.н.}} \sim 1/20 - 1/50 S_{\text{НТМН}}$

ТМН -100; 200; 500; 5000.

Отметим, что форвакуумный насос должен обеспечивать режим с молекулярной вязкостью, т.е. молекулярный режим течения газа  $\lambda \gg d$ .

Разработали ТМН  $S_n \sim 4000$  л/сек,  $p_{\text{np}} \sim 10^{-11}$  торр

Разгонка  $\sim 15$  мин, быстро останавливается, безмасляная откачка («чистый вакуум»).

Недостаток – сложная система подвесок. Магнитные подвески.

### Правила эксплуатации ТМН

1. Размещать на фундаменте и массивном основании.
2. Строго вертикально - горизонтально.
3. Сильфонный переход от форвакуумного насоса – вибрация.
4. Если с завода, то испытания не проводить.
5. Залить масло в систему смазки подшипников.

6. Установить правильность направления вращения (на атмосфере кратковременное включение).
7. Вода.

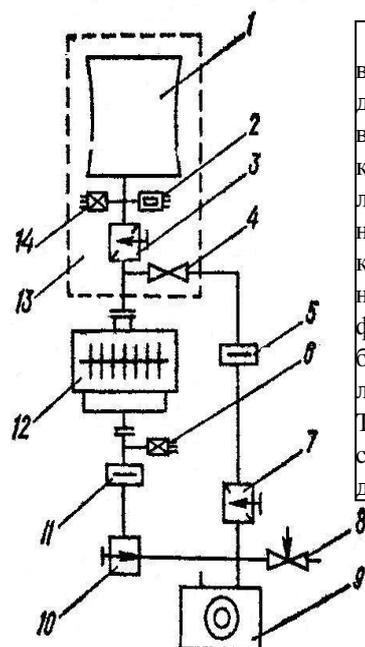


Схема подключения ТМН.

- вакуумная камера;
- датчик вакуума 1;
- высоковакуумный вентиль;
- клапан 1;
- ловушка;
- напуск воздуха в ТМН;
- клапан 2;
- напуск воздуха в форлинию;
- форвакуумный насос;
- байпасный клапан;
- ловушка;
- ТМН;
- система нагрева камеры;
- датчик вакуума 2.

Включить тогда, когда  $p \sim 10^{-2}$  мм рт.ст.

Прогрев при первом запуске и по мере необходимости.

Выключение

Выключить электродвигатель и напустить воздух через специальный клапан.

Не качать фор. вак. До его предельного вакуума (масло), особенно не включенный.

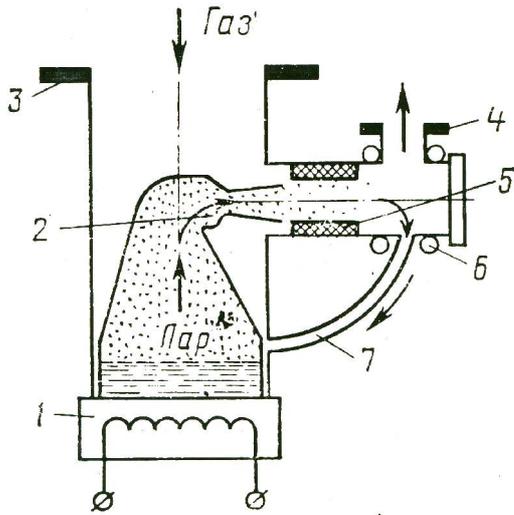
Обязательно сетка, хотя и зарезает скорость откачки на 25%, но безопасность.

Периодически следить за уровнем масла и шумом при работе

Если не напускать атмосферу, то после выключения перекрыть фор. вак.

Прорыв атмосферы недопустим.

## Пароструйные насосы

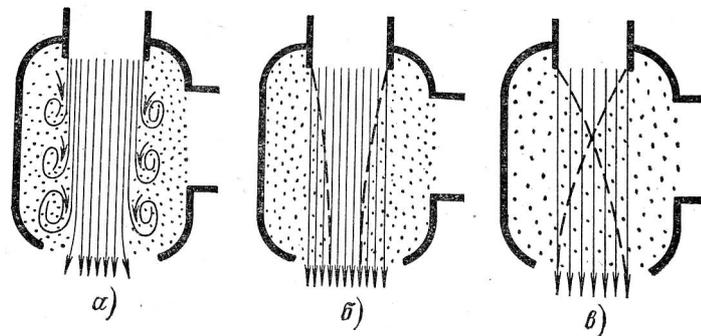


Источником пара является жидкость, залитая в сосуд с кипятильником. Кипятильник – спираль, нагреваемая током. Кипятильник нагревает жидкость, она кипит, образуется пар, который по трубопроводу – паропроводу поступает в сопло Лавала, из которого с большой скоростью истекает в рабочую камеру. Газ, который поступает в рабочую камеру через «вход», увлекается струей пара и движется вместе с ней.

Пар, проходя через рабочую камеру, благодаря наличию охладителя (вода), конденсируется и стекает по трубке обратно в сосуд. А газ, подойдя к «выходу», откачивается фор. насосом. «Вход» – входной клапан, «выход» – выпускной

клапан. Видно, что все зависит от режима течения струи пара. В зависимости от области давлений, различают 3 вида пароструйных насосов, которые отличаются механизмом увлечения газа и конструкцией.

1. Эжекторные насосы –  $760 - 10^2$  торр
2. Бустерные насосы –  $10^1 - 10^4$  торр
3. Диффузионные насосы – ниже  $10^4$  торр



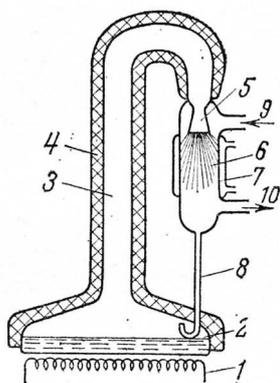
На рисунках изображены три способа увлечения газа струей пара. Рис.а. В области высоких давлений  $760 - 10^2$  торр струя пара должна иметь большую плотность и в зависимости режим ее истечения может быть турбулентным или вязкостным (поведение пара определяется взаимными столкновениями молекул, пар ведет себя как сплошная среда, обладающая инерцией – вязкостью).

При турбулентной струе увлечение газа происходит в основном благодаря перемешиванию газа с вихреобразно движущейся массой струи, происходит также вязкостное (за счет трения граничных слоев) увлечение и некоторая диффузия газа в струю. Два последних механизма малы. Турбулентный режим течения газа.

Рис.б. По мере уменьшения расхода пара, при давлениях  $10^1 - 10^4$  торр, роль вязкостного захвата увеличивается, турбулентный механизм падает и, наконец, при ламинарной струе захват газа осуществляется, в основном, вязкостным механизмом и частично за счет диффузии. Вязкостной режим течения газа.

**Рис.в.** Наконiec, при низких давлениях, когда  $\lambda > l$ ,  $p \leq 10^{-4}$  торр, вязкостное взаимодействие практически исчезает, и возобладает диффузия. Молекулы газа за счет столкновения с молекулами пара приобретают импульс в нужном направлении. Как видно, все определяется режимом течения струи пара. Однако, и конструкцией сопла (насоса), и характеристиками рабочей жидкости. Молекулярный режим.

### Эжекторные насосы



Состав эжекторного насоса:

1. Кипятильник,
2. Сверхзвуковое сопло Лавала,
- 3.,
- 4.,
5. Камера смешивания,
6. Струя пара,
7. Холодильник,
8. Трубка циркуляции масла,
9. Впускной клапан,
10. Выпускной клапан.

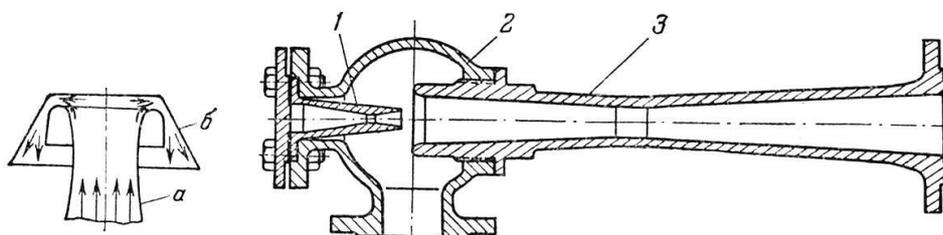
Пар рабочей жидкости выходит из сопла с достаточно большой скоростью. До сужения пар имеет большое давление и малую скорость. После сужения – большую скорость и малое давление (закон сохранения энергии). После сужения давление пара падает, но зато растет скорость в нужном направлении. Соприкасаясь с газом в камере смешения, пар захватывает газ, отдает ему часть кинетической энергии и уходит из камеры, попадая на стенки холодильника, конденсируется и через трубку возвращается в сосуд. Молекулы газа удаляются фор. насосом.

Эжекторные насосы не предназначены для присоединения непосредственно к вакуумному объему, а служат промежуточным звеном между высоковакуумной и форвакуумной ступенями вакуумной системы. Быстрота действия эжекторных насосов максимальна в той области давлений, где быстрота действия вращательных масляных насосов недостаточна, вследствие близости к их предельному давлению.

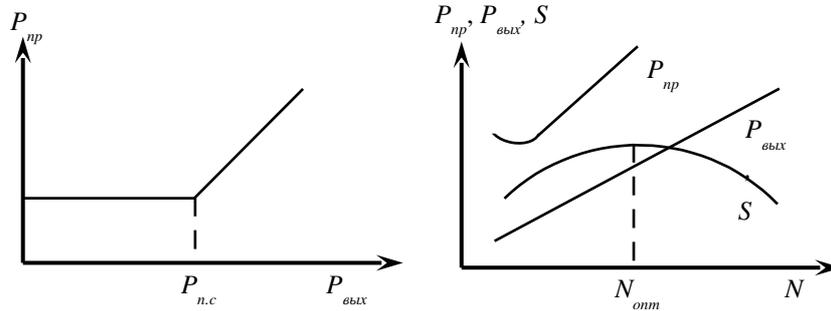
### Бустерные (вспомогательные) насосы

Бустерные насосы используются для откачки больших количеств газа при давлениях на впуске  $10^{-1} - 10^{-4}$  торр и сравнительно высоких выпускных давлениях (~ мм рт.ст). Поскольку в рабочей области давлений бустерных насосов режим течения газа меняется от вязкостного до молекулярного, используется обращенное сопло зонтичного типа.

Обычно, последней ступенью у бустерного насоса служит эжекторный насос.



Предельное давление бустерного насоса при низких  $p_{\text{вых}}$  слабо зависит от  $p_{\text{вых}}$ . По мере приближения  $p_{\text{вых}}$  к  $p_{\text{пар. струи}}$  происходит срыв работы насоса. В этом случае фор. вакуумный насос не успевает удалить поток газа из бустерного (или диффузионного) насоса и насос «захлебывается».



При увеличении мощности нагревателя  $N$  за счет увеличения скорости струи быстрота действия насоса сначала растет, а потом падает ( $\text{max}$  при  $N_{\text{омт}}$ ), за счет увеличения плотности струи паровой и невозможности частицам газа диффундировать в него.

