

Лабораторная работа 2.3.1

Современные средства получения и измерения  
вакуума

Красоткина Виктория

27 февраля 2023 г.

# 1 Аннотация

## 1.1 Цель работы

**Цель работы:**

- измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки;
- определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума.

**Используемое оборудование:**

- вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

## 2 Теоретические сведения

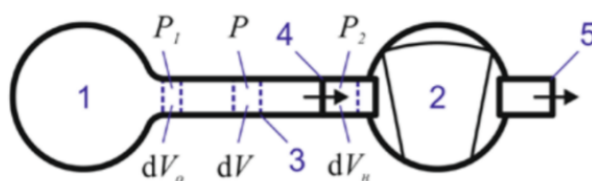
### 2.1 Введение

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе  $\lambda$  сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда  $d$ , в котором газ находится.

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

Предельное остаточное давление (предельный вакуум)  $P_{\text{пр}}$  – 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 – максимально допустимое давление газа на входе насоса.



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

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

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

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Следовательно, быстродействие насоса  $S_n$  определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dT} \quad (2)$$

а эффективная скорость откачки камеры  $S_o$ :

$$S_o = \frac{dV_o}{dT} \quad (3)$$

Падение давления вдоль вакуумпровода  $\Delta P = P_1 - P_2$  определяется его пропускной способностью (проводимостью)  $U$ :

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (4)$$

где  $Q$  – поток газа через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

Величина  $Z$ , обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U} \quad (5)$$

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:

$$P_1 S_o = P S = P_2 S_n = Q \quad (6)$$

Из предыдущих уравнений легко получить, что

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \quad (7)$$

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

Количественной характеристикой течи, является натекание  $Q_n$ , измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t} \quad (8)$$

где  $V$  – замкнутый исследуемый объём;  $P_n, P_k$  – начальное и конечное давление в объеме;  $\Delta t$  – 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  $Q_{\text{н}}(t)$  носит, как правило, линейный характер.

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

$$Q_{\text{н}} \ll Q = P_1 S_0 = P_1 \frac{S_{\text{н}} U}{S_{\text{н}} + U} \quad (9)$$

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:

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока:

1. 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 наряду с поступательным движением всей массы газа, молекулы движутся хаотически со скоростями, подвергающимися случайным изменениям
2. 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.
3. 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.

## 2.2 Проводимость отверстия в стенке

В кнудсеновском режиме проводимость отверстия радиусом  $R$  определяется средним числом молекул, сталкивающихся со стенкой. С точки зрения молекулярно-кинетической теории можно получить

$$\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{v}{4kT}(P_2 - P_1) \quad (11)$$

С другой стороны

$$\nu = \frac{1}{AkT}(P_2 - P_1)U_{\text{отв}} \quad (12)$$

Из формул следует, что

$$U_{\text{отв}} = \frac{Av}{4} = \frac{\pi R^2}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (13)$$

### 2.3 Проводимость длинного трубопровода

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

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\mu L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}} \quad (14)$$

где  $P$  – давление в рассматриваемом сечении трубы (можно рассматривать как среднее по длине вакуумпровода давление  $P = (P_1 + P_2)/2$ ,  $\mu$  – вязкость газа,  $L$  и  $R$  – длина и радиус трубопровода.

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

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (15)$$

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:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{\Sigma Z_i} \quad (16)$$

Формулы 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  $U_{\Sigma} \gg S_{\text{н}}$ :

$$S_o = \frac{S_{\text{н}} U}{S_{\text{н}} + U} = S_{\text{н}} \quad (17)$$

### 2.4 Время откачки

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:

$$dt = -\frac{V_o dP_1}{S_o P_1} \quad (18)$$

В случае  $S_o = const$  имеем

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o}t\right) \quad (19)$$

### 3 Экспериментальная установка и методика работы

Существует множество различных типов вакуумных насосов, целесообразность использования которых варьируется в зависимости от условий получения и требуемой глубины вакуума.

#### 3.1 Мембранный (диафрагменный) насос

В мембранном насосе две или более гибких диафрагмы жестко закреплены на стенках корпуса, образуя герметичные полости изменяемого объема. Диафрагмы приводятся в движение электродвигателем, вращательное движение которого преобразуется в возвратно-поступательное с использованием кривошипно-шатунного механизма. С движением диафрагмы синхронизирована работа впускного и выпускного клапанов. Откачка осуществляется созданием в полости диафрагмы области пониженного давления, за счет чего в нее через впускной клапан поступает газ из откачиваемого объема или предыдущей ступени откачки. При уменьшении объема полости газ уходит через выпускной клапан.

