

Лабораторная работа 2.3.1

"Современные средства получения и измерения вакуума"

Белов Михаил Б01-302

21 февраля 2024 г.

Аннотация:

Цель лабораторной работы:

Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; определение скорости откачки системы в стационарном режиме; измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом; измерение скорости натекания.

В работе используются:

вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

Теоретические сведения:

По степени разряжения вакуумные установки принято делить на три класса:

- 1) низковакуумные – до 10^{-2} - 10^{-3} торр;
- 2) высоковакуумные – 10^{-4} - 10^{-7} торр;
- 3) установки сверхвысокого вакуума – 10^{-8} - 10^{-11} торр.

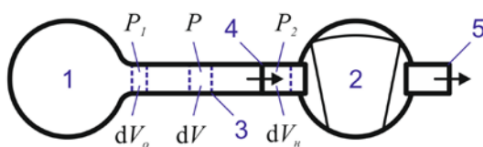
С физической точки зрения низкий вакуум переходит в высокий, когда длина свободного пробега молекул газа оказывается сравнима с размерами установки; сверхвысокий вакуум характерен крайней важностью процессов адсорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

Основные характеристики вакуума

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе λ сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда d , в котором газ находится. Для воздуха при нормальных условиях $\lambda \sim 105$ см, откуда видно, что воздух в жилых помещениях не находится в состоянии вакуума, но, например, внутри пористых материалов, таких как древесина, уже может находиться. В технике вакуумом называют состояние газа при котором его давление меньше атмосферного ($P < P_{atm}$). Различают следующие типы вакуума: низкий, когда средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера рассматриваемого объёма, т.е. $\lambda < d$; средний, когда $\lambda \sim d$; высокий (или глубокий), когда $\lambda \gg d$. Иногда выделяют ещё сверхвысокий вакуум, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для проведения эксперимента. Газ в состоянии высокого вакуума называется ультраразреженным.

Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы:



1 — откачиваемый объём, 2 — вакуумный насос, 3 — вакуумпровод (трубка),
4 — впускной патрубок (вход) насоса, 5 — выпускной патрубок (выход) насоса

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

Предельное остаточное давление (предельный вакуум) $P_{np}[L^1MT^2]^3$ – наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в рассматриваемом сечении вакуумпровода (рассматриваемой точке вакуумной системы). Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

Наибольшее выпускное давление $[L^1MT^2]$ – максимально допустимое давление газа на входе насоса.

Быстрота откачивающего действия (скорость откачки) вакуумной системы $S[L^3T^1]$ – объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dt}$$

Следовательно, быстродействие насоса S_n определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dt}$$

а эффективная скорость откачки камеры S_o :

$$S_o = \frac{dV_o}{dt}$$

Падение давления вдоль вакуумпровода $\Delta P = P_1 - P_2$ определяется его пропускной способностью (проводимостью) $U[L^3T^1]$:

$$u = \frac{Q}{P_1 - P_2}$$

,где $Q[L^2MT^3]$ – поток газа через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

Величина $Z[L^3T]$, обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U}$$

В общем случае указанные величины S, U, Q, Z как и сами давления P_1 и P_2 зависят от времени. Но в конце процесса откачки устанавливается квазистационарный режим, при котором поток газа становится практически постоянным и равным количеству поступающего в систему газа в единицу времени вследствие наличия течей, т.е. нарушения герметичности (в основном в местах механического соединения отдельных узлов вакуумной системы). Для стационарного режима можно записать условие непрерывности потока откачиваемого газа:

$$P_1 S_o = P S = P_2 S_n = Q$$

Из этих уравнений нетрудно получить так называемое основное уравнение вакуумной техники, связывающее основные параметры вакуумной системы:

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}$$

Это уравнение позволяет правильно ориентироваться в выборе средств откачки и вакуумпроводов при конструировании вакуумной системы для любых целей.

Количественной характеристикой течи, является натекание $Q_n[L^2MT^3]$, измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = V \frac{P_K - P_H}{\Delta t}$$

где V – замкнутый исследуемый объем; P_H, P_K – начальное и конечное давление в объеме; Δt – время между измерениями давления. При наличии течей, нормальной работе средств откачки и отсутствии в системе источников паров или газов, зависимость потока газа через течь от времени $Q_n(t)$ носит, как правило, линейный характер.