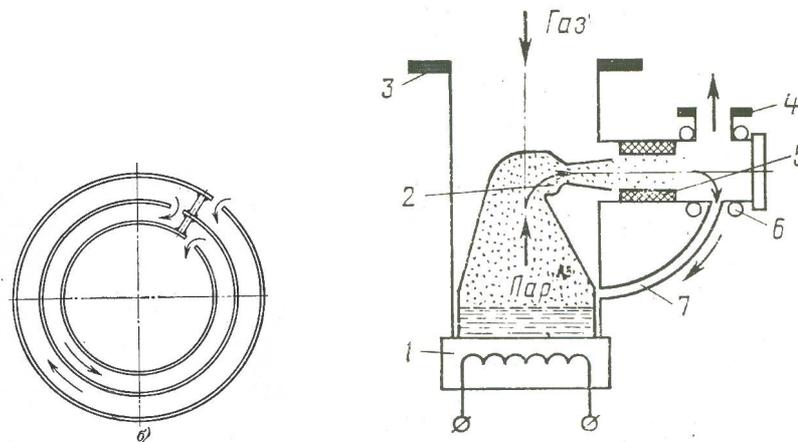
Делают двухступенчатые бустерные насосы: 2 диффузионные ступени и последняя эжекторная.

## Диффузионные насосы

Отличительной особенностью диффузионных насосов есть постоянство их скорости в рабочем диапазоне давлений, что обусловлено сохранением молекулярного режима течения жидкости в районе 1-го сопла. Конструктивно очень похожи на бустерные насосы, но  $p_{\text{вып}} \sim 0,1 - 0,3 \text{ мм рт.ст.}$ . У них меньше мощность подогревателя и меньше  $p_{\text{пар.струи}}$

Если в качестве рабочей жидкости используется ртуть, то , мощности подогревателя, выпускным давлением, наличием эжекторной ступени. А если масло, то к конструкции предусмотрены фракционные кольца, обеспечивающие фракционирование (разделение) масла на легкие и тяжелые фракции. Тяжелые фракции направляются в сопло 1-ой ступени – предельный вакуум, а легкие – в сопло последней – дают  $p_{\text{вып}}$ , и скорость откачки. Это разгоночные или фракционирующие насосы.

Для улучшения предельного вакуума нижняя часть насоса не охлаждается –



происходит дополнительное обезгаживание масла. Фракционирование масла, стекающего в кипятильник с периферии по стенкам корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец, удлиняющих путь масла до поступления в центральную зону кипятильника, а оттуда в высоковакуумную ступень насоса. Таким образом, легкие фракции масла испаряются раньше, чем дойдут до центра и, попав во 2-ю или 3-ю ступень, удаляются в эжекторную ступень – эжекторное сопло. Т.е. 1-ая ступень – это диффузионный режим, 2-я и 3-я – бустерный режим. Т.е. современный паромасляный насос – это система из паромасляных диффузионного, бустерного и эжекторного насосов.

### Свойства рабочих жидкостей

1. Низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре, в противном случае невозможно получение низких остаточных давлений при комнатной температуре (без азота).
2. Высокое давление пара при рабочей температуре испарителя, что обеспечивает работу насоса при относительно больших выпускных давлениях.
3. Однородность состава (изменение состава влечет за собой изменение свойств масла).
4. Термическая стабильность при рабочей температуре испарителя (не окисляется при рабочей температуре испарителя).
5. Отсутствие химической активности, не токсичность, не взаимодействие с конструктивными материалами насоса.
6. Малая удельная теплота парообразования (малая мощность нагревателя).

7. Малая способность к растворению газа.

Ртуть удовлетворяет почти всем требованиям, но токсична и  $p_{нас} \sim 10^{-3} \text{ торр}$  при  $t^{\circ}C=20$  (азотная ловушка). Уже практически не используется.

Масла  $p_{нас} \sim 10^{-6} \text{ торр}$  и ниже, не токсичны, химически инертны, термостабильны, но окисляются при  $p=p_{атм}$ .

а) Минеральные масла  $p \sim 10^{-7}$ , на  $p_{атм}$  – выход из строя. ВМ-1, ВМ-5.

б) Эфиры – продукты синтеза фталевой и себаценовой кислот со спиртами, а также полифениловые соединения.  $p \sim 10^{-8}$ . ПФЭ, ОФ и ОС.

ВМ-3 – бустерное масло.

в) Кремнийорганические масла  $p \sim 10^{-4}$ . Это сложные соединения, состоящие из чередующихся атомов кремния и кислорода.  $(CH_3)_2SiO$ .

ПЭС-В-1, ПЭС-В-2, ФМ-1.

Это полисилоксановые полимерные соединения.

ВМ-1, ВМ-2  $\rightarrow 10^{-8}-10^{-9}$

ВМ-3  $\rightarrow 10^{-4}-10^{-5}$

ВМ-4 – механические насосы -  $10^{-5}$

ВМ-5 – диффузионный насос

ВМ-7 – диффузионный насос

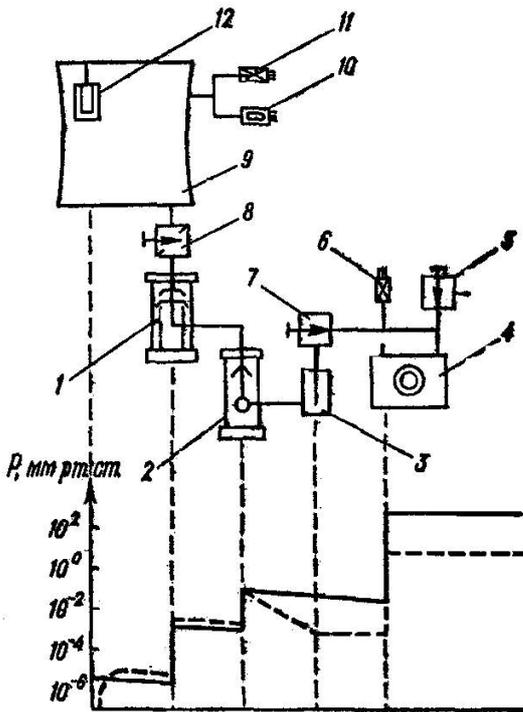
ВМ-6 – механический насос

Г – бустерное масло

ТМ-1 – турбомолекулярный насос

ПЭС-В-1, ПЭС-В-2 – диффузионные насосы – кремний органические

## Эксплуатация паромасляных насосов



Надежен и прост в работе. С завода – закрытые и с маслом. Осмотр, протирка от возможной грязи (бензином, ацетоном). Откачивают фор. насосом и судят о герметичности. Вода и нагреватель. Давление повышается. Сам на себя ~ 4-8 часов – обезгаживание. Сутки. Измеряют вакуум над насосом. Нормальный насос через 1...3 суток должен обеспечить предельный вакуум. Важна температура охлаждения  $t^{\circ}C \sim 20^{\circ}C$ . Если  $40^{\circ}C$  – это уже недопустимо (максимум  $30^{\circ}C - 35^{\circ}C$ ). Температура внутри на  $0,3^{\circ}C - 0,5^{\circ}C$  выше, если рубашка, и на  $0,5^{\circ}C - 0,7^{\circ}C$ , если трубка. Подача воды сверху насоса. В эксплуатации – пробки. ← Большой напор навстречу. Выбор фор. насоса.

Разрежения – фор. насос – должен уверенно справляться с потоком газа из диффузионного насоса

$$S_n'' P_{вн}'' > S_n' P_{выт}'$$

$S_n''$  и  $p_{вн}''$  – впускное давление и быстрота фор. насоса,

$S_n'$  и  $p_{выт}'$  – выпускное давление и быстрота диф. насоса.

Причем  $p_{вн}'' \leq p_{выт}'$ .

### Серия Н

<i>H-0,15C</i>	15 л/сек	$p_{пред} \sim 2 \cdot 10^{-6}$ ;	0,2 кВт		
	<i>BM-1</i> ; 0,035 л к-во масла		$S_{ф.н.} \sim 0,04$ л/сек		
<i>H-1C-2</i>	100 л/сек;	<i>BM-1</i> ;	0,5 кВт;	0,1 л;	$S_{ф.н.} \sim 0,4$ л/сек
<i>H-5C-M</i>	500 л/сек;	<i>BM-5</i> ;	0,7 кВт;	0,5 л;	$S_{ф.н.} \sim 2$ л/сек
<i>H-2T-3</i>	1500 л/сек;	<i>BM-1</i> ;	1,7 кВт;	1,1 л;	$S_{ф.н.} \sim 3$ л/сек
<i>H-8T-M</i>	7500 л/сек;	<i>BM-1</i> ;	3,5 кВт;	4 л;	$S_{ф.н.} \sim 12$ л/сек
<i>H-40T</i>	30000 л/сек;	<i>BM-1</i> ;	8,5 кВт;	20 л;	$S_{ф.н.} \sim 30$ л/сек

### Другая серия

<i>НВДМ-100</i>	340 л/сек;	7-11 мин;	0,5 кВт;	0,07 л	} $P_{выт} \sim 0,2$ Вт
<i>НВДМ-160</i>	700 л/сек;	10-17 мин;	0,8 кВт;	0,3 л	
<i>НВДМ-250</i>	2350 л/сек;	8-13 мин;	2 кВт;	0,55 л	
<i>НВДМ-400</i>	5900 л/сек;	8-15 мин;	4 кВт;	1,4 л	
<i>НВДМ-100</i>	16250 л/сек;	10-20 мин;	9 кВт;	5 л	
	$p_{пред} \sim 10^{-7}$ тор		от $10^{-3} - 10^{-7}$		

## Параметры пароструйных насосов

Полное предельное давление пароструйных насосов складывается из парциального давления остаточных газов и парциального давления паров рабочей жидкости

$$P_{np} = P_{ост} + P_{p.ж.}$$

Если нет натекания и газовой выделения, а также выделения газа из рабочей жидкости, то  $p_{np}$  определяется равновесием между поступлением газа из рабочего объема и обратным потоком, обусловленным диффузией газа в струю пара (в систему) с выпускной стороны насоса, т.е. чем ниже  $p_{вып}$ , тем ниже  $p_{np}$ . Т.е. пока выпускное давление достаточно низкое,  $p_{np}$  от него практически не зависит. Если  $p_{вып}$  больше некоего  $p_{np}$ , то насос перестает работать, происходит срыв струи (большой напуск, например).

Давление паров рабочей жидкости определяется потоком паров. А этот поток определяют:

1. молекулы, которые испаряются со стенок холодильника, они дают  $P \cong P_{нас. раб. жидкости}$ ;
  2. молекулы, вылетевшие из струи пара при выходе из верхнего сопла;
  3. молекулы, которые испаряются из горячих деталей насоса, на которых накапливается пленка рабочей жидкости;
  4. молекулы легколетучих фракций, которые возникают в результате крекинга (разложения) масла.
- (2-4) – создано  $p_{нар} > p_{нас}$ . Необходимы способы для уменьшения этих эффектов.

### Определение скорости откачки пароструйных насосов

Вспомним формулы  $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$  – средняя кинетическая энергия  $\sim T$ .

Наиболее вероятная скорость теплового движения

$$v_g = 129 \sqrt{\frac{T}{M}} [м/сек].$$

Средняя квадратичная скорость молекулы

$$v = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}} \text{ для опр. энергии.}$$

$$v = 1,224 v_g = 158 \sqrt{\frac{T}{M}} [м/сек]$$

Средняя арифметическая скорость молекулы

$$v_a = 1,128 v_g = 145,51 \sqrt{\frac{T}{M}} [м/сек].$$

Важная величина – это количество молекул, ударяющихся в единицу времени в единицу площади стенки сосуда

$$N_q = \frac{N_1 \cdot v_a}{4},$$

где  $v_a$  – скорость теплового движения,

$N_1$  – молекулярная концентрация.

Для практических целей важно знать объем газа, приходящийся на  $N_q$

$$V_q = \frac{N_a}{N_1} = \frac{v_a}{4} = 36,38 \sqrt{\frac{T}{M}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} \right].$$

$A$  – это площадь, в которую ударяются молекулы  $[\text{м}^2]$ .

$$V_A = 36,38 \sqrt{\frac{T}{V}} \cdot A \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} \right].$$

Объем газа, который ударяется о площадь, не зависит от давления.

