

## Лабораторная работа 2.3.1

### Получение и измерение вакуума

14 апреля 2021 г.

Старченко Иван Александрович

**Цель работы:** 1) измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума.

**Используемое оборудование:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термодинамическим и ионизационным.

## 1. Теоретические сведения

### 1.1. 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)  $P_{пр}$  – 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.

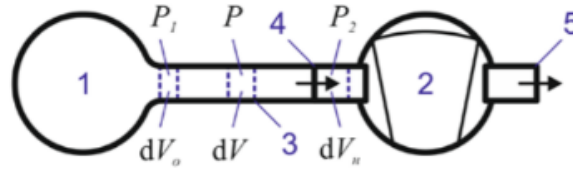
Наибольшее выпускное давление – максимально допустимое давление газа на входе насоса.

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:

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



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

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

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 объёме;  $\Delta t$  – 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  $Q_n(t)$  носит, как правило, линейный характер.

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

$$Q_n \ll Q = P_1 S_o = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U} \quad (9)$$

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.

## 1.2. 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

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

## 1.3. 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  $U_{\Sigma} \gg S_{\text{н}}$ :

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

## 1.4. Время откачки

Положим, что за промежуток времени  $dt$  давление в откачиваемом объеме  $V_o$  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 объеме равна  $V_o dP_1$ , следовательно:

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

В случае  $S_o = \text{const}$  имеем

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

## 2. Экспериментальная установка и методика работы

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

### 2.1. 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.

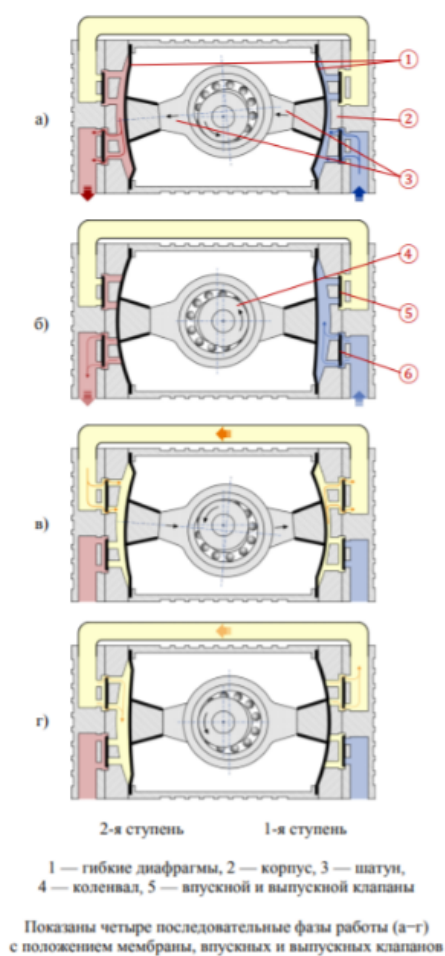


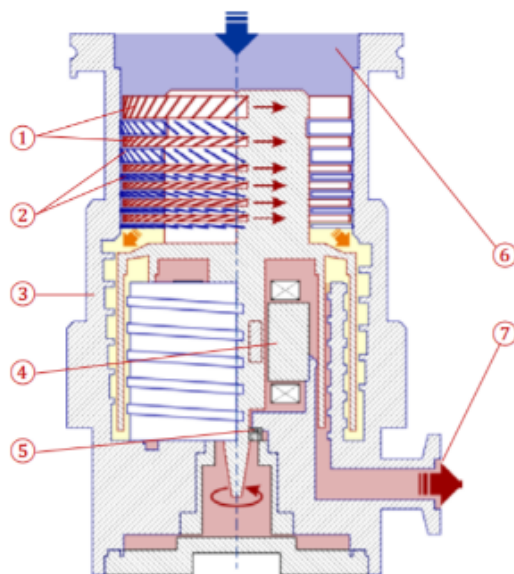
Рис. 2: Работа диафрагменного насоса

**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.

## 2.2. Турбомолекулярный насос



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

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 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 турбомолекулярных на-

