

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 2.3.1А

Современные средства получения и измерения вакуума

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-109

Долгопрудный

2022

1 Аннотация

Цель работы: определить откачиваемый объём и измерить скорость откачки форвакуумным насосом; измерить скорость откачки турбомолекулярным насосом и определить предельный вакуум; определить давление перехода в молекулярный режим; исследовать зависимость мощности турбонасоса от давления в камере.

2 Теоретические сведения

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 $\lambda \sim 10^{-5}$ 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 ($P < P_{атм}$). 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 $\lambda \gg d$ (рис. 1). 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*.

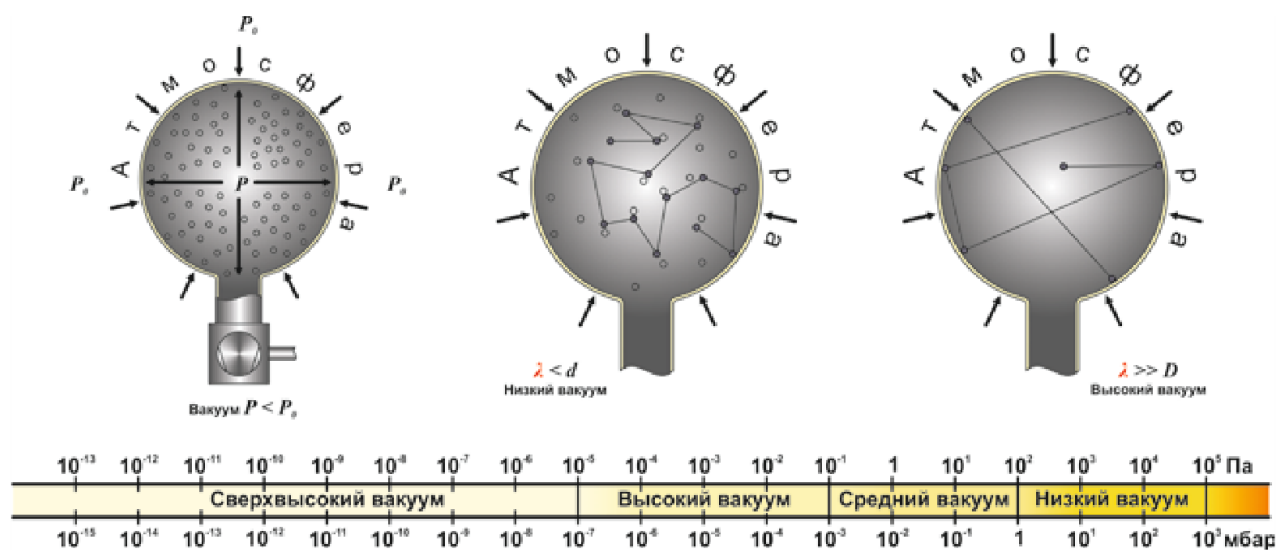
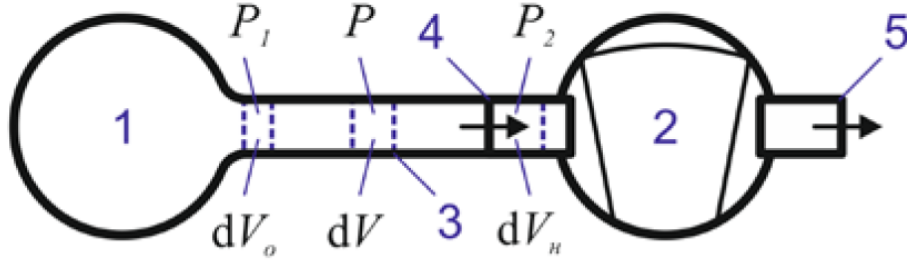


Рис. 1: Понятие о вакууме

2.1 Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы (рис. 2).

Здесь и далее L - единица измерения длины, M - единица измерения массы, T - единица измерения времени.



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

Рис. 2: Простейшая вакуумная система

1. **Предельное остаточное давление** (предельный вакуум) $P_{\text{пр}}[L^{-1}MT^{-2}]$ – 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.
2. **Наибольшее выпускное давление** $[L^{-1}MT^{-2}]$ - максимально допустимое давление газа на входе насоса.
3. **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 $S_{\text{н}}$ определяется как:

$$S_{\text{н}} = \frac{dV_{\text{н}}}{dt}.$$

А эффективная скорость откачки камеры S_0 :

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt}.$$

4. 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.

5. Величина $Z[L^{-3}T]$, 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:

$$P_1 S_0 = PS = P_2 S_n = Q.$$

6. Основное уравнение вакуумной техники

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}. \quad (1)$$

7. Количественной характеристикой течи, является **натекание** $Q_n [L^2 MT^{-3}]$, измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = \frac{P_\kappa - P_n}{\Delta t},$$

где V – замкнутый исследуемый объём; P_n, P_κ – 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 объёме допустимым считается натекание:

$$Q_n \ll Q = P_1 S_0 = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U}.$$

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 наряду 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.