Перейдем к пароструйным насосам.

$A$  – это площадь кольцевого зазора, через который проходят молекулы.

Полные потоки (газов и паров) через кольцевой зазор (впускной клапан) сверху и снизу соответственно равны

$$Q_{\text{вн}} = p_{\text{вн}} \cdot V_A; \quad Q_{\text{обр}} = p_{\text{обр}} \cdot V_A,$$

$p_{\text{вн}}$  – давление над кольцом,  $p_{\text{обр}}$  – над кольцом.

$$Q_{\text{раз}} = Q_{\text{вн}} - Q_{\text{обр}} = V_A (p_{\text{вн}} - p_{\text{обр}})$$

$$S_H = \frac{Q_{\text{раз}}}{p_{\text{вн}}} = V_A \left( 1 - \frac{p_{\text{обр}}}{p_{\text{вн}}} \right)$$

$$S_H = 36,38 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \left( 1 - \frac{p_{\text{обр}}}{p_{\text{вн}}} \right) = 3,638 \cdot 10^4 A \sqrt{\frac{T}{M}} \left( 1 - \frac{p_{\text{обр}}}{p_{\text{вн}}} \right) \text{л/сек} \quad (A \text{ в } \text{м}^2).$$

Если  $A$  в  $\text{см}^2$ :

$$S_H = 3,638 \cdot A \sqrt{\frac{T}{M}} \left( 1 - \frac{p_{\text{обр}}}{p_{\text{вн}}} \right) \text{л/сек}.$$

При  $p_{\text{обр}} \ll 1$

$$S_H = 3,638 \cdot A \sqrt{\frac{T}{M}} \text{м}^3 / \text{сек}.$$

$S \sim \sqrt{\frac{T}{M}}$ , т.е. легкие газы пароструйный насос откачивает быстрее, чем тяжелые, у ТМН

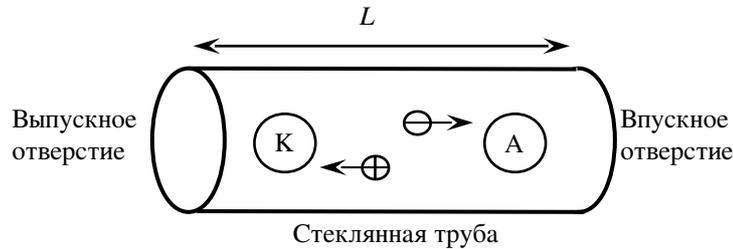
– наоборот.

$S$  – не зависит от давления.

## Ионные насосы

В основе работы ионных насосов лежит ударная ионизация поступающего газа и придание образующимся ионам направленного движения в сторону выпускного отверстия. Аналогично пароструйным и турбомолекулярным насосам, ионные насосы тоже требуют создания предварительного вакуума (механические или пароструйные).

Одной из отличительных особенностей ионных насосов является отсутствие



какой-либо рабочей жидкости. После снижения давления до некоторого, между электродами, вследствие ударной ионизации электронами, возникают положительные ионы, которые двигаются к катоду, отдавая свой заряд катоду и превращаясь в нейтральные молекулы, они удаляются механическим (например) насосом.

Благодаря непрерывному движению ионов и их подходу к катоду, возникает перепад давлений и происходит откачка. Эффективность этих ионов очень мала. Стекло заряжается отрицательно, и ионы идут на стенки.

$$p_1 \cdot S_H = Q_i - Q_M,$$

$Q_i$  – поток ионов;  $Q_M$  – обратный поток молекул вследствие диффузии. Если  $Q_i > Q_M$  – будет откачка.

Можно показать, что:

$$Q_M = 12,13 \cdot 10^4 \cdot \frac{d^3}{L} (p_1 - p_2),$$

$$Q_i = 350 I_e \cdot L (p_1 + p_2).$$

$d, L$  – измеряется в метрах,  $p$  – в торр,  $I_e$  – в амперах.

$$p_1 S_H = 350 I_e L (p_1 + p_2) - 12,15 \cdot 10^4 \frac{d^3}{L} (p_2 - p_1)$$

Определим  $p_1$ .

Считаем  $p_1 = p_{np}$ , т.е.  $S_H = 0$ . Тогда:

$$p = p_2 \frac{(12,15 \cdot 10^2 \cdot d^3 - 3,5 I_e \cdot L^2)}{12,15 \cdot 10^2 \cdot d^3 + 3,5 I_e \cdot L^2}.$$

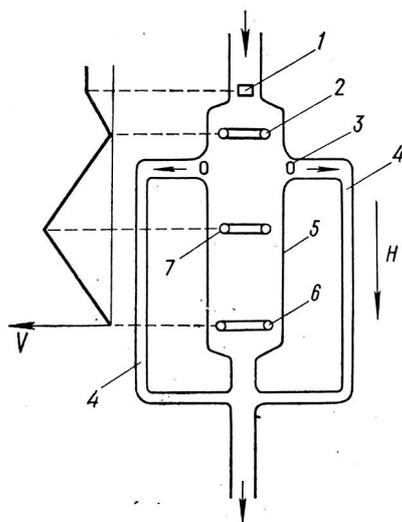
Из этого можно получить, чтобы  $p_{np} < p_1$  – давление фороткачки.

$$I_e \approx 3,2 \cdot 10^2 \frac{d^2}{L^2} \text{ (A)}$$

$$S_H = 350 I_e \cdot L \left( 1 + \frac{p_2}{p_1} \right) - 12,15 \cdot 10^4 \frac{d^3}{L} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right).$$

Видно, что все зависит от  $I_e$ , т.е. чтобы увеличить  $S_H$ , надо увеличить  $I_e$ , т.е. количество электронов.

## Разряд Пеннинга

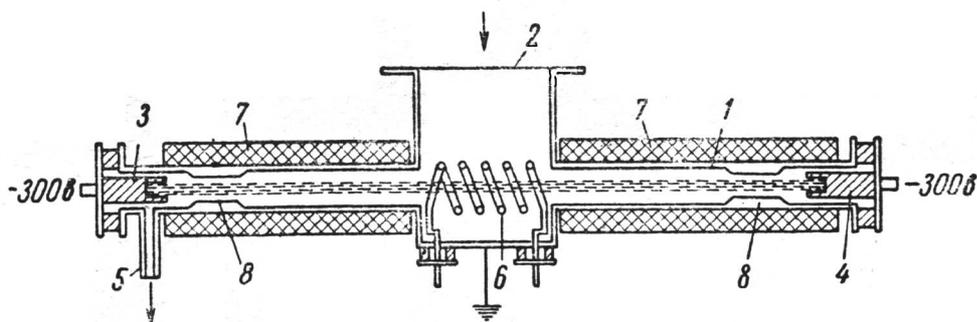


Ионный насос на основе разряда Пеннинга состоит из стеклянной разрядной трубки 5, содержащей накаливаемый вольфрамовый катод 6, анод 7 и отражательный электрод 2, потенциал которого равен потенциалу катода. Вблизи отражателя 2 имеются четыре кольцевых электрода 3, вытягивающих ионы из верхней части разрядного промежутка, которые после нейтрализации направляются по отводным трубкам 4 в сторону форвакуума. Для предотвращения движения ионов в сторону откачиваемого объема во входном патрубке помещается кольцо 1 с положительным, по отношению к катоду, потенциалом.

$$S_n \leq 10 \text{ л/сек} \quad p_{np} \sim 10^{-6} \text{ торр}$$

## Металлические ионные насосы

В трубке 1 два вольфрамовых полых катода, один из которых накаливаемый. Входной патрубков 2, выходной 5. Катод 3 – накаливаемый, катод 4 – холодный – отражатель. Газ поступает из патрубка 2. 7- соленоиды; 6 – внутренний соленоид.



Если не включать Н-поле, то электроны будут колебаться между катодами, ионизовать газ. Рано или поздно электрон попадет на стенку, но его убыль пополняется горячим катодом (эмиссией). Включив магнитное поле, мы значительно увеличим ионизацию, за счет винтовых движений. Соленоид 6 служит для увеличения ионизации в центральной зоне разряда.

По мере откачки может оказаться, что давление понизится настолько, что может оказаться недостаточно количества газ для поддержания плотности ионов на оптимальном уровне, чтобы сохранялся достаточный электронный ток разряда. В этом случае предусмотрен напуск газа в область катода. И чтобы не ухудшать вакуум, сужение трубок на концах, которые препятствуют диффузии нейтрального газа внутрь разряда. Сужения выбираются таким образом, чтобы  $\varnothing = \varnothing$  плазменного шнура.

$$S_n \text{ до } 7000 \text{ л/сек} \quad p_{np} \sim 10^{-7} \text{ мм рт.ст.}, \\ \text{если } p \sim 10^{-4} \quad N \sim 40 \text{ кВт} \quad \text{размер} \sim 2,75 \text{ метра.}$$

## Насосы, использующие физико-химическое связывание газов

### Поглощение и выделение газов твердыми телами

При соприкосновении газов с твердыми телами может происходить 2 эффекта – это поглощение газа и выделение газа. Поглощение газа можно использовать для откачки; выделение – для обезгаживания.

Следует выделить два вида поглощения газа:

- **адсорбция** – это поглощение газа твердым телом, вследствие его удержания на поверхности;
- **абсорбция** – это поглощение газа твердым телом, вследствие его диффузии внутри твердого тела. Адсорбция бывает физической и химической.

Все вещества состоят из атомов, а они из ионов, электронов.

С приближением к поверхности твердого тела на расстояние  $\sim 10^{-8}$  см (атомный размер), молекула газа попадает под действие электрических полей поверхности твердого тела и при этом поляризуется.

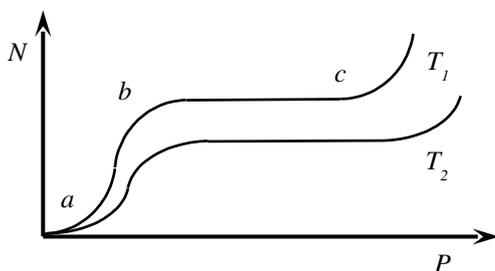
*Физическая адсорбция* – это удержание молекул газа электрическим полем поверхности.

Количество адсорбированного газа зависит от площади (чем больше площадь, тем лучше). Высокой адсорбционной способностью обладают твердые тела с шероховатой поверхностью, порошки, пористые вещества. Адсорбированные молекулы газа принимают участие в тепловом движении молекул твердого тела и, при достаточно большой температуре, могут ее покинуть. Т.е. для повышения адсорбционной способности, надо понижать температуру твердого тела.

$$T_2 > T_1$$

При больших температурах количество адсорб. газа меньше.

*ab* – не все центры адсорбции заняты;



*bc* – все центры заняты одномолекулярным слоем;

*c* – и далее при больших давлениях, если газ при соприкосновении с твердым телом охлаждается (конденсируется) –  
многомолекулярный слой.

Если в адсорбции участвует пористое тело, то при низких давлениях может возникнуть многомолекулярный слой, чему способствуют капиллярные силы

– капиллярная адсорбция. Правда, и это возможно при достаточно низких температурах.

*Химическая адсорбция* – хемосорбция. То же что и физическая, однако, при этом происходит не только поляризация молекулы, но и диссоциация молекулы, перераспределение электронов, химическая реакция. Вообще отличить хемосорбцию от физической адсорбции трудно.

*Абсорбция* – двух видов: это образование твердых растворов и химические реакции между газом и твердым телом.