сосов достигает нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

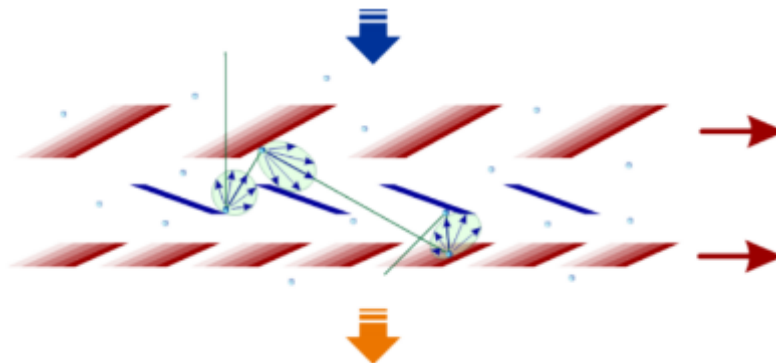


Рис. 4: Принцип работы турбомолекулярного насоса

**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.

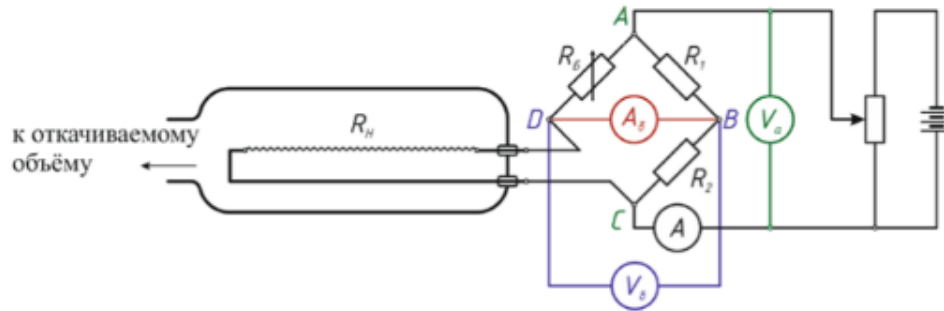
**Тип вакуума:** высокий.

## 2.3. 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);  $A$  — амперметр для измерения тока разбалансировки моста в режиме (б);  $V_b$  — 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.