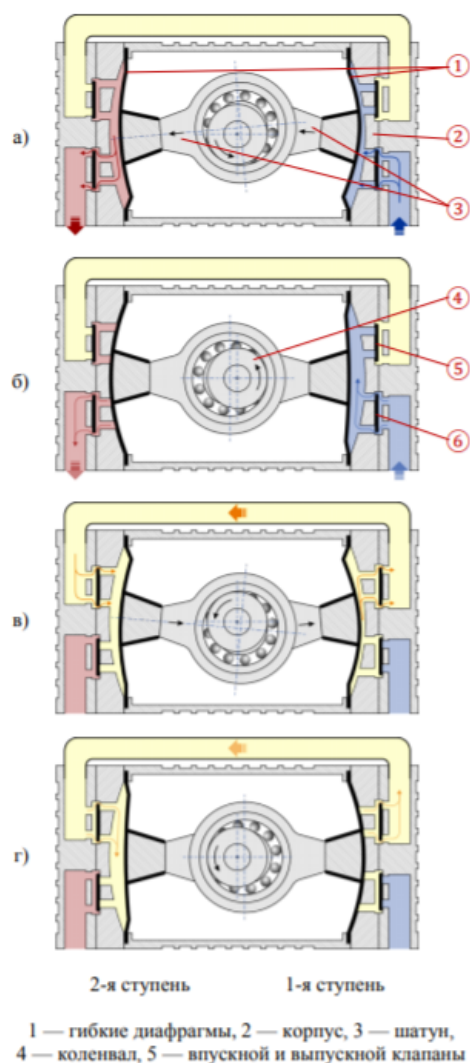
**Преимущества:** отсутствие материалов, загрязняющих рабочий объем насоса и, как следствие, откачиваемый объем: масла, других смазочных веществ, трущихся механизмов; используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах безмасляной (т.н. «сухой») откачки с особым требованием чистоты откачиваемого объема; используется до 4-х последовательных ступеней; низкий уровень шума.

**Недостатки:** низкая скорость откачки за счет ограниченной эластичности диафрагмы; низкий предельный вакуум за счет обратного потока воздуха через выпускные клапаны; ограниченность срока службы сроком функционирования диафрагмы.

**Тип вакуума:** средний.

#### 3.2 Турбомолекулярный насос

Откачка в турбомолекулярном насосе осуществляется за счет соударения частиц газа с быстродвижущимися турбинными лопатками дисков ротора (1) специальной геометрии, которые придают им дополнительный импульс в заданном направлении потока. Между дисками ротора находятся диски статора (2) с обратно обращенными лопатками, направляющие поток молекул на следующие диски турбины по оптимальной траектории, минимизируя обратный поток. 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



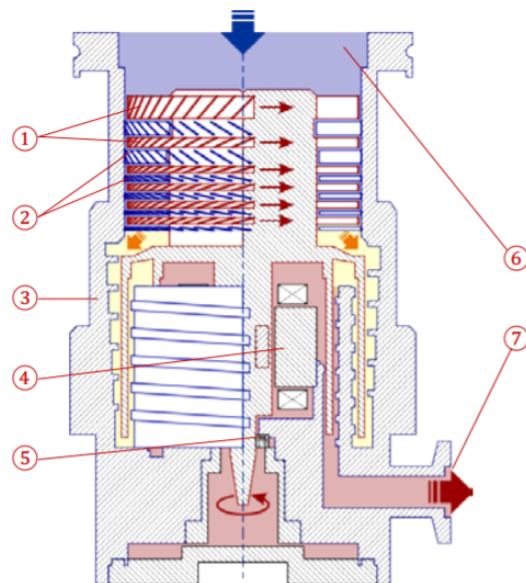
Показаны четыре последовательные фазы работы (а-г)  
с положением мембраны, впускных и выпускных клапанов

Рис. 2: Работа диафрагменного насоса

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.