Твердый раствор образуется путем диффузии газа внутри твердого тела. Молекулы газа располагаются между ионами решетки твердого тела.  $\sim p$ ; если молекулы диссоциируют  $\sim \sqrt{p}$ .

Абсорбция с химической реакцией – это образование нового вещества в твердом виде  $\sim T \sim p$ . С точки зрения удержания газа абсорбция эффективней адсорбции. Удалить газ можно только высокими температурами и достаточно низкими давлениями.

## Факторы, способствующие поглощению газов твердым телом

Поверхность, температура и давление.

Если какое-либо тело подвергается испарению в вакууме, то будучи в парообразном состоянии оно становится очень эффективным поглотителем. Образующаяся на стенках свежий, чистый слой вещества – активный поглотитель (особенно, если его возобновлять). Если в каком-либо приборе металлическая деталь нагревается до температуры испарения, то вакуум улучшается.

### Поглощение газов материалами

#### 1. Стекло.

Стекло обладает довольно слабой адсорбционной способностью (физическая адсорбция гладкой поверхности). Важнейшая особенность стекла – это его гигроскопичность, т.е. способность поглощать пар на поверхности в большом количестве. Водяной пар вступает в химическую реакцию с компонентами стекла, образует новые соединения, которые, в свою очередь, могут поглотить пар. Кроме этого, в стекле есть растворенные в нем водород, кислород и азот, которые попали в него в процессе изготовления (сильные сорбенты).

#### 2. Металлы.

*Водород* – химические реакции: образование твердых растворов (водородная болезнь).

*Кислород* – химические реакции: окисление даже при комнатной температуре (охрупчение).

*Азот* – химические реакции: образование нитридов.

*Водяной пар* – физическая адсорбция на поверхности, химические реакции (у некоторых).

### Обезгаживание стекла

Гигроскопично,  $CO_2$ , внутри  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ .  $T_M \approx 400-500^\circ C$ . Обычно греют до  $350^\circ C$  (см. в справочнике для стекол). При повышении температуры в основном десорбируют  $H_2O$  и  $CO_2$  с поверхности. Кривая растет и потом падает. *Max* при  $T_1 \approx 300^\circ C$ .

При достижении  $T_M$  выделение газов и паров с поверхности прекращается, а выделение изнутри еще не наступило. Дальнейшее повышение температуры приводит к росту газовой выделению изнутри стекла, при этом нарушается структура стекла. В справочнике указывается  $T_M$ . Нагрев до нее, удаляем все с поверхности. Эта температура должна быть выше, чем рабочая температура стекла. На практике греют до  $T_M + 50^\circ C$ , выдерживают при такой температуре, затем снижают до  $T_M$ , опять выдерживают в вакууме, охлаждают в вакууме. Длительный перегрев при  $T > T_M$  приведет к газовой выделению изнутри стекла и разрушению стекла. При нагреве стекла надо помнить, что высокие температуры больше вредят. Для контроля температуры используют термопары, термометры, карандаши, краски ( $65-450^\circ C$ )

### Обезгаживание кварцевого стекла

$T_M \sim 1000^\circ C$ . Пористое, поглощает большое количество газа. Надо прогревать. Помнить, что кварцевое стекло пропускает:

$T > 180^\circ C$  – He;

$T > 300^\circ C$  –  $H_2$ ;

$T > 900-1000^\circ C$  –  $N_2$ ,  $O_2$ , Ne, Ar.

### Обезгаживание керамики

Пористая, хорошо поглощает газы. Обезгаживают при температуре спекания. При температуре 600...650°C выделяются  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ .

### Обезгаживание металлов

В состав металлов газы попадают в процессе изготовления (химические реакции и твердые растворы) и частично при хранении. Для ускорения обезгаживания обычно прогревают при высоких температурах  $T < T_{\text{плав}}$ . До плавления не доводить, но температура обезгаживания должна быть больше рабочей температуры. Время обезгаживания определяется по формулам:

$$t = 100 \cdot a^2 t_{0,1 \text{ мм}},$$

где  $a$  – толщина металла,

$t_{0,1}$  – справочная величина для жести толщиной 0,1 мм.

$$t_{\text{пров}} = \frac{3}{8} \cdot t_{0,1 \text{ мм}}$$

$N_i - T \sim 1000^\circ\text{C}$ ;  $M_0 \sim 1800^\circ\text{C}$ ;  $W \sim 300^\circ\text{C}$ ;  $Сu \sim 700^\circ\text{C}$ ;  $Au \sim 600^\circ\text{C}$ ;  $T_i \sim 100^\circ\text{C}$ ; *графит*  $\sim 1000^\circ\text{C}$ .

Ответственные детали обезгаживают в 2 этапа – предварительная (до сборки), окончательная – в вакууме при откачке.

*Предварительная*: специальные вакуумные печи с нихромовыми нагревателями  $\sim 950-1000^\circ\text{C}$ ,  $t \sim 24$  часов, для большинства металлов этого достаточно. Для тугоплавких металлов  $T \sim 1800^\circ\text{C}$ . Внутри стойки, на ней танталовый цилиндр и внутри детали.  $f \sim 10^4 - 10^6$  Гц;  $\sim 10$  кВт. Греют, потом остывает и в работу.

*Окончательная*: обезгаживание в процессе откачки.

1. Пропускание тока через деталь – катод, нити накала.  $T > T_{\text{раб}}$ .
2. Прокаливание токами высокой частоты (то же что и предварительная).
3. Прокаливание электронной бомбардировкой.

Накаливают спираль  $\rightarrow$  электроны + на деталь. Следить, чтобы не было дуги.

#### Общие правила:

1. Температуру повышать постепенно.
2. Доводить до максимальной температуры, но учитывать то, что рядом.
3. Делать перерывы для удаления газа.

Используют ионную бомбардировку. Инертный газ – Ar.  $p \sim 20 - 30$  мм рт.ст. Зажигается разряд. Большие напряжения: для электронов  $\sim 10$  кВ, ионов  $\sim 500$  В.

## Насосы, работающие на физико-химическом связывании газов.

Эти насосы можно подразделить на *сорбционные*, в которых используются различные виды поглощения газов. И *конденсационные* (криогенные), в основу работы которых положена конденсация газов на охлажденных до низких температур поверхностях. Сорбционные насосы, в которых для усиления поглощения используется ионизация газов – ионно-сорбционные, гетероионные. Сорбционные насосы, в которых в качестве поглотителя используется вещество, способное эффективно поглощать газы путем чисто физической адсорбции (цеолиты, активированный уголь) – адсорбционные. Конденсационные – различаются по роду используемых сжиженных газов, которые применяются для охлаждения поверхности – водородные, гелиевые, азотные.

### Ионно-сорбционный насос

Катод – вольфрам с навивкой титановой проволокой. Титан испаряется, оседает на стекло и эффективно поглощает газ. А сверху новый слой и т.д. Благодаря наличию ионизирующего устройства ионизируются и инертные газы и эффективно поглощаются. Особенно хорошо  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ , но и  $Ar$  (1% в воздухе).

Начальное давление  $p \sim 10^4$ , а  $p_{пред} \sim 10^{-9}$ .

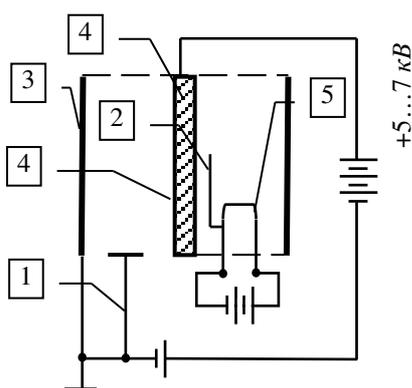
$S_n \sim 10$  л/сек ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ )

$S_n \sim 0,1$  л/сек ( $Ar$ )

Необходимо создать предварительное разрежение  $p_n \sim 10^{-4}$ . После достижения этого давления насос предварительного разрежения отключается, и насос качает сам на себя.

Для возобновления отрезают катод с титаном и приваривают новый.  $p_n \sim 10^{-4}$  нужно для того, чтобы не образовывались нитриды, карбиды и длина свободного пробега. Образование нитридов и карбидов ухудшает испарение  $Ti$ , т.е. ухудшает скорость откачки.  $S_n$  зависит от скорости испарения  $Ti$ .

### Орбитроны



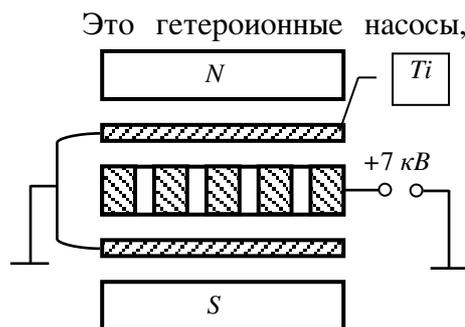
Это разновидность ионно-сорбционного насоса.

1. Корпус.
2. Специальный электрод
3. Коллектор ионов.
4.  $Ti$  – испаряемый анод.
5. Накапливаемый катод.

Электроны, эмитируемые накаливаемым катодом 5 под действием положительного потенциала анода 4, направляются в пространство между анодом 4 и коллектором ионов 3. одновременно под действием отрицательного потенциала специального электрода 2 им передается скорость по окружности. Увеличивается путь и, следовательно, ионизация. Положительные ионы, образовавшиеся в результате ионизации, внедряются в коллектор ионов и корпус насоса. Одновременно с анода, разогретого электронной бомбардировкой до температуры испарения  $Ti$ , испаряется активный материал  $Ti$ , и он осаждается на коллекторе и корпусе насоса. И это обеспечивает хемосорбированное поглощение молекул газа.

Основные недостатки этих двух насосов – наличие накаливаемого катода.

## Магниторазрядные насосы



Это гетероионные насосы, ионно-сорбционные насосы. В этих насосах для распыления геттера, а также для ионизации газов используется высоковакуумный разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Каждое отверстие в аноде, вместе с противоположными участками катодов образуют разрядную ячейку. После приложения напряжения возникает разряд. Электроны в ловушке. Колеблются. Ионизируют газ. Образовавшиеся ионы, бомбардируя титановые катоды, распыляют  $Ti$  – нейтральные молекулы и атомы. Эти распыленные частицы оседают на все поверхности. В основном на анод. Газы, химически активные, попадают на чистую титановую пленку, хемосорбируют на ней.

Катоды тоже поглощают газ. Но т.к. они все время распыляются, то их вклад в откачку мал. Основной механизм откачки активных газов – это их хемосорбция пленкой  $Ti$  на аноде.

Наряду с этим, в магниторазрядных насосах имеет место проникновение ионов газа внутрь материала катода. (Это справедливо для легких газов  $H_2$  и  $He$ . Если качать только  $H_2$  и  $He$ , то проникновение  $H_2$  и  $He$  внутрь материала катода – основной механизм). Водород, взаимодействуя с  $Ti$ , образует  $TiH$  – это большая молекула по сравнению с  $H$ , и может быть деформация катода – блистер эффект.

Распыление  $Ti$  атомами  $H^+$  и  $He^+$  - мало (легкие), поэтому хемосорбция  $H_2$  и  $He$  слабо выражена. Если эти газы качаются вместе с другими, то хемосорбция тоже играет заметную роль.

Откачка тяжелых инертных газов осуществляется в основном катодами. Диффузия внутри  $Ti$  (катодов) отсутствует (большие). Они адсорбируются на поверхности. Но катоды все время распыляются, и аргон освобождается. Аргон остается только на нераспыляющихся участках катодов. И на пленке. И замуровывается в ней. *Это основной механизм откачки инертных газов.*

Поскольку масса, химическая активность и скорости распыления  $Ti$  различны для различных газов, то и скорости откачки различны.