## 2.4. 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.

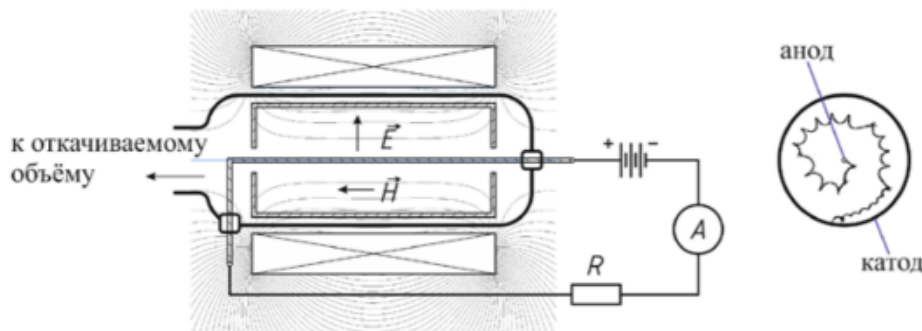


Рис. 6: Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в них

**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.

## 2.5. Рабочая установка

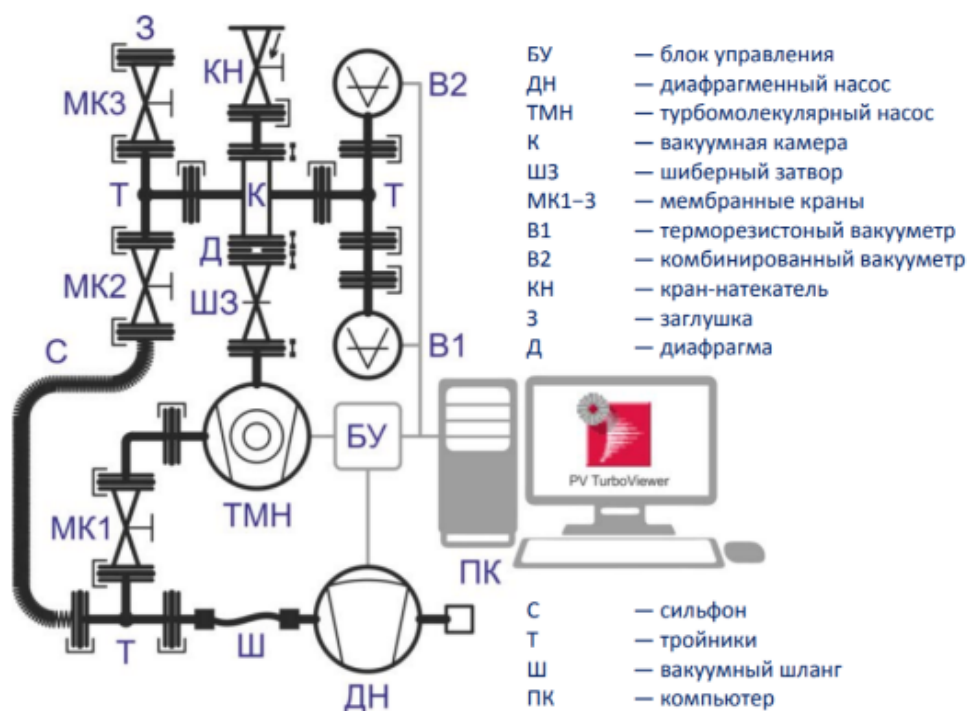


Рис. 7: Схема экспериментального стенда

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 TurboViewer.

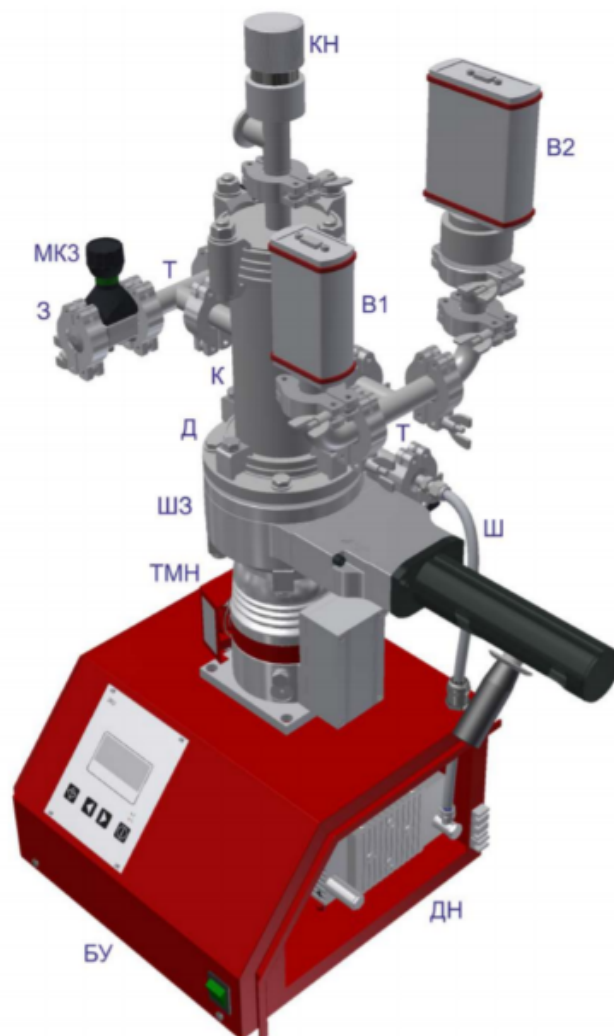


Рис. 8: Внешний вид экспериментального стенда

### 3. Измерения и обработка данных

#### 3.1. Подготовка к работе и подключение системы управления

Для начала работы с экспериментальной установкой подготовим всё для снятия измерений. Для этого подготовим все краны, предварительно открыв их, далее включим программу на компьютере, управляющую насосами и вакууметрами.

#### 3.2. Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом

Для обработки данных необходимо знать объёмы кранов установки. Для определения объемов частей установки (объем вакуумной камеры –  $V_K$ , объем форвакуумной магистрали + объем ТМН –  $V_{ф.м.} + V_{ТМН}$  воспользуемся законом Бойля-Мариотта. Для этого необходимо определить давления в различных состояниях установки (исследовать различные части установки).

Присоединяя часть известного объёма к установке, можно измерить давление до и после, из закона Бойля-Мариотта получить сам объём кранов установки.

