

Лабораторная работа 2.3.1.

Тема: получение и измерение вакуума при
турбомолекулярной откачке

Артамонов Кирилл, Б01-005
artamonov.ks@phystech.edu
МФТИ, 7 апреля 2021 г.

Введение

Цель работы:

- 1) Измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки
- 2) Определение скорости откачки системы в стационарном состоянии

Экспериментальная установка

Общая схема

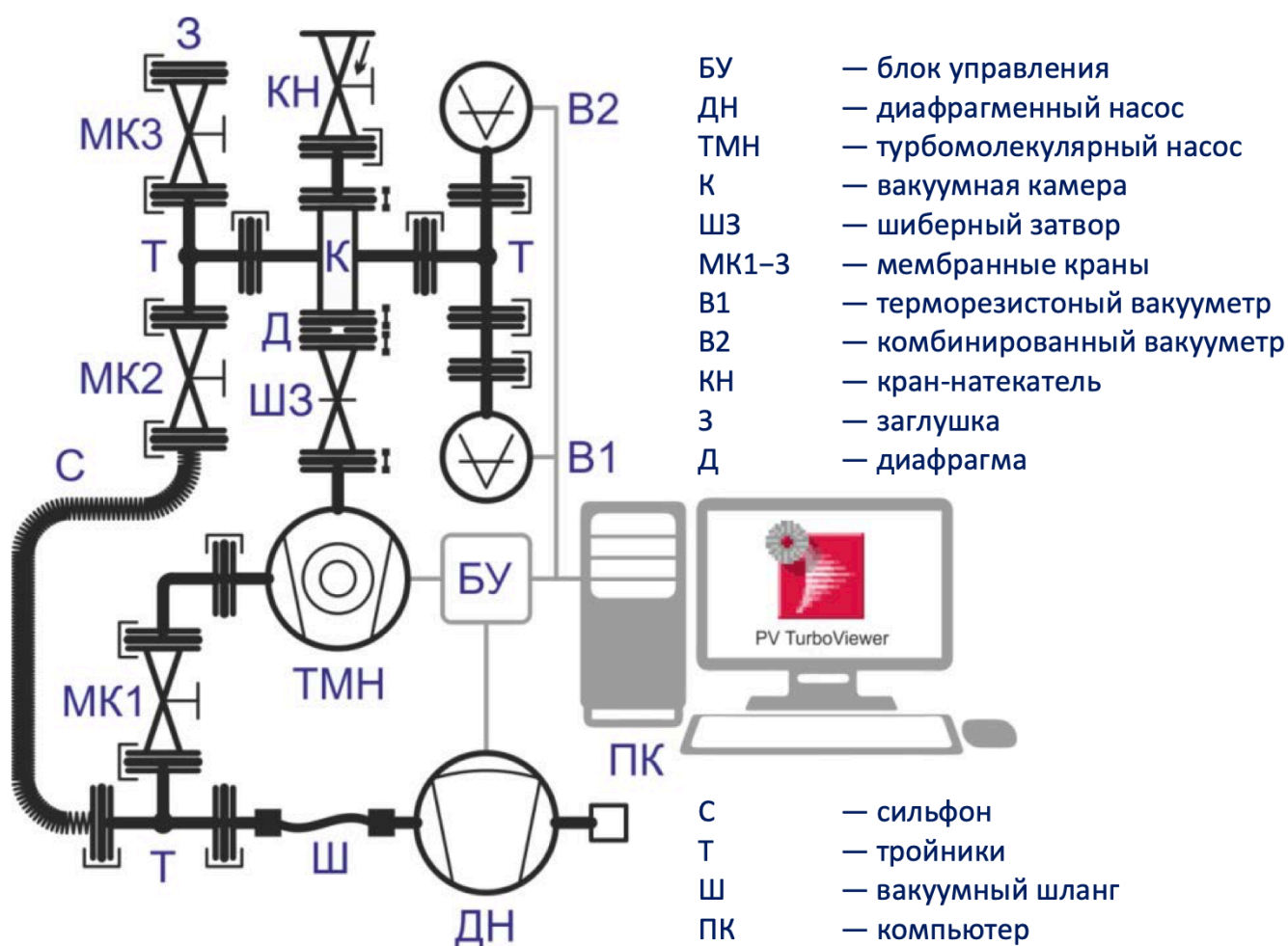


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

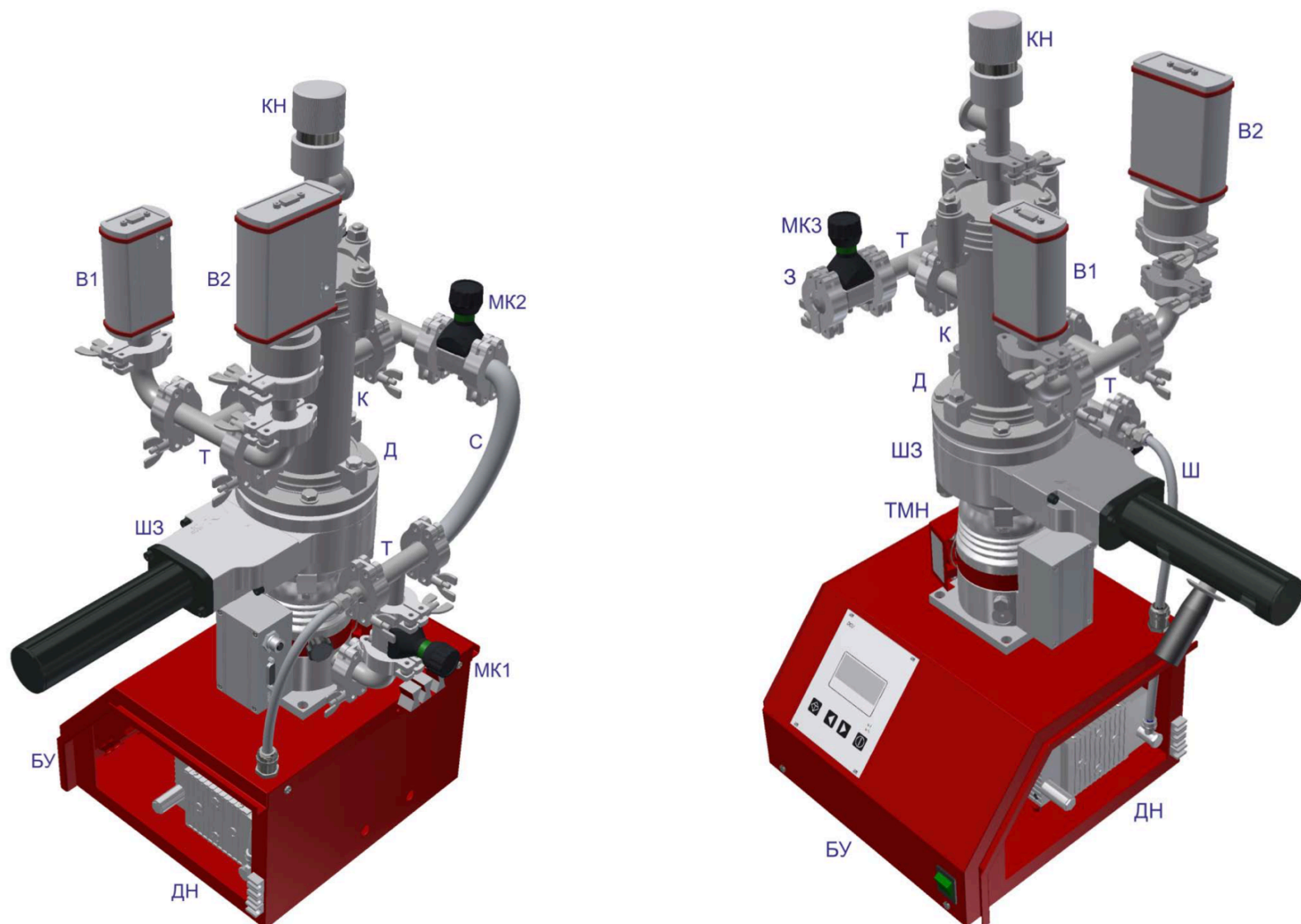