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

Рис. 3: Конструкция турбомолекулярного насоса

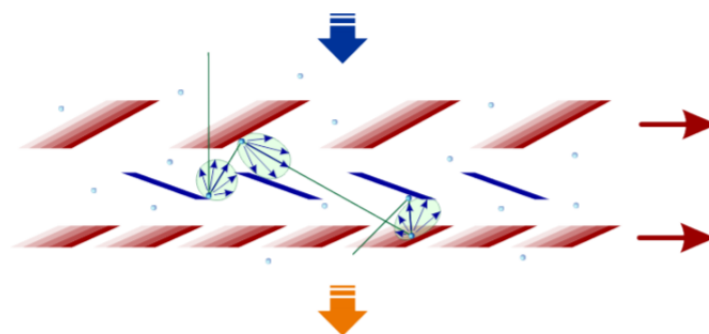


Рис. 4: Принцип работы турбомолекулярного насоса

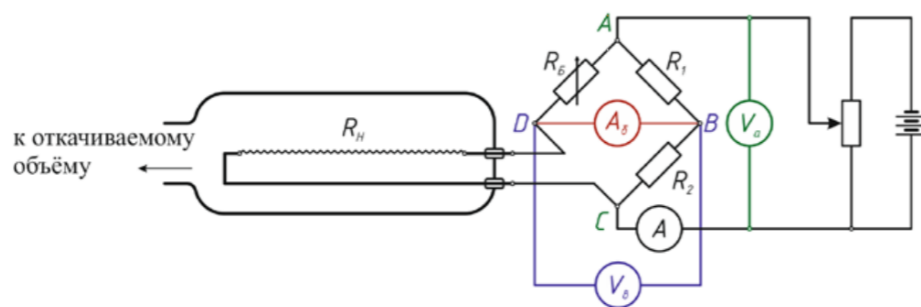
**Тип вакуума:** высокий.

### 3.3 Терморезисторный вакуумметр (Пирани)

Принцип действия тепловых манометров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. Чувствительным элементом терморезисторного датчика является тонкая металлическая нить накала (вольфрам, платина), помещенная в атмосферу откачиваемого газа. Сопротивление нити зависит от её температуры. Нить включена в одно из плеч мостовой схемы и разогрета до нескольких сотен градусов пропускаемым по ней током. Джоулево тепло, выделяемое нитью, отводится в основном через газовую среду со скоростью, зависящей от коэффициента теплопроводности. В зависимости от способа измерения вакуумметр работает в режиме (а) поддержания постоянного сопротивления моста (а значит и температуры нити), (б) постоянного напряжения на клеммах, моста или (в) постоянного тока через мост. Мост изначально сбалансирован при давлении много ниже рабочего диапазона (сопротивление



$R_B$ ).



$R_H$  — сопротивление нити накала;  $R_B$  — сопротивление балансировки;  $V_a$  — вольтметр для измерения напряжения на клеммах A, C в режиме (а);  $A_\delta$  — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (б);  $V_\delta$  — вольтметр для измерения напряжения на клеммах B, D в режиме (в)

Рис. 5: Принципиальная схема терморезисторного вакуумметра (Пирани)

В первом случае (а) напряжение на клеммах , моста автоматически подбирается так, чтобы мост всё время оставался сбалансированным при изменении давления и, тем самым, является мерой давления в системе:

$$P \sim V^2 - V_0^2 \quad (20)$$

где  $V_0$  — — напряжение на клеммах при начальной балансировке. Во втором случае (б) мерой давления служит ток разбалансировки моста, в третьем (в) — напряжение на клеммах B, D.

В области низкого вакуума при  $\lambda \gg d$  коэффициент теплопроводности перестаёт зависеть от давления, а при давлениях менее  $10^{-3}$  Торр основную роль в процессе теплоотвода начинает играть излучение. Оба эти фактора ограничивают применение данного типа датчиков областью среднего вакуума.

**Преимущества:** практически неограниченный срок службы в неагрессивных средах за счёт низкой степени окисления нити при низких температурах нагрева. Способность выдерживать прорыв атмосферы.

**Недостатки:** при давлениях более 1 мбар показания существенно зависят от типа газа; тепловая инерция — запаздывание показаний при резком изменении давления; необходимость перекалибровки датчика в связи с изменением сопротивления после длительного времени эксплуатации.

**Тип вакуума:** средний.

### 3.4 Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)

Измерительный объём магнетронного датчика находится между катодом и анодом, между которыми приложено напряжение ( $\sim 2 - 6$  кВ), а также помещен в постоянное магнитное поле ( $\sim 0,2 - 2$  кГс). Случайным образом возникшие вблизи катода электроны (например, вследствие автоэлектронной эмиссии) будут двигаться к аноду под действием скрещенных электромагнитных полей по удлиненной траектории.

При этом повышается вероятность соударения электронов с молекулами откачиваемого газа и их ионизация. Образовавшиеся ионы ускоряются в электрическом поле анодно-катодного промежутка и выбивают из материала катода вторичные электроны (вторичная электронная эмиссия), которые также ионизируют газ, двигаясь к аноду по сложной циклической траектории.

В результате описанного процесса возникает электрический разряд, ток которого в достаточно широком диапазоне зависит от давления. На диапазон измеряемых давлений существенно влияет конструкция магнетронного датчика. В инверсно-магнетроном датчике анодом служит центральный металлический стержень, а катодом — осесимметричная обечайка, магнитное поле создается внешним постоянным кольцевым магнитом.