Для этого сделаем следующее:

1. Откачаем установку форвакуумным насосом ДН.
2. Присоединим к установке сильфон с воздухом при атмосферном давлении.
3. Выравним давления в сильфоне С и вакуумной камере К экспериментального стенда.
4. Выравним давление вакуумной камеры К и форвакуумной магистрали установки.
5. Выравним давление во всей установке, включая объем турбомолекулярного насоса ТМН.
6. Зафиксируем установившиеся показания вакуумметров.

На каждом этапе выравнивания давления фиксируем его. Для лучшей точности было проведено 3 измерения, результаты которых занесены в таблицу. Значения погрешностей определяются с формул погрешностей прямых измерений.

1		2		3	
$p$ , мбар	$\sigma_p$ , мбар	$p$ , мбар	$\sigma_p$ , мбар	$p$ , мбар	$\sigma_p$ , мбар
3,2	0,08	3,5	0,06	3,2	0,03
190	3	196	5	194	6
140	3	144	5	145	6

Таблица 1: Результаты измерения давления при различных конфигурациях системы.

Используя закон Бойля-Мариотта, получаем соотношения:

$$V_K = \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{p_2 - p_1} V_{\text{сильф}}; \quad (21)$$

$$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}} = \frac{(p_3 - p_2)(V_K + V_{\text{сильф}})}{p_1 - p_3}; \quad (22)$$

Используя соотношения (21, 22) определим объемы составных частей установки, а также погрешности косвенных измерений данных величин. Значения занесем в таблицу (2). В проделанном эксперименте значение объёма сильфона  $V_{\text{сильф}} = 265$  мл.

Измерение	$V_K, \text{см}^3$	$\sigma_{V_K}, \text{см}^3$	$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}}, \text{см}^3$	$\sigma_{V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}}}, \text{см}^3$
1	1149	40	517	17
2	1107	55	508	26
3	1120	60	479	39

Таблица 2: Результаты измерения объемов составных частей установки с погрешностью косвенного измерения

Для объёмов имеем:

$$V_K = (1125 \pm 49) \text{ мл}, \quad \varepsilon_{V_K} = 4.36 \% \quad (23)$$

$$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}} = (501 \pm 27) \text{ мл}, \quad \varepsilon_{V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}}} = 5.39 \% \quad (24)$$

### 3.3. Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом

Теперь сделаем следующее:

1. Отсоединим сильфон от установки.
2. Откачаем установку форвакуумным насосом ДН.
3. Откачаем объём турбомолекулярным насосом ТМН.
4. Видно, что терморезисторный вакуумметр 1 достиг своего предела измерений, в то время как комбинированный вакуумметр 2 (точнее его магнетронная часть) продолжает отображать корректное давление в системе. Зафиксируйте предельное давление в высоковакуумной части установки и время откачки установки насосом ТМН.
5. Определим уровень течей и скорость откачки системы. Для этого закроем шибер ШЗ, при этом давление в системе начнёт повышаться за счёт наличия течей. Получим таким образом зависимость показаний вакуумметра 2 от времени. Когда давление превысит  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар, снова откроем шибер. Получим зависимость показаний вакуумметра 2 от времени после открытия шибера. Снова зафиксируем предельное давление. Занесем в таблицу сразу  $\ln(P)$  от  $t$ .

t, c	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\ln(P)$	4.7	4.51	4.25	4.16	4.07	3.98	3.73	3.64	3.52
t, c	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$\ln(P)$	3.47	3.39	3.19	2.97	2.92	2.75	2.70	2.66	2.48
t, c	38	40	42	44	46	48	50	52	54
$\ln(P)$	2.43	2.27	2.19	2.13	2.07	2.01	1.96	1.94	1.86