Газ	Скорость откачки	Газ	Скорость откачки	Газ	Скорость откачки
$H_2$	250-350%	воздух	100%	$CO_2$	85%
$CH_4$	300%	$N_2$	100%	$He$	10-20%
Пар $H_2O$	130%	$O_2$	85%	$Ar, Kr, Ne$	1-4%

## Триодные насосы

Катоды в триодном насосе имеют ячеистую, ребристую структуру, в силу чего положительные ионы бомбардируют их не только под прямым углом и на поверхности, но и под разными углами и внутри катодов-ячеек. Эффективность распыления резко возрастает. Ионы проходя сквозь катод, тормозятся и осаждаются на коллекторе, покрытой пленкой  $Ti$ , а вторичного выбивания нет – малая энергия. Благодаря этому скорость откачки тяжелых инертных газов ~ 30% от воздуха ( $Ar$ ).

## Эксплуатация и обслуживание

Поступают с завода герметически закрытыми, откачанными до  $p \sim 10^{-2}$  и более или заполненные сухим азотом. Присоединяются непосредственно к вакуумной камере. Перед запуском необходимо проверить сопротивление между электродами (мегаомметр  $\rho \sim 1000 \text{ Мом}$ ). Блок питания включают и проверяют наличие высокого напряжения. *Потом закорачивают концы.* Разряжают конденсатор.

Если насос охлаждаемый, то подводят воду. Подсоединяют блок питания. Вакуумная система должна обладать средством создания предварительного вакуума.

Перед подсоединением к вакуумной установке проверить его «сам на себя»  
Период старта законсервированного насоса не должен превышать нескольких минут.

Внимание на «шумы» при  $p$  от  $10^{-4}$ - $10^{-6}$ . Если «гремит» блок питания, проверить крепления высоковольтного трансформатора.

Насос подсоединяют к вакуумной камере. Откачивают до давления  $p \sim 10^{-3}$ - $10^{-4}$ , можно и выше. Включают насос.  $U_{нач} \sim 200$ - $300$ - $400 \text{ В}$ ,  $I_{нач} \sim 2 \text{ А}$ . Т.е. максимальная энергия ионов  $200$ - $400 \text{ В}$ . Это мало для распыления  $Ti$ , но оно есть, и скорость откачки мала.  $I \sim const$ ,  $p \sim const$ ,  $U \sim const$ . Медленно снижается  $I$  и  $p$ . При подходе к  $p \sim 10^{-4}$ . Переход разряда в высоковольтную форму. Резкий рост  $U$ , резкое уменьшение  $I$  и  $p$ . Насос вышел на режим.

В принципе, для получения высокого вакуума насос необходимо прогреть. Есть в насосах собственный нагреватель. Снимается магнитная система, и греется под фор. откачкой.  $T \sim 350$   $400^\circ \text{C}$ ,  $t \sim 15$ - $20 \text{ час}$ . Охлаждают, продолжая качать. Длительность старта зависит от состояния вакуумной системы.

Видно, что насос запускается и при  $p \sim 10^{-1}$  ( $10 \text{ Па}$ ). Период старта  $\sim 3 \text{ часа}$ . В начале разряд загорается во всей полости насоса. И давление может падать (дегазация под ионной бомбардировкой и разогрев электронами).

Пока насос не перейдет в высоковольтный режим надо продолжать качать средствами предварительной откачки. Надо стараться, чтобы период старта был как можно меньше. Не допускать перегрева насоса (коробление электродов и закоротка).

Предельное давление зависит от предыстории, суммарной наработки, какие газы качаются, режимов работы и т.д. *Использование масляных фор. насосов снижает предельное давление в 5-10 раз.*

Наиболее характерный отказ – это закоротка электродов.  $Ti$  пленка отслаивается и закорачивает. Иногда это пленку можно «выжечь». Снимают Н-систему. Напускают воздух и прикладывают напряжение плавно  $4$ - $5 \text{ кВ}$ . Выше нельзя, т.к. можно пробить изоляторы. Можно постучать, и закоротка может исчезнуть. При работе насоса при  $p \sim 10^{-4}$ - $10^{-5}$  образуется рыхлая коричневая пленка – постучать. При работе насоса при  $p \sim 10^{-6}$  и выше – твердая пленка металлического цвета. Если напустить атмосферу – может закоротить. И необходима разборка. Могут «пробиться» вводы (признак – их слабый нагрев). Можно сделать «аргонную обработку», чтобы увеличить быстроту действия. Напустить  $Ar$  и откачивать при  $p \sim 10^{-5}$ .  $Ar$  – тяжелый, хорошо распыляет катоды, т.е. очищает. Особенно хорошо для очистки от углеводородов, т.е. масла. Неограниченный ресурс работы.

При  $p \sim 10^{-6}$                       НОРД-100,250 ~ 100000 часов

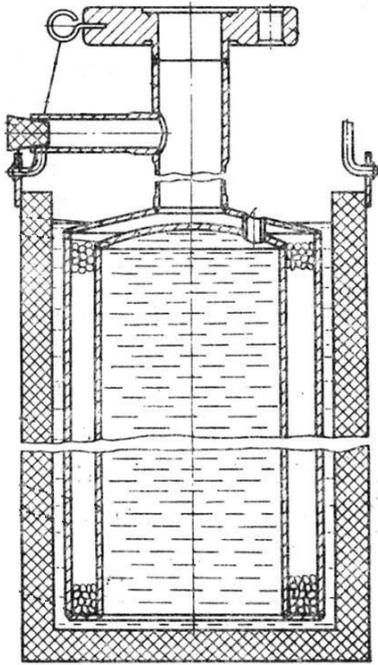
    ТРИОН 150 ~ 70000 часов

НМД; НОРД; ТРИОН               $S_{отк} 6$ - $1200 \text{ л/сек}$

$p_{np} \sim 10^{-10} \text{ Па}$

## Адсорбционные насосы

Определенные вещества (цеолиты, активированные угли, силикаты) обладают способностью поглощать большое количество газа. Эти вещества обладают сложной структурой – большим количеством пор, развитой поверхностью. Если цеолит или активированный уголь охладить до температуры жидкого азота, т.е. до  $196^{\circ}\text{C}$ , они начинают активно адсорбировать атмосферный воздух. Активированный уголь (из скорлупы кокосового ореха).



БАУ; СКТ; СКТ-2 – размер пор  $4 \dots 10 \text{ \AA}$ .

$1 \text{ гр} \sim 10^3 \text{ м}^2$  – поверхность.

Цеолиты:

- Аллюмосиликат натрия  $\text{NaA } 800 \text{ м}^2/\text{г}$ ,
- $\text{NaX } 1050 \text{ м}^2/\text{г}$ ,
- Аллюмосиликат кальция  $\text{CaA } 800 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Это металлический сосуд, заполненный адсорбентом. Присоединяют к вакуумной установке, охлаждают жидким азотом, и он начинает качать с атмосферы. Имеет ограниченную емкость. Когда насытится, нагревают, воздух выходит и потом можно опять.

Специальные нагреватели. Открывают клапан  $\text{K}_2$ , после прогрева – закрывают и остужают до комнатной температуры. С атмосферы и до  $10^{-6}$ , обычно до  $10^{-4}$ . Хуже качают инертные газы;  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$  – совсем не качают, т.к. низкая точка кипения.

$S_{\text{н}} \sim 2-10 \text{ л/сек}$ . ЦВН; ЦВА. Безмасляная откачка.

## Криогенные насосы (конденсационные)

$$T = 273,16 + t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K}$$

$$\text{H}_2 \sim 20,4^{\circ}\text{K} \quad S_{\text{н}} \sim 10^4 - 10^5 \text{ л/сек}$$

$$p_{\text{пр}} \sim 10^{-10} \text{ тор}$$

$$\text{He} \sim 2,8^{\circ}\text{K} \quad p_{\text{пр}} \sim 10^{-12} \text{ тор}$$

$$\text{N}_2 \sim 77,3^{\circ}\text{K}, \text{Ne} \sim 27,2^{\circ}\text{K}, \text{He} \sim 4,2^{\circ}\text{K} (2,8^{\circ}\text{K} \text{ под откачкой}).$$

Атмосфера

$$\text{N}_2 \sim 78\%, 5,94 \cdot 10^2 \text{ тор} \sim 77,3^{\circ}\text{K}, \text{O}_2 \sim 20\%, 1,59 \cdot 10^2 \text{ тор} \sim 90^{\circ}\text{K}, \text{Ar} \sim 0,93\%, 7 \text{ тор} \sim 87,3^{\circ}\text{K}, \\ \text{CO}_2 \sim 0,033\%, 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ тор} \sim 195^{\circ}\text{K}, \text{Ne} \sim 1,8 \cdot 10^{-3}\%, 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ тор} \sim 27,2^{\circ}\text{K}, \text{Kr} \sim 1,4 \cdot 10^{-4}\%, \sim 10^{-5} \text{ тор} \sim 121^{\circ}\text{K}, \text{H}_2, \text{Xe}, \text{Ar}, \text{Kr} \sim 0,9\%, T_{\text{жидк.воздух}} \sim 83^{\circ}\text{K}$$

Работа криогенного насоса основана на связывании газообразных веществ путем их конденсации на охлажденной поверхности. Азот –  $-196^{\circ}\text{C}$ ;  $\sim 77^{\circ}\text{K}$  – эффективно  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4$ . Но азот – парциальное давление  $\sim 600 \text{ мм рт.ст.}$  Если использовать жидкий водород  $\text{H}_2 \sim 20^{\circ}\text{K}$ , он эффективно сконденсирует  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{CO} \sim 10^{-11} \text{ тор}$  – это уже хорошо.

А что делать с  $\text{Ne}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ , их суммарное парциальное давление  $\sim 0,01 \text{ мм рт.ст.}$  Откачивают с помощью обычных пароструйных насосов до  $10^{-6} \text{ мм рт.ст.}$  После включают криогенный насос и  $p_{\text{пр}} \sim 10^{-12} \text{ тор}$ . Если использовать гелиевый насос,  $T \sim 4,2^{\circ}\text{K}$ , то даже водород до  $10^{-7}$ , а если очень хорошо откачать пароструйным насосом, то и

водород до  $p \sim 10^{-12}$ . Но дорого. На криогенных возникает слой (шуба) сжиженных газов. Необходимо регенерировать.

## Приборы для измерения полного давления разреженного газа (манометры)

Приборы для измерения полных малых давлений в вакуумной технике называются манометрами. В литературе, практике – вакуумметры. По принципу действия манометры можно свести в следующие классы:

1. Жидкостные манометры, в которых измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столба жидкости (*U*-образные манометры).
2. Компрессионные манометры, действие которых основано на законе изотермического сжатия газа (манометр Мак-Ллода).
3. Деформационные манометры, в которых в качестве чувствительного элемента используются сильфоны, мембраны (о наличии давления судят по величине деформации).
4. Тепловые манометры, в которых используют зависимость теплопроводности газа от давления (манометры сопротивлений, термопарные манометры).
5. Ионизационные манометры – давление определяют по ионному току.
  - а) электроразрядные – зависимость параметров электрического разряда от давления;
  - б) электронные ионизационные – в которых ионизация разряда осуществляется потоком электронов.

Все манометры разделяются на манометры *прямого* и *косвенного* действия.

*Прямого* – это приборы, которые измеряют давление непосредственно  $\Delta p = 760 - 10^{-5}$  мм рт.ст. (жидкостные, деформационные, компрессионные).