2.2 Проводимость отверстия в стенке

В кнудсеновском режиме проводимость отверстия радиусом R определяется средним числом молекул, сталкивающихся со стенкой:

$$\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{1}{4}n_2\vartheta - \frac{1}{4}n_1\vartheta = \frac{1}{4}\frac{P_2}{kT}\vartheta - \frac{1}{4}\frac{P_1}{kT}\vartheta = \frac{1}{4}\frac{\vartheta}{kT}(P_2 - P_1),$$

с другой стороны:

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{1}{A} \left(\frac{dN_2}{dt} - \frac{dN_1}{dt} \right) = \frac{1}{A} \left(\frac{d(n_2V)}{dt} - \frac{d(n_1V)}{dt} \right) = \frac{(n_2 - n_1)}{A} \frac{dV}{dt} = \\ &= \frac{1}{A} \left(\frac{P_2}{kT} - \frac{P_1}{kT} \right) \frac{dV}{dt} = \frac{1}{AkT}(P_2 - P_1)U_{отс},\end{aligned}$$

где ν – число молекул пролетающих через единицу площади отверстия за единицу времени, A – площадь отверстия, n – концентрация молекул, ϑ – их средняя скорость, T – температура газа, k – постоянная Больцмана, индексы 2, 1 относятся к потокам молекул по разные стороны отверстия.

Таким образом, получаем выражение для проводимости отверстия:

$$U_{отс} = \frac{1}{4}A\vartheta = \frac{1}{4}\pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{\frac{T}{m}},$$

где R – радиус отвестия, m - масса молекулы газа.

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:

$$U_{тр} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\eta L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}},$$

где P – давление в рассматриваемом сечении трубы (можно рассматривать как среднее по длине вакуумпровода давление $P = (P_1 + P_2)/2$, 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:

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

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:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{\Sigma Z_i},$$

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

Приведённые выше 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 $U_{\Sigma} \gg S_n$ и из (1) получим:

$$S_0 = \frac{S_n U_{\Sigma}}{S_n + U_{\Sigma}} = \frac{S_n}{\frac{S_n}{U_{\Sigma}} + 1} \approx S_n.$$

С другой стороны выбирать насос с производительностью $U_{\Sigma} \ll S_n$ не целесообразно, поскольку в этом случае скорость откачки будет определяться, в основном, проводимостью вакуумпровода:

$$S_0 = \frac{S_n U_{\Sigma}}{S_n + U_{\Sigma}} = \frac{U_{\Sigma}}{1 + \frac{U_{\Sigma}}{S_n}} \approx U_{\Sigma}.$$

Выполнение условия $U_{\Sigma} \gg S_n$ особенно существенно в случае высоковакуумной откачки, или кнудсеновском режиме течения.

2.4 Время откачки

Положим, что за промежуток dt давление в откачиваемом объеме V_0 снижается на dP_1 (рис. 2). Тогда за промежуток времени dt количество газа, поступающего в трубу равно $S_0 P_1 dt$, а эта же убыль газа в объеме равна $V_0 dP_1$, следовательно

$$S_0 P_1 dt = -V_0 dP_1.$$

Тогда:

$$dt = -\frac{V_0}{S_0} \frac{dP_1}{P_1}.$$

С учётом уравнения (1) для изменения давления со временем получим:

$$dt = -V_0 \left(\frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \right) \frac{dP_1}{P_1}.$$

В случае $S_0 = const$, решение уравнения существенно упрощается и зависимость давления от времени откачки:

$$P(t) = P_1 \exp \left(-\frac{S_0}{V_0} t \right).$$

Постоянная времени откачки $\tau = V_0/S_0$ является мерой эффективности откачной системы.

3 Методика измерений

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 управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer8.