Таблица 3: Данные для первого графика

Мы получили зависимость  $P(t)$ , отсюда строим график  $\ln(P)(t)$  (приведен в конце) и находим параметры полученной кривой методом МНК:

$$\tau = 18,83 \text{ с}, \Delta\tau = 0,42 \text{ с} \quad (25)$$

Отсюда легко находим следующее ( $S_n = 138,9 \text{ мл/с}$ )

$$S_o = \frac{V_o}{\tau} = \frac{V_K}{\tau} = 59,75 \text{ мл/с} \quad (26)$$

$$\Delta S_o = \frac{\Delta V_K}{\tau} + \frac{\Delta\tau V_K}{\tau^2} = 3,93 \text{ мл/с} \quad (27)$$

$$U = \frac{S_{\text{н}} S_{\text{о}}}{S_{\text{н}} - S_{\text{о}}} = 104,86 \text{ мл/с} \quad (28)$$

$$\Delta U = 6,89 \text{ мл/с} \quad (29)$$

В итоге

$$S_{\text{о}} = (59,75 \pm 3,93) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon_{S_{\text{о}}} = 6.58 \% \quad (30)$$

$$U = (104,86 \pm 6,89) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon_U = 6.57 \% \quad (31)$$

### 3.4. Измерение влияния течи на вакуум

Продельвая аналогичные действия откачки с помощью ТМН, получим следующую таблицу (для того, чтобы убедиться в повторяемости результатов, на самом деле было проделано 3 эксперимента, которые имеют одинаковый результат) и из неё строим график, приведем его в конце:

t, с	2	4	6	8	10	12	14	16	18
ln(P)	-9.6	-9.62	-9.66	-9.67	-9.69	-9.73	-9.76	-9.77	-9.79

t, с	20	22	24	26	28	30	32	34	36
ln(P)	-9.84	-9.86	-9.88	-9.89	-9.90	-9.91	-9.97	-9.99	-9.98

t, с	38	40	42	44	46	48	50	52	54
ln(P)	-10.00	-10.06	-10.08	-10.09	-10.11	-10.12	-10.16	-10.16	-10.18

t, с	56	58	60	62	64	66	64
ln(P)	-10.18	-10.18	-10.21	-10.21	-10.21	-10.23	-10.23

Таблица 4: Данные для второго графика

$$\tau = 103,24 \text{ с}, \quad \Delta\tau = 8,93 \text{ с} \quad (32)$$

Отсюда легко находим следующее ( $S_{\text{н}} = 138,9 \text{ мл/с}$ )

$$S_{\text{о}} = \frac{V_{\text{о}}}{\tau} = \frac{V_{\text{К}}}{\tau} = 10,30 \text{ мл/с} \quad (33)$$

$$\Delta S_{\text{о}} = \frac{\Delta V_{\text{К}}}{\tau} + \frac{\Delta\tau V_{\text{К}}}{\tau^2} = 1,11 \text{ мл/с} \quad (34)$$

$$U = \frac{S_{\text{н}} S_{\text{о}}}{S_{\text{н}} - S_{\text{о}}} = 10,31 \text{ мл/с} \quad (35)$$



$$\Delta U = 1,28 \text{ мл/с} \quad (36)$$

В итоге

$$S_o = (10.30 \pm 1.11) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon_{S_o} = 10.78 \% \quad (37)$$

$$U = (10.31 \pm 1.28) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon_U = 12.41 \% \quad (38)$$

В данном случае  $S_n \gg S_o$ .

Сравним полученное значение с оценкой, выведенной для проводимости отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{Av}{4} = \frac{\pi R^2}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim 30 \text{ мл/с} \quad (39)$$

Порядок величин совпадает, значит полученное значение имеет смысл. В оценке были использованы радиус  $R = 1 \text{ см}$  и температура  $T = 300 \text{ К}$ .

Определим уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН. Для этого удобно взять часть графика, где наблюдается линейная зависимость.

$$Q_n = V \frac{dP}{dt} = 0,030 \text{ мл} \cdot \text{мбар/с} \ll PS_o \quad (40)$$

Проверка показывает, что в данном случае  $Q_n \ll Q$ , что является допустимым значением уровня течей по ухудшению вакуума. (Давление берём среднее из графика в качестве оценки).

Заметим, что результаты получились довольно близки к теоретическим значениям.

### 3.5. Проверка используемой модели течения

Оценим число Кнудсена для предельных давлений после использования ДН и ТМН для создания вакуума, зная, что диаметр молекул воздуха равен  $0,365 \text{ нм}$ .

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \sim \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n\sqrt{V}} = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma p\sqrt{V}} \quad (41)$$

$$Kn_{\text{ДН}} = 8 \cdot 10^{-4} \quad (42)$$

$$Kn_{\text{ТМН}} = 300 \quad (43)$$

Видно, что при первом значении давления реализуется гидродинамический режим течения, а уже при втором значении молекулярный режим течения.