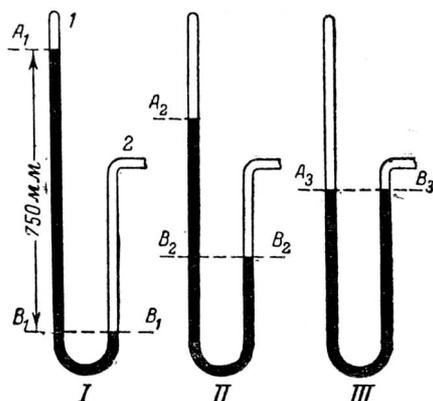
Манометры *косвенного действия* измеряют не само давление, а некую его функцию, и состоят из датчика (манометрического преобразователя) и радиотехнического блока измерений. Выходной сигнал этого блока (уровень давления) зависит от рода газа и его температуры. Измерение давлений ниже  $10^{-5}$  мм рт.ст. возможно только приборами косвенного типа. При таких давлениях воздействие газа на стенки сосуда ничтожно мало ( $p \sim 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па  $\sim 10^{-5} = 1,3 \cdot 10^{-8}$  кг/см<sup>2</sup>).

Деформационные	$10^3 \dots 10^{-2}$ .
<i>U</i> -образные	$10^3 \dots 10^{-2}$ .
Тепловые	$10 \dots 10^{-4}$ .
Компрессионные	$10 \dots 10^{-5}$ .
Магнитные электроразрядные	$10^{-2} \dots 10^{-13}$ .
Ионизационные	$10^{-2} \dots 10^{-13}$ .

### *U*-образные манометры

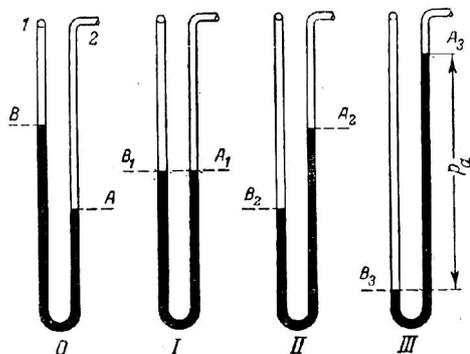
#### а) закрытые

Обычно изготавливаются в виде латинской буквы *U*. Стеклообразная трубка с запаянным одним концом, частично заполненная жидкостью (ртутью). Открытый конец трубки соединяется с вакуумной системой. Ртуть заливают в предварительно откачанную до  $10^{-3}$  мм рт.ст. трубку. Давление над ртутью считается равным 0. 1 – до откачки; 2 – в процессе откачки; 3 – в конце откачки.



1. Пусть в начале откачки  $p = 750$  мм рт.ст. Очевидно, что разность уровней ртути  $A_1 - B_1 = 750$  мм рт.ст.

- По мере откачки давление в системе будет падать, и, чтобы его уравновесить, нужна меньшая разность уровней ртути  $A_2-B_2$ .
- Когда давление в установке сравняется с давлением в запаянном конце, оно уравновесится разностью уровней  $A_3-B_3=0$ . Считается, что установка откачана. Таким образом, при помощи закрытого U-образного манометра давление  $p$  в установке измеряется путем непосредственного измерения разности уровней ртути  $A-B=p$ .



### б) открытые

Рабочая жидкость – ртуть.

- До начала откачки давление на обоих концах трубки равно атмосферному.
- Начали откачку. Уровни ртути начнут изменяться. Эти изменения должны приводить к равновесию между давлением, которое со стороны открытого конца всегда равно  $p=p_{атм}$ , и давлением в вакуумной камере, которое становится меньше

атмосферного. В связи с этим, очевидно, что уровень ртути  $A_2$  должен быть выше уровня  $B_2$ .

$$(A_2 - B_2) + p = p_{атм}; \quad p = p_{атм} - (A_2 - B_2).$$

Т.е. в этом случае необходимо знать  $p_{атм}$ .

Если  $A_3-B_3=p_{атм}$ , т.е. разность уровней  $A_3$  и  $B_3$  уравновесит атмосферное, то

$$p = p_a - (A_3 - B_3) - p_a = p_a = p_a, \text{ т.е. } p_a - p_a = 0.$$

Считается, что установка полностью откачана.

С помощью открытого U-образного манометра можно измерять и избыточное давление, т.е. давление, превышающее  $p_{атм}$ , в этом случае:

$$p = p_a + (B - A).$$

В качестве рабочей жидкости применяется ртуть. Но можно и другие жидкости, например, масло. В этом случае увеличивается точность, но и размеры манометра тоже.

$$\rho_{рт} = 13,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ а } \rho_{жидкости} = \delta,$$

Чтобы получить значение  $p$  в мм рт.ст. необходимо

$$(A - B) \cdot \delta / \rho_{рт}.$$

Определим  $p_{атм}$  с помощью рабочей жидкости масло  $\delta / \rho_{рт} = 15$ .

$p_{атм} = 760 \text{ мм рт.ст.}$ , тогда  $l = 760 \cdot 15 = 11,4 \text{ м}$ .

### Деформационные манометры

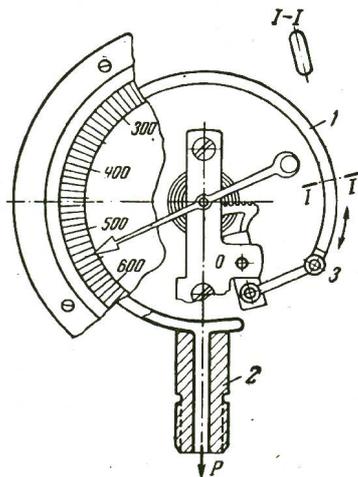
#### а) Пружинный стрелочный манометр

Применяется для измерения не очень низких давлений. Менее точно, чем U-образный, зато малые размеры, прочность

Полая запаянная трубка, присоединенная к вакуумному объему.

$A_1$  – наружная поверхность трубки –  $S_1$ .

$A_2$  – внутренняя поверхность трубки –  $S_2$ .



$$F_1 = (p_{атм} - p) \cdot A_1; \quad F_2 = (p_{атм} - p) \cdot A_2.$$

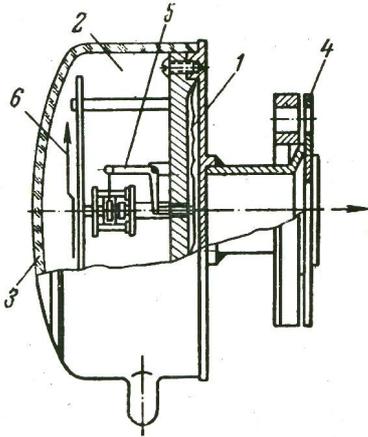
$p$  – измеряемое давление, равное давлению в трубке.

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (p_{атм} - p)(A_1 - A_2) = cX,$$

где  $X$  – перемещение конца трубки.

Такой манометр измеряет давление от  $10^5$ - $10^3$  Па. Меньше  $10^3$  Па – трудно, т.к. должно быть большое перемещение, а для этого малая жесткость. А надо еще и компенсировать  $p_{атм}$ .

### Мембранные манометры



$$p_{ср} = p_{сравнительное}$$

Если  $p = p_{ср}$ , то стрелка показывает 0.

Если  $p \neq p_{ср}$ , то деформируется полость.

$$p_{ср} - p = kx,$$

где  $x$  – величина деформации (перемещение),

$k$  – коэффициент.

Разновидность мембранного манометра:

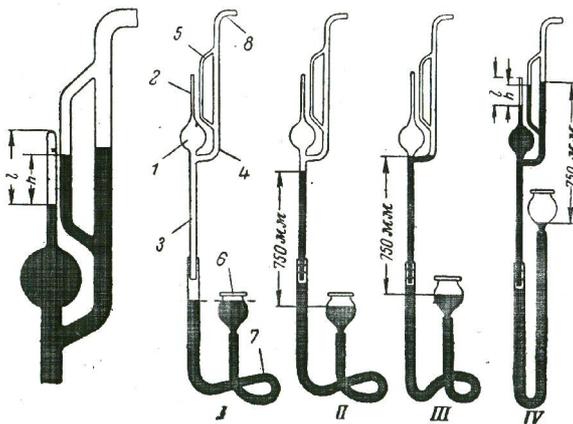
Электрод + мембрана = конденсатор.

$p_{ср} \sim 10^{-4}$ . если меняется  $p$ , то изменяется емкость конденсатора. Этот прибор измеряет  $p \sim 760$ - $10^{-1}$  мм рт.ст. Ограничение связано с величиной деформации.

Один прибор 2...3 порядка. Отметим, что особенностью деформационных манометров является

независимость их показаний от рода газа.

### Компрессионный манометр



Для измерения давлений от  $0,01$ - $10^{-5}$  мм рт.ст. применяется компрессионный манометр Мак-Леода (1874 год). Он состоит из сферического баллона 1 с измерительным капилляром 2 (запаян). Стеклообразная трубка 3 с ответвителем 4 соединяет манометр с вакуумной системой и сравнительным капилляром 5. 2 и 5 имеют одинаковые диаметры. Груша 6 (заполнена ртутью) через резиновую трубку 7 соединена с 3. Положение ртути перед откачкой изображено на рис. I.

При откачке вакуумной системы, которая соединена с 8, уровень ртути поднимается, и, когда ее давление в трубке 3 достигает  $p_{атм}$ , перемещение ртути прекратится. Манометр готов к измерению давления (положение II). Для измерения давления поднимем грушу 6, и в какое-то время ртуть займет положение, изображенное на рис. 3, т.е. измерительный капилляр 2 отсоединен от вакуумной системы. Начиная с этого момента, в измерительной части остается некое количество газа.  $\rightarrow pV_1$ , где  $V_1$  – это объем измерительного капилляра + баллон + небольшой обрезок трубки.

Давление в перекрытой части манометра равно  $p_в$  – давлению в вакуумной системе. Еще поднимем грушу 6, и давление и объем, который занимает газ, изменится. Уровень ртути в сравнительном капилляре 5 будет выше уровня в 2 на какую-то величину  $h$  и равно измеряемому.

Очевидно, что давление сжатой в измерительном капилляре порции газа будет равно  $h+p$ , а количество газа  $(h+p) \cdot V_2$  - новый объем пустого пространства

$$pV_1 = (h+p) \cdot V_2.$$

Обычно компрессионные манометры применяются тогда, когда  $p_{иск} \ll h$ , т.е.:

$$pV_1 = hV_2,$$

$$p = \frac{V_2}{V_1} \cdot h \quad \text{мм рт.ст.} \quad \frac{V_2}{V_1} = \text{const прибора.}$$

Таким образом измерение давления в вакуумной системе компрессионным манометром сводится к такому уменьшению первоначального объема газа  $V_1$  до объема  $V_2$ , чтобы первоначальное очень малое давление  $p_1$ , которое нужно измерить, было увеличено до давления  $h$ , измеряемое глазом на разности уровней ртути в сравнительном и измерительном капиллярах.

### Тепловые манометры Теплопроводность газа

Представим себе в газовой среде две параллельные пластины с разными температурами. Расстояние между ними  $l$ ,  $T_1 > T_2$ ,  $\Lambda$  – длина свободного пробега молекул газа. В случае низкого вакуума, когда  $\lambda \ll l$ , молекулы, сталкиваясь друг с другом, теряют энергию и не могут непосредственно передать свой импульс (энергию) другой пластине, т.к. уже на расстоянии  $\lambda$  они имеют другую энергию.

Перепад температуры на единице длины будет:

$$\frac{T_1 - T_2}{l}.$$

Т.е. (экспериментальный факт) теплопроводность газа при низких давлениях не зависит от давления. Согласно кинетической теории газ, поток тепла при  $\lambda \ll l$  равен:

$$Q = K_{\text{тепл}} \frac{T_1 - T_2}{l} \cdot A,$$

где  $A$  – площадь пластины,

$K$  – коэффициент теплопроводности.