Для заданного давления P_1 в замкнутом исследуемом объеме допустимым считается натекание:

$$Q_n \ll Q = P_1 S_o = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U}$$

Объем при этом считается достаточно герметичным для поставленных задач.

На пропускную способность вакуумпровода существенно влияет режим течения газа, который характеризуется числом Кнудсена, равным отношению длины свободного пробега молекул в газе к характерному линейному размеру течения:

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

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока: В гидродинамическом (вязкостном) режиме течения ($Kn \ll 1$) различают ламинарные и турбулентные потоки. При ламинарном течении молекулы газа движутся по параллельным траекториям со скоростями, мало отличающимися друг от друга. При турбулентном течении наря-

ду с поступательным движением всей массы газа, молекулы движутся хаотически со скоростями, подвергающимися случайным изменениям. В молекулярном (кнудсеновском) режиме ($Kn \gg 1$) течение газа сводится к независимому движению отдельных молекул по прямым линиям в периоды между соударениями главным образом со стенками вакуумпровода. В переходном режиме ($Kn \sim 1$) в системе могут существовать все описанные выше виды течения. В разных режимах течения пропускная способность вакуумпровода имеет существенно различные зависимости от размера его поперечного сечения.

Проводимость длинного трубопровода

Проводимость длинного трубопровода ($L \gg R$) в гидродинамическом режиме определяется вязкостными характеристиками газа и может быть получена из формулы Пуазейля:

$$U_{tr} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\eta L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{T_m}} \quad (1)$$

где P – давление в рассматриваемом сечении трубы (можно рассматривать как среднее по длине вакуумпровода давление $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$, η – вязкость газа, L – длина трубопровода, R – его радиус.

В молекулярном режиме проводимость определяется взаимодействием молекул газа со стенками и может быть получена из формулы Кнудсена:

$$U_{tr} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2)$$

Для промежуточных условий проводимость определяется путём интерполяции зависимостей, полученных в вязкостном и молекулярном режимах.

В случае последовательного соединения разных вакуумпроводов, что обычно бывает в реальных установках, их импедансы суммируются, а суммарная проводимость равна:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{U_{\Sigma}}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{U_i}} \quad (3)$$

где Z_i – импеданс i -го участка вакуумпровода, Z_{Σ} – суммарный импеданс вакуумпровода.

Формулы выше показывают, что для эффективной откачки вакуумной камеры насосом с заданной скоростью откачки нужно выбирать вакуумпроводы как можно шире и как можно короче. В этом случае $U_{\Sigma} \gg S_H$ и из основного уравнения получим:

$$S_o = \frac{S_H U_{\Sigma}}{S_H + U_{\Sigma}}$$

Положим, что за промежуток времени dt давление в откачиваемом объёме V_o снижается на dP_1 . Тогда за промежуток времени dt количество газа поступающего в трубку равно $S_o P_1 dt$, а эта же убыль газа в объёме равна $V_o dP_1$, следовательно:

$$S_o P_1 dt = -V_o dP_1 \quad (6)$$

Перепишем уравнение (6) в виде:

$$dt = -\frac{V_o}{S_o} \frac{dP_1}{P_1} \quad (7)$$

С учетом уравнения (5) для изменения давления со временем получим:

$$dt = -V_o \left(\frac{1}{S_H} + \frac{1}{U} \right) \frac{dP_1}{P_1} \quad (8)$$

Для вычисления длительности откачки по формуле (6) необходимо иметь данные о значении S_H при различных давлениях. В случае $S_o = const$, решение уравнения (6) существенно упрощается и зависимость давления от времени откачки:

$$P(t) = P_1 e^{(-\frac{S_o}{V_o} t)} \quad (9)$$

Постоянная времени откачки $\tau = \frac{V_o}{S_o}$ является мерой эффективности откачной системы.

Пластинчато-роторный насос

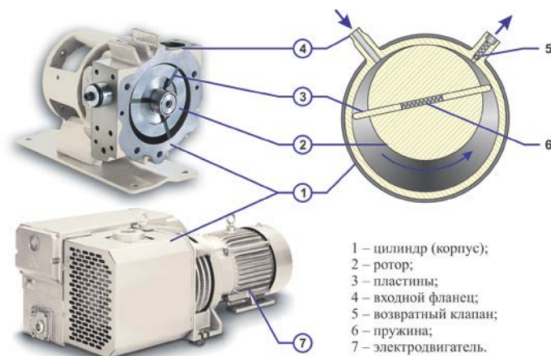
В цилиндрическом корпусе (1) пластинчато-роторного насоса со смещением эксцентрично размещен ротор (2), касающийся корпуса с одной стороны. Ротор снабжен пластинами (3), которые прижимаются к стенкам и скользят по внутренней поверхности. Газ, попадающий на вход (4) проталкивается пластинами и выталкивается из насоса через выпускной клапан (5).