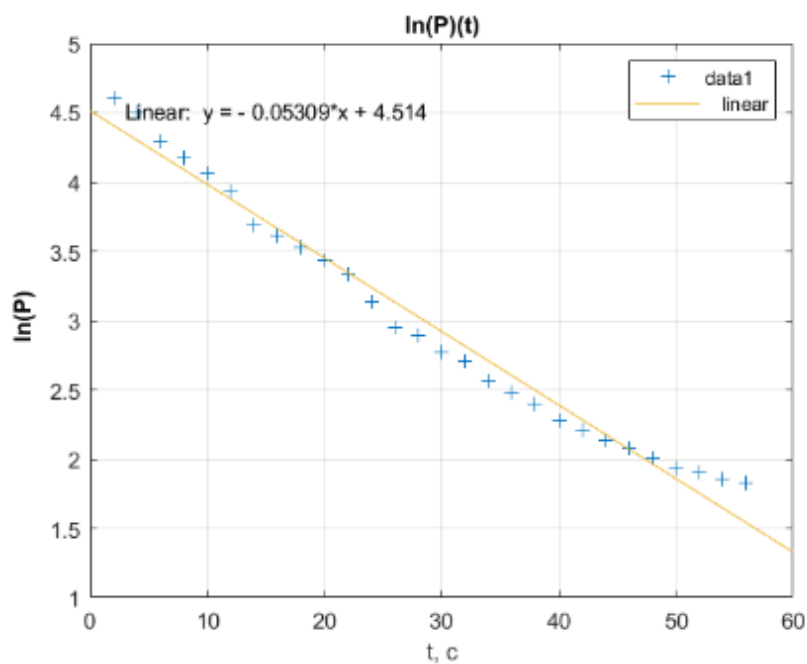
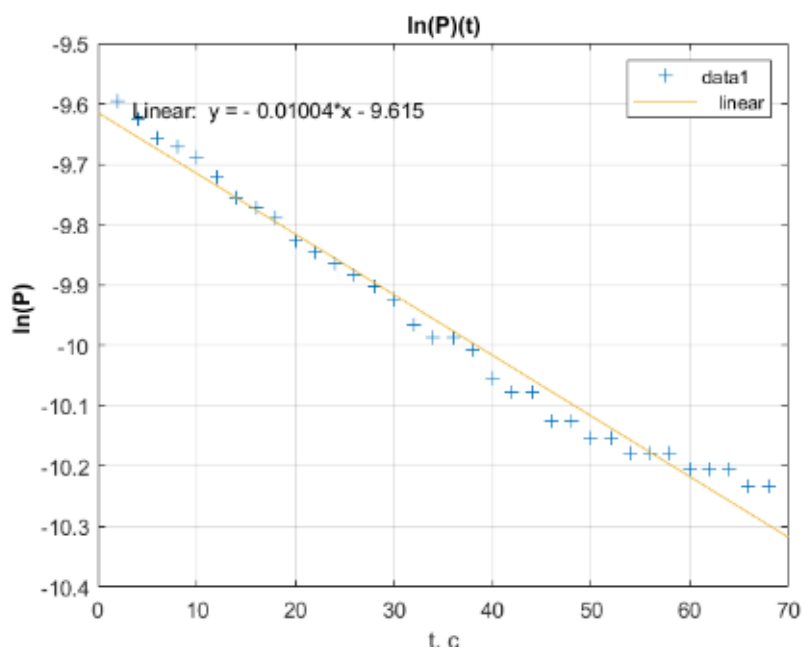
## 4. Заключение

В результате проделанного эксперимента были изучены основные современные способы получения вакуума, изучены численные характеристики используемых насосов, а также определены скорости откачки системы в стационарном режиме и по ухудшению и улучшению вакуума.

## 5. Список используемой литературы

- Гладун А. Д. Лабораторный практикум по общей физике. Термодинамика и молекулярная физика
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)

## 6. Графики

Рис. 9: График зависимости  $\ln(P)(t)$  для ДНРис. 10: График зависимости  $\ln(P)(t)$  для ТМН