В СИ  $[Q] = \text{Вт}$ .

$$K = 2,09 \cdot 10^2 \varepsilon \rho \lambda C_v \cdot v_a \left[ \frac{\text{вт}}{\text{метр} \cdot \text{град}} \right],$$

где  $\varepsilon$  – множитель, равный 2,5 для одноатомного газа, 1,9 – для 2-х атомного, 1,5 – для 3-х атомного;

$$C_v \text{ – теплоемкость единицы газа } \left[ \frac{\text{дж}}{\text{К}^0 \text{ кг}} \right],$$

$\rho$  – плотность газа  $\text{кг/м}^3$ ,

$v_a$  – скорость молекулы  $\text{м/сек}$ ,

$\lambda$  – средняя длина свободного пути.

$\rho \sim p$ ;  $\lambda \sim 1/p$ , т.е.  $K$  не зависит от  $p$ .

В случае  $\lambda \sim l \gg l$ , то в условиях глубокого вакуума

$$Q = \alpha p \sqrt{\frac{2R}{\pi MT}} \cdot (T_1 - T_2) \cdot A, \quad (*)$$

где  $T$  – средняя температура газа,

$\alpha$  – коэффициент аккомодации  $= (0,2-0,95)$ .

На принципе зависимости  $Q$  от давления и работают тепловые манометры.

$$\Delta p = 100-10^3 \text{ мм рт.ст.}$$

Эти манометры состоят из датчика, который непосредственно связан с измерением давления, и измерительного блока.

Датчик представляет собой трубку с проволокой, через которую пропускают ток. Баланс энергии при этом записывают так:

$$I_H^2 R (1 + \alpha \Delta T) = c p \Delta T + \tau (T^4 - T_0^4) + b \Delta T,$$

где  $c$ ,  $\tau$ ,  $b$  – коэффициенты пропорциональности;

$T_0$  – температура колбы;

$T$  – температура нити;

$c p \Delta T$  – потери на теплопроводность;

$\tau (T^4 - T_0^4)$  – мощность, рассеиваемая нитью, излучение черного тела, закон Стефана-Больцмана;

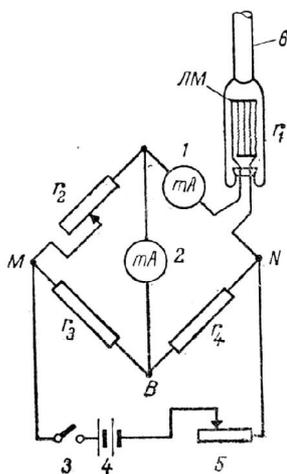
$b \Delta T$  – потери через вводы нити, мощность, отводимая через вводы;

$\Delta T = T - T_0$ .

$$p = \frac{I_H^2 R - b \Delta T - \tau (T^4 - T_0^4)}{c p \Delta T}.$$

Об изменении давления судят либо по изменению тока  $I_H$  при постоянстве  $T$  и  $T_0$ ; либо при постоянном токе накала меряют изменение температуры.

### Манометры сопротивления



$R_3 = R_4$  – постоянные резисторы, величина которых зависит от температуры;

$R_1$  – сопротивление нити лампы,  $Ni$ ,  $W$  – сильно зависит от температуры;

$R_2$  – переменный резистор, слабо зависит от температуры («0» – моста);

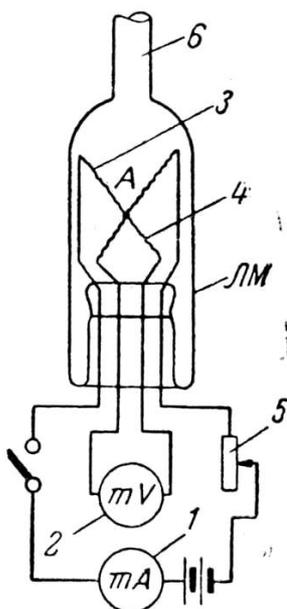
$R_5$  – переменный резистор – ток накала лампы;

$R_3, R_4$  – (не зависят от температуры).

Включая цепь моста, по прибору 1 реостатом 5 выставляют ток накала  $I_H$  нити манометрической лампы, указанный в паспорте, и поддерживаем его постоянным. Пока не начата откачка, устанавливают такое значение  $R_2$ , чтобы  $R_2 = R_1$ , т.е. мост  $ma - 2 = 0$ . Если начать откачку, то при достаточном снижении давления теплопроводность газа изменится (уменьшается, см. (\*)), т.е. изменится температура нити, т.е. мост разбалансируется, и  $ma - 2$  начнет что-то показывать. Эти показания и будут судить о величине давления. Чтобы по показаниям прибора судить о давлении, прилагается градуировочная кривая. Необходимо отметить, что при таких низких давлениях играет роль даже положение лампы (строго вертикально).

ВСБ-1, 13ВТ-3 – блокировочные приборы; лампа ПМТ-6.

## Термопарные манометры



Манометрическая лампа представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на вводах смонтирован подогреватель 3 (*Pt* или *Ni*), на двух других – термопара 4 (хромель-копель или хромель-алюмель). Термопара и нагреватель сварены перемычкой. Подогреватель нагревается, величина тока подбирается реостатом 5. Спай термопары – источник *э.д.с.*, которая регистрируется *mV*. Если  $p = p_a$ , прибор *mV* показывает 0. По мере откачки теплопроводность газа падает, перемычка нагревается и растет *э.д.с.* – регистрируется *mV*.

$I_H$  – либо написан на корпусе, либо определяется до вскрытия лампы (откачав до  $10^{-4}$  мм рт.ст.). Есть соответствующие градуировочные кривые.  $\Delta p = 10^{-1} - 10^{-4}$ .

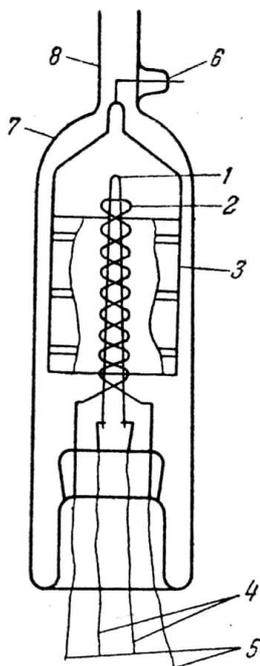
ПТМ-2 (ЛТ-2); ПМТ-4 – лампы.

Показания прибора зависят от рода газа.

$p = p_{\text{возд}} \cdot q$ ,  $q$  для  $H_2 = 0,67$ ;  $He = 1,12$ ;  $CH_4 = 0,61$ ;  $Ne = 1,31$ ;  $CO = 0,97$ ;  $Ar = 1,56$ ;  $CO_2 = 0,94$ ;  $Kr = 2,3$ .

Приборы: ВИТ-1, 2, 3, ВИ-14.

## Электронные ионизационные манометры



В диапазоне  $1 - 10^{-10}$  мм рт.ст. ПМИ-2 (ЛМ-2); ВИТ-1, 2, 3; ВИ-14.

В стеклянном баллоне 8 смонтирована трехэлектродная система, состоящая из коллектора ионов 3, анодной сетки 2 и накапливаемого катода 1. На анодную сетку подается положительный относительно катода потенциал, а на коллектор ионов (цилиндрический) – отрицательный. Вольфрамовый катод 1 нагревается и испускает (эмитирует) электроны, которые ускоряются к сетке, пролетают сквозь нее, тормозятся у коллектора и летят назад. Колеблются и ионизируют газ. В результате вокруг анодной сетки образуется облако электронов, которые ионизуют газ. Ионы, в свою очередь, движутся на коллектор ионов, создавая ионный ток.

Как показывают эксперименты, при давлениях  $\leq 10^{-3}$  торр:

$$\frac{I_n}{I_s} \approx p = S \cdot p, \quad (p - \text{давление}).$$

Для получения однозначной зависимости  $I_n(p)$  обычно ток  $I_n$  поддерживают на постоянном уровне  $\sim 0,5$  *ма* для ПМИ-2, тогда:

$$h = k I_n,$$

где  $k$  – коэффициент, который зависит от рода газа.

$q = \text{возд} \ k = 1$ ;  $N_2 = 1$ ;  $Cl_2 = 0,8$ ;  $H_2 = 0,43$ ;  $He = 0,18$ ;  $H_2O = 0,1$ ;  $Kr = 1,9$ ; пары масла = 9-13.

$$p = q \cdot P_{\text{возд}}.$$

Особенности ионизационного манометра:

1. От  $10^{-3}$  до  $10^{-10}$  мм рт.ст.

2. Для всех газов и паров с учетом  $q$ .
  3. Показания зависят от рода газа.
  4. Перед работой их надо обезгаживать.
  5. Строго вертикально.
  6. Прорыв атмосферы → выход из строя.
- Датчики: МИ-27; МИ-10; ПМИ-2; ПМИ-12.

### **Магнитные электроразрядные манометры**

Приборы этого класса измеряют давления в диапазоне от  $1 \text{ мм рт.ст.}$  до  $10^{-23} \text{ мм рт.ст.}$  Ионизация остаточного газа в этих приборах осуществляется не термоэлектрическими электронами, а благодаря электронам, возникшим в результате самостоятельного разряда между холодными электродами. Тут всего два электрода: корпус-катод и цилиндрический анод. Вдоль анода – магнитное поле (E||H). На электроды через  $R_0$  подается напряжение  $2,2...3 \text{ кВ}$ . Создается тлеющий разряд – датчик Пеннинга. Если расположить магнитное поле так, чтобы H⊥E, то это – датчики магнитронного типа.

Приборы: ВМБ-3,8; ВИМ-2 (инверсионно-магнитронный).

Датчики: ММ-13; ПММ-32-1; ММ-14; М-4А.

Особенности работы:

1. Не включают в себя никаких накапливаемых частей и могут включаться при любых давлениях.
2. В силу простоты и надежности – используются для управления технологическими процессами.
3. Наблюдается эффект откачки.
4. При работе на высоких давлениях происходит распыление электродов – приводит к некоторым искажениям результатов.
5. При работе с маслами происходит крекинг последнего, необходимо очищать либо ловушки.
6. Выпускаются без стеклянного корпуса, прямо на фланце.

### **Оценка вакуума по свечению при электрическом разряде в газе**

К электродам прикладывается ВЧ-, постоянное напряжение (трансформатор Тесла). Один конец заземлить, чтобы облегчить поджиг разряда.

По характеру свечения судят о давлении.

1. При атмосферном давлении пробоя не будет, будут искры на электродах.
2.  $\sim 10 \text{ мм рт.ст.}$  – тонкая фиолетовая нить, постепенно расширяющаяся по мере откачки.
3.  $\sim 1 \text{ мм рт.ст.}$  – широкая розовая полоса.
4. Дальше – вся полость трубки.
5.  $0,1$  – свечение стягивается к электродам.
6.  $0,01$  – только у электродов и свечение стенок (зеленое, синее от сорта стекла).
7.  $0,001$  – свечение газа прекращается, а свечение трубки тускнеет.
8.  $\sim 10^{-4}$  – никакого свечения (черный или темный вакуум).

Можно зажечь разряд в камере и наблюдать за откачкой. Грубая оценка вакуума. Разряд в лампе.