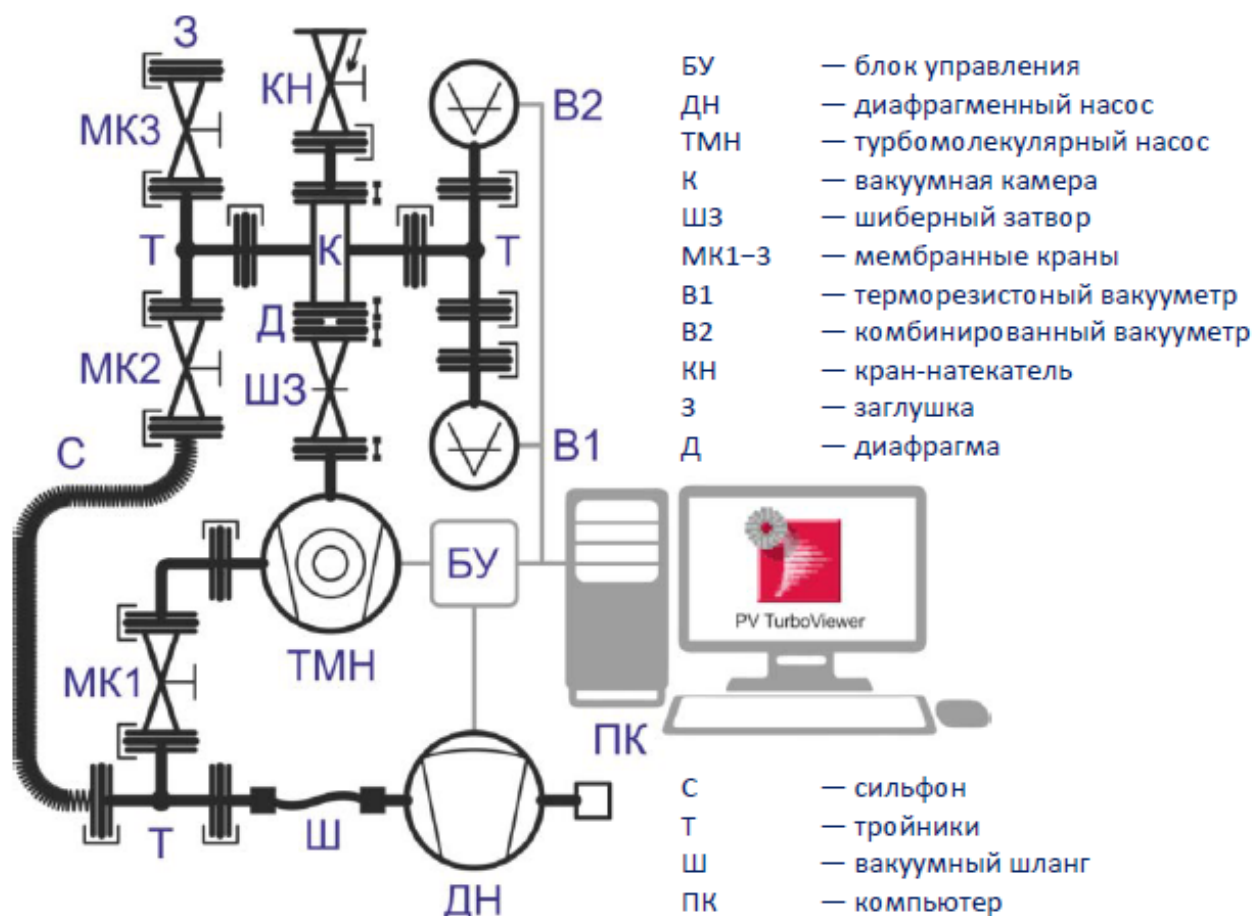


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

Вакуумный пост Pfeiffer Vacuum HiCube 80 Eco (PM S03 555 A) выполнен на базе диафрагменного форвакуумного насоса MVP 015 (ДН) и турбомолекулярного насоса HiPace 80 (ТМН). Откачка вакуумной камеры (К) может происходить как двумя насосами (ТМН и ДН) через шиберный затвор (ШЗ) и мембранный кран 1 (МК1), так и только форвакуумным насосом (ДН) по схеме «байпас» (англ. bypass — обходной путь), выполненной на основе вакуумных компонентов: сильфона (С), мембранного крана 2 (МК2), тройников (Т), переходников, шланга (Ш). Для контроля и измерения давления в вакуумной камере используются цифровой вакуумметр PPT 100 (В1) типа Пирани (терморезисторный) и комбинированный вакуумметр MPT 100 (В2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон). Контролируемый напуск воздушной атмосферы в камеру осуществляется через кран-натекатель EVN 116 (КН) с регулируемым потоком. Дополнительный выход с краном 3 (МК3) закрыт заглушкой (З) и служит для присоединения дополнительного объема в случае необходимости.

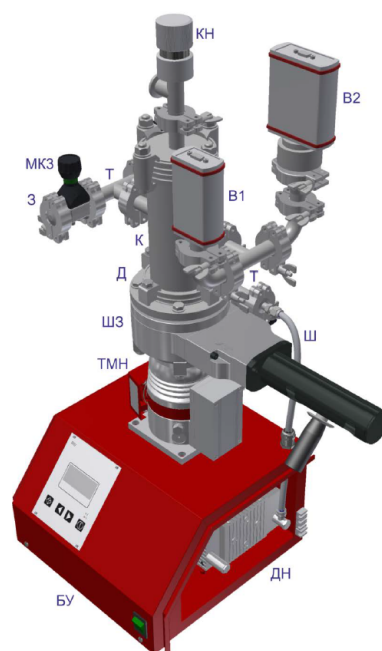


Рис. 4: Внешний вид экспериментальной установки

4 Используемое оборудование

1. Безмасляный высоковакуумный откачной пост Pfeiffer Vacuum;
2. Компьютер;

5 Результаты измерений и обработка данных

Начальные условия и параметры установки:

$$P_{\text{атм}} = 760 \text{ торр}$$

$$V_1, V_2 = 775 \pm 10 \text{ см}^3$$

$$\frac{L}{S} = 5,3 \pm 0,1 \text{ см}^{-1}$$

6 Обсуждение результатов и выводы