– Преимущества: неприхотлив в работе (может откачивать загрязненную среду, без ущерба для конструктивных

элементов); используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах откачки с низкими требованиями по чистоте откачиваемого объема; используется до 2-х последовательных ступеней.

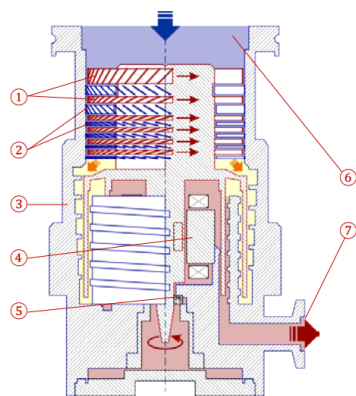
– Недостатки: присутствие в рабочей камере масла, контактирующего с откачиваемой средой (возможно попадание паров в откачиваемый объем) и необходимость периодической его замены; низкий предельный вакуум за счет обратного потока воздуха через выпускные клапаны; малоэффективен для откачки влажных сред (необходимо использовать газобалластное устройство).

– Тип вакуума: средний.



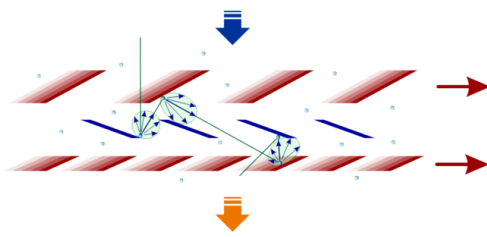
1 – цилиндр (корпус);
2 – ротор;
3 – пластины;
4 – входной фланец;
5 – возвратный клапан;
6 – пружина;
7 – электродвигатель.

Турбомолекулярный насос



1 — ротор, 2 — статор, 3 — корпус насоса, 4 — электродвигатель, 5 — нижний шарикоподшипник, 6 — высоковакуумный входной фланец, 7 — выпускной форвакуумный фланец

Рис. 5. Конструкция турбомолекулярного насоса



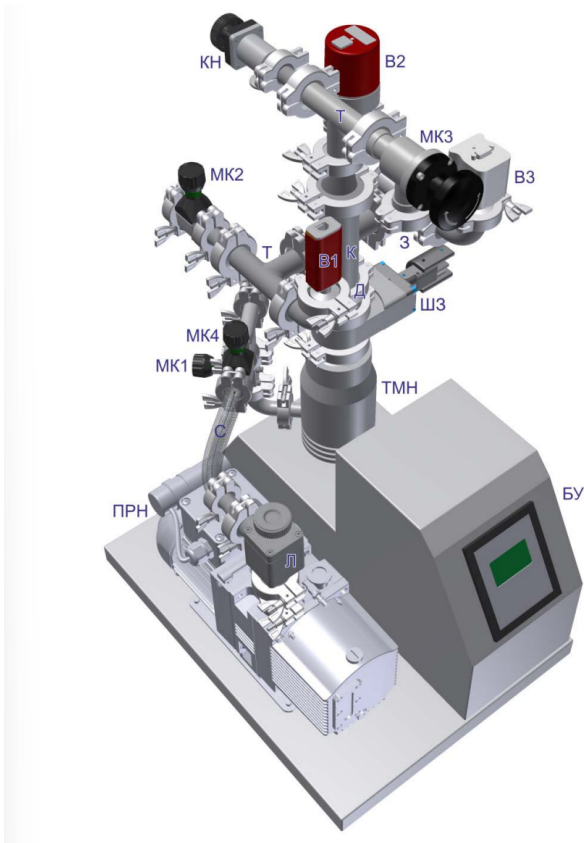
Откачка в турбомолекулярном насосе осуществляется за счет соударения частиц газа с быстро движущимися турбинными лопатками дисков ротора (1) специальной геометрии, которые придают им дополнительный импульс в заданном направлении потока. Между дисками ротора находятся диски статора (2) с обратными лопатками, направляющие поток молекул на следующие диски турбины по оптимальной траектории, минимизируя обратный поток (рис. 6). Каждая пара пластин ротора-статора образует одну ступень. Насос состоит из нескольких ступеней расположенных последовательно, каждая последующая ступень имеет меньшие геометрические размеры, что при постоянном потоке газа приводит к постепенному повышению давления до выпускного форвакуумного. Скорость вращения ротора современных турбомолекулярных насосов достигает нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