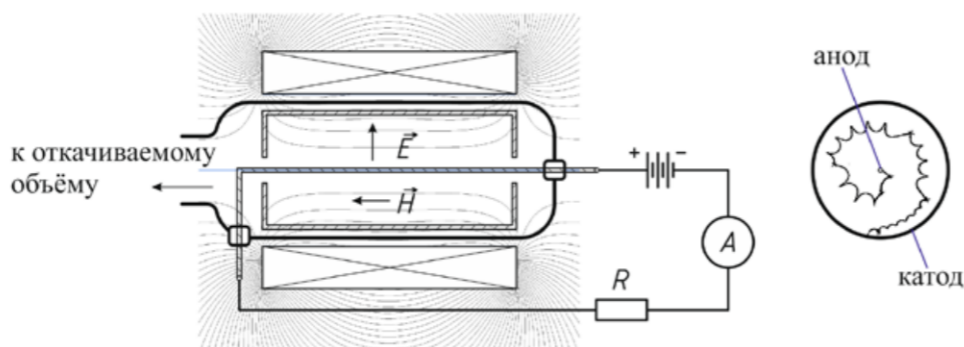


Рис. 6: Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в них

**Преимущества:** могут включаться в широком диапазоне давлений, т.к. не содержат нагретых деталей и не боятся окисления. Устойчивы к прорыву атмосферы. Применяются в автоматизированных технологических процессах вследствие простоты эксплуатации и нечувствительности к внешним воздействиям.

**Недостатки:** Не желательно длительное использование в диапазоне среднего вакуума особенно в атмосфере аргона, т.к. это приводит к распылению материала катода потоком ионов, что, в свою очередь, может стать причиной короткого замыкания и сбоев датчика. Не желательно использование в системах с масляным типом откачки, т.к. углеводороды со временем образуют устойчивую пленку на поверхности катода, которая искажает показания датчика. Является источником магнитного поля, что может влиять на работу других приборов.

**Тип вакуума:** высокий, сверхвысокий.

### 3.5 Рабочая установка

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco с диафрагменным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine, и вакуумных быстроразъёмных компонентов. Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком

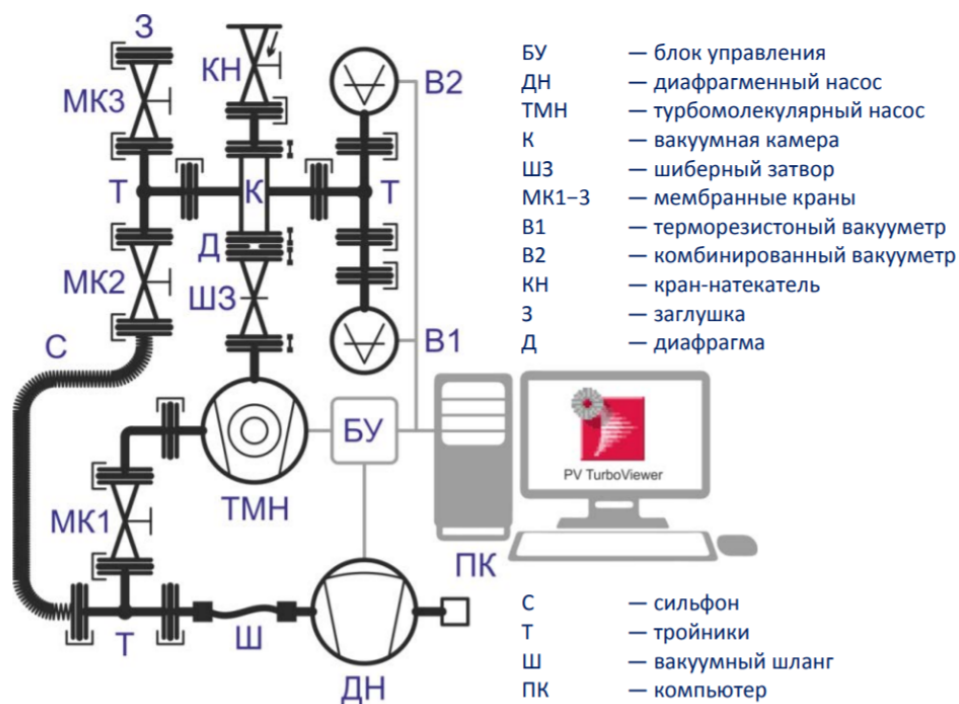


Рис. 7: Схема экспериментального стенда

управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer.

,X,

,X,,X,