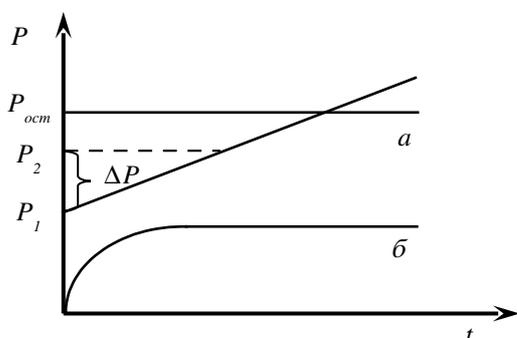
### **Радиоизотопные преобразователи**

В этих датчиках для напуска газа используются радиоизотопы.  $^{226}\text{Ra}$ , тритий – это источники  $\alpha$  и  $\beta$  излучения. Состав датчика: коллектор в виде стержня, цилиндрический анод и радиоизотопный источник. Между коллектором и анодом прикладываем  $\sim 50\text{ В}$ .  $\alpha$ -частицы, которые вылетают из источника, ионизуют газ, образуются электроны и ионы. Ионы летят к коллектору и образуют ионный ток.  $I_n \sim p$ . ВР-4:  $\Delta p = 760 \dots 10^4 \text{ мм рт.ст.}$ . Датчик: МР-8

### Течискание

Герметичность вакуумной системы – это свойство всех ее элементов и их соединений обеспечивать настолько малое проникновение (натекание) газа через них, чтобы им можно было пренебречь в рабочих условиях. Натекание газа происходит через места нарушения герметичности – это течь. Добиться полного отсутствия течей практически невозможно.

Пусть при открытом вентиле в вакуумном объеме установилось давление  $p_1$ .



Насос может откачивать до  $p_{ост}$ . Возможны два варианта:

1.  $p_1 = p_{ост}$  – система герметична.
2.  $p_1 > p_{ост}$  – это возможно при:
  - а) неисправности насоса,
  - б) газовыделения внутри системы,
  - в) натекание извне.

Чтобы определить, что же у нас происходит, надо перекрыть клапан и следить за давлением в В.О.  $p = p(t)$ .

- а)  $p = const = p_{ост}$  – система герметична.
- б) В начальный момент времени растет, а затем  $const$  – газовыделение.
- в) постоянный рост – течь.

$$Q_{\text{натекания}} = \frac{V \cdot \Delta p}{\Delta t} -$$

(\*\*\*)

натекание или поток газ в систему,  $V$  – объем вакуумной системы.

Допустимая суммарная величина натекания

1. При непрерывной откачке системы со скоростью  $S_0$  требуется откачать до давления  $p_1$ , тогда

$$Q_{\text{нат}} \leq S_0 p_1 \Rightarrow Q_{\text{нат}} \leq \frac{S_n \cdot U}{S_n + U} \cdot p_1,$$

т.е. даже при наличии натекания, если правильно подобрать  $S_n$ ,  $U$ , можно достичь требуемого давления.

2. Изолированная система объемом  $V$ , находящаяся под вакуумом или под избыточным давлением. Изменение давления за счет негерметичности не должно превышать  $\Delta p$  за  $\Delta t$ , т.е.

$$Q_{\text{нат}} \leq \frac{V \Delta p}{\Delta t}.$$

$$[Q_{\text{нат}}] = \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{сек}} = \frac{\text{м}^3 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}}{\text{сек}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{сек}} = \frac{\text{дж}}{\text{сек}} = \text{вт}$$

Натекание, характеризующее герметичность вакуумной системы, определяется как произведение объема ( $V$ ), который занимает газ, на  $\Delta p/\Delta t$ . Все узлы, входящие в вакуумную систему, необходимо проверить на герметичность. Есть истинные течи, а есть – конструкционные (карманы, заполненные воздухом).

Приборы, которые позволяют определить место течей, – *течеискатели*. Течеискатели реагируют на физико-химические свойства газов, которые называются пробными веществами.

### Методы течеискания

#### Метод опресовки.

В объеме создается избыточное давление, а сам объем погружается в жидкость. Пузырьки свидетельствуют о наличии течи. Используется компрессор. Для предварительной оценки на герметичность. Шипение, задувание свечи. Намылить и наблюдать пузырьки. Известь  $10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/сек}$

#### Люминесцентный метод

Основан на непосредственном обнаружении жидкого пробного вещества и широко применяется для испытания на герметичность малогабаритных открытых объектов. Объект погружается в раствор люминофора какой-либо органической жидкости (трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, хлористый калий, йодистый калий), но так, чтобы люминофор попал на внутреннюю поверхность. Под действием капиллярных сил люминофор проникает в месте течей и накапливается в них (жидкость испаряется, а люминофор остается).

Если выдержать:	1-2 час	$10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/сек}$
	1-2 суток	$10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па/сек}$

Люминофоры – это специально синтезируемые вещества, которые излучают свет под воздействием различных физических воздействий (свет, электровоздействие, радиоизлучение и т.д.). Люминофоры(телевизор, осциллограф, мониторы, и т.д.)

#### Искровой метод

Применяют трансформатор Тесла либо какой-либо ВЧ-генератор  $\sim \text{вт}$  (не очень мощный). Один конец выхода генератора ВЧ или трансформатора Тесла подносят к стеклянной стенке прибора, внутри которого  $p \sim 10^{-2} - 1 \text{ мм рт. ст.}$ . Если течей нет, то возникнет сноп искр, а если есть, то узкая светящаяся полоска, которая и укажет место течи. Делать осторожно, быстро, чтобы не прожечь. Есть промышленный образец НО60.010. Только стеклянные приборы.

$$Q = 10^{-2} \frac{\text{м}^3 \text{ Па}}{\text{сек}} .$$

#### Манометрический метод

##### 1. Метод теплового манометра

В качестве пробного вещества – пары или газы, которые по сравнению с воздухом обладают большей или меньшей теплопроводностью. Если течь не обнаружена, то вакуумметр что-то показывает. Если взять водород (большая теплопроводность), то в случае течи прибор покажет как бы увеличение давления. Методом можно пользоваться, если давление не выходит за пределы измерения датчика. Места возможных течей *обдуваются* водородом или другим газом. Обливаются ацетоном и т.д. ( $10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/сек}$ ).

##### 2. Метод высоковакуумного манометра

Если установка откачана  $\sim 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$  или выше, но есть подозрение на течь, используют ионизационный манометр. В качестве пробного вещества – пары или

газы, которые, проникая в вакуумную камеру, изменяют ионный ток в лампе. Если использовать водород, эфир, ацетон, то, попадая в датчик, они разлагаются, попадая в соприкосновение с накаливаемым катодом – увеличивается количество ионов – увеличивается ионный ток → как бы увеличение давления. Если  $Ar$ ,  $He$ , то ввиду более высокого, чем у воздуха потенциала ионизации, количество ионов уменьшается, и давление как бы уменьшается.  $10^{-3} м^3 Па/сек$

#### Галогенный течеискатель

Используется эффект разного возрастания эмиссии положительных ионов с накаленной ( $800-900^{\circ}C$ ) платины при попадании на него галогеносодержащих газов ( $CCl_4$ ,  $CF_4$  и т.д.). Эффект происходит как в атмосфере, так и в вакууме.

1. Метод опресовки – объем заполняется фреоном под избыточным давлением.
2. Либо щуп в вакуум и обдуть.

$$10^{-7} м^3 Па/сек$$

Если в вакууме, то датчик располагают на выпускной стороне насоса (если насос пароструйный). Если небольшой объем, то В.О.-датчик – насос.

Датчик постепенно заряжается фреоном. Продуть воздухом. ГТИ-6.

#### Масс-спектрометрический метод

Самый точный. Вакуумный объем, к нему пристыковывается масс-спектрометр. Обдувается гелием. Гелий очень хорошо проникает в щели, в капилляры и его мало в воздухе. ПТИ-6 ( $10^{-7} м^3 Па/сек$ )

#### Метод разрядной трубки

1. Зажигается разряд в камере.
2. Зажигается разряд в лампе через балластное сопротивление.

По изменению цвета или вида разряда.

$$10^{-4} м^3 Па/сек$$

$$R_{\sigma} \sim 10^6 \text{ Ом}; U \sim 1 \text{ кв}, I_p \sim 1 \text{ ма}.$$

### **Ловушки**

Ловушки – это устройства, предназначенные для улавливания паров или газов, с целью предотвращения их проникновения из одной части вакуумной системы в другую или для снижения их парциального давления.

Ртуть  $r_{нас} \sim 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  – вымораживающая ловушка.

Для получения чистого, безмасляного вакуума применяются ловушки – устройства, исключающие или уменьшающие проникновение в вакуумный объем паров рабочей жидкости.

#### Характеристики ловушек

##### Защитная способность

$$\beta = \frac{Q}{Q_{л}}$$

– это отношение количества паров рабочей жидкости, поступающее из насоса в откачиваемый объем в единицу времени без ловушки и с ней.

##### Удельная проводимость ловушки

$$U_{уд.л} = \frac{U_{лов}}{A}$$

– отношение проводимости ловушки к площади ее входного отверстия.

##### Требования к ловушкам

1. Ловушки должны хорошо защищать объем от проникновения в него паров рабочей жидкости ( $\beta$  – максимальная).
2. Ловушки должны как можно меньше снижать быстроту действия насосов правильно 30...40%.
3. Быть легко разборными для периодической чистки.
4. В сверхвысоковакуумных системах допускать прогрев до  $450^{\circ}\text{C}$ .
5. Охлаждаемые ловушки должны обеспечивать малые расходы газа.

#### Типы ловушек

##### 1. Механическая

а) Маслоотражающий колпачок – это водоохлаждаемая механическая ловушка. Устанавливается над верхним соплом диффузионного насоса, чтобы паразитные струи пара пересекали. Струя пара конденсируется при соприкосновении с охлад. поверхностью.

б) Ловушка шевронного типа. Водоохлаждаемая.

а) и б) – уменьшают поток пара в 100...1000 раз.

##### 2. Низкотемпературные ловушки

а) Ловушки с хладагентом (азот –  $196^{\circ}\text{C}$ )

(типа шевронных) в 100...1000 раз снижают поток

б) Термоэлектрические – термоэлектрическая полупроводниковая батарея (ячейка Пельтье)

$t \sim -30 \div -40^{\circ}\text{C}$  – холодные спаи несут на себе жалюзи.

Горячие – охлаждают водой.

##### 3. Адсорбционно-форвакуумные

1. Пакет с активированным углем.

2. Окись алюминия – поглощает углеродосодержащие соединения.

3. Силикагель – то же и влага.

Уменьшают скорость откачки на 30%. Время работы ~1000 часов.

При ее использовании нужен дополнительный вакуумпровод. Сначала откачивают до 1 мм рт.ст., затем через ловушку.

##### 4. Адсорбционные высоковакуумные

Дополнительно к ловушке шевронного типа пакет с цеолитом. В этом случае азот не нужен, но нужно предварительно прогреть в течении 3-х часов до  $350^{\circ}\text{C}$ .

Очень эффективно, особенно масло.

До  $5 \cdot 10^{-9}$  и длительный срок службы.

##### 5. Ионные ловушки (электрические ловушки)

Масло - в 100 раз; вода – в 4 раза; кислород ~100%.

Целесообразно применять после  $10^{-3}$  торр и небольшое количество масла.

#### Литература

С.Дэшман «Научные основы вакуумной техники»

В.И.Королев «Основы вакуумной техники»

Л.Н.Розанов «Вакуумная техника»

Я.Грошковский «Техника высокого вакуума»

В.И.Иванов «Безмасляные вакуумные насосы»

В.И.Кузнецов, Н.Ф.Немилов, В.Е.Шемякин «Эксплуатация вакуумного оборудования»

Е.Т.Кучеренко «Справочник по физическим основам вакуумной техники»