– Преимущества: постоянная готовность к работе; быстрый запуск (~ 10 минут на раскручивание турбины); устойчивость к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного); широкий диапазон рабочих давлений (10^7 – 10^1 Па); примерно одинаковая быстрота действия для большинства газов; используется как в системах «сухой» безмасляной откачки с особым требованием чистоты откачиваемого объема, так и с масляными форвакуумными насосами за счёт минимального обратного потока.

– Недостатки: требуется надежная защита вращающейся турбины от любых механических воздействий (пыли, абразивных частиц, вибраций, частых и резких перепадов давления и т. п.), приводящих к износу подвески ротора и разрушению лопаток турбины.

– Тип вакуума: высокий.

Схема установки



Результаты измерений:

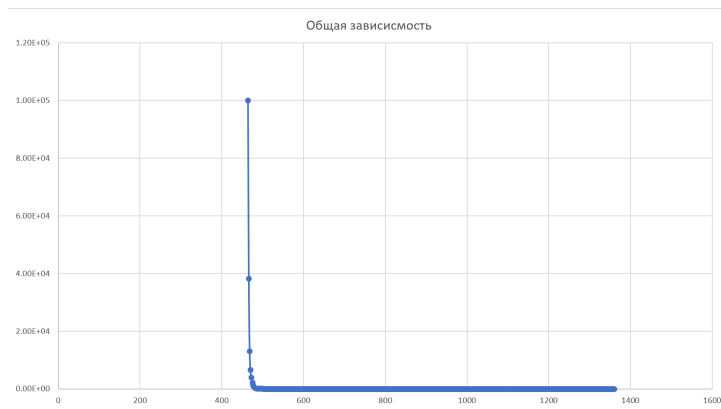
Для начала, пользуясь законом Бойля-Мариотта, определим полный объём установки, высоковакуумной части, форвакуумной магистрали и самого насоса ТМН. Для этого присоединим к крану МК3 сифон с известным объёмом воздуха под атмосферным давлением, а затем поочередно откроем краны МК3, МК2, МК1, впуская запёртый воздух поочередно в исследуемые объёмы и следя за показаниями датчиков.

Первая попытка:								
$V_{syph}, \text{ ml}$	P_{atm}	$V_K, \text{ ml}$	P_3	$V_{fm}, \text{ ml}$	P_2	$V_{nasosa}, \text{ ml}$	P_1	V_o
252	$1 \cdot 10^5$	830	$2.33 \cdot 10^4$	166	$1.94 \cdot 10^4$	55.1	$1.46 \cdot 10^4$	1050
8	$3 \cdot 10^3$	20	$0.07 \cdot 10^4$	5	$0.06 \cdot 10^4$	1.7	$0.04 \cdot 10^4$	30
Вторая попытка:								
$V_{syph}, \text{ ml}$	P_{atm}	$V_K, \text{ ml}$	P_3	$V_{fm}, \text{ ml}$	P_2	$V_{nasosa}, \text{ ml}$	P_1	V_o
252	$1 \cdot 10^5$	710	$2.61 \cdot 10^4$	133	$2.20 \cdot 10^4$	48.5	$1.61 \cdot 10^4$	894, 5
8	$3 \cdot 10^3$	20	$0.07 \cdot 10^4$	4	$0.06 \cdot 10^4$	1.5	$0.04 \cdot 10^4$	30

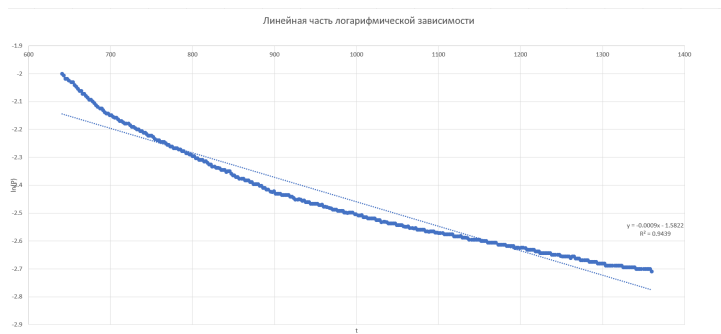
Где погрешность каждого следующего объёма считается по формуле:

$$\delta V_i = V_i \cdot \sqrt{(\frac{\delta V_{i-1}}{V_{i-1}})^2 + (\frac{\delta P_{i-1}}{P_{i-1}})^2 + (\frac{\delta P_i}{P_i})^2}$$

Теперь оценим скорость откачки насоса, для этого возьмём график зависимости давления в капсуле от времени:



Поскольку в первоначальный момент давление велико, скорость откачки очень велика и этот промежуток на не интересует, поэтому рассмотрим в логарфмических координатах инейную часть графика:



Получим уравнение линейной аппроксимации этого графика:

$$y = -0.0009 \cdot x + 3.0229$$

Где угловой коэффициент из формулы (4) равен величине $-\frac{S_o}{V_o} = -\frac{1}{\tau}$

Отсюда получим значение величины τ и вычислим погрешность по МНК:

$$\tau = (1076 \pm 14) \text{ с}$$

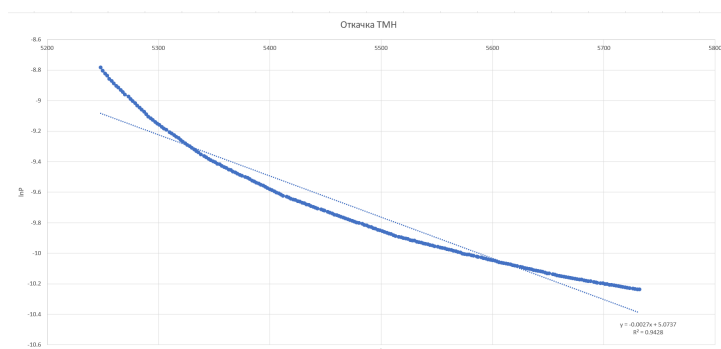
Откуда эффективная скорость откачки:

$$S_o = \frac{V_o}{\tau} = (0.77 \pm 0.06) \frac{ml}{c}$$

Погрешность здесь рассчитывается по формуле:

$$\delta S_o = S_o \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta V_o}{V_o}\right)^2 + \left(\frac{\delta \tau}{\tau}\right)^2}$$

Аналогично оценим скорость откачки турбомолекулярного насоса:



$$y = -0.0027x + 5.0737$$

$$\tau = (349.5 \pm 5.6) \text{ c}$$

$$S_o = \frac{V_o}{\tau} = (0.24 \pm 0.02) \frac{ml}{c}$$

Расчитаем по формуле для Q_n натекание в камере К, для этого перекроем откачку и посмотрим как изменяется давление:

P_H , Па	P_K , мбар	Δt , с	V, ml
$2.96 \cdot 10^{-5}$	$3.79 \cdot 10^{-3}$	214	770

$$Q_n = V \frac{P_K - P_H}{\Delta t} = 1.35 \cdot 10^{-5} \text{ mbarr} \frac{l}{c}$$

$$\delta Q_n = Q_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_K + \delta P_H}{P_K + P_H}\right)^2} \approx 0.08 \cdot 10^{-5}$$

Проверим допустимость величины натекания при различных давлениях в установке:

$S_o, \frac{ml}{c}$	0.24					
P, mbarr	$2.96 \cdot 10^{-5}$	$3.79 \cdot 10^{-3}$	$1.88 \cdot 10^{-3}$	$6.66 \cdot 10^{-2}$	1.35	2.09
$Q, \text{mbarr} \frac{l}{c}$	$7.09 \cdot 10^{-6}$	$9.10 \cdot 10^{-4}$	$4.51 \cdot 10^{-4}$	$1.60 \cdot 10^{-2}$	$3.25 \cdot 10^{-1}$	$5.02 \cdot 10^{-1}$

По условию Q_n долже быть много меньше Q.

Обсуждение результатов и вывод:

Таким образом мы измерили объёмы частей установки (с точностью порядка 5%). Скорость и предел откачки системы пластинчато-роторным и турбомолекулярным насосами (с точностью порядка 8%). Натекание в камере К (с точностью около 6%).

Измерения можно назвать достатончо точными, возникующая погрешность связана с неравномерностью зависимости откачки от времени, натеканием и неидеальностью проводимости трубопроводов и отверстий.

Величину натекани можно считать допустимой лишь при давлениях более $1 \cdot 10^{-3}$. То есть при откачке пластинчато-роторным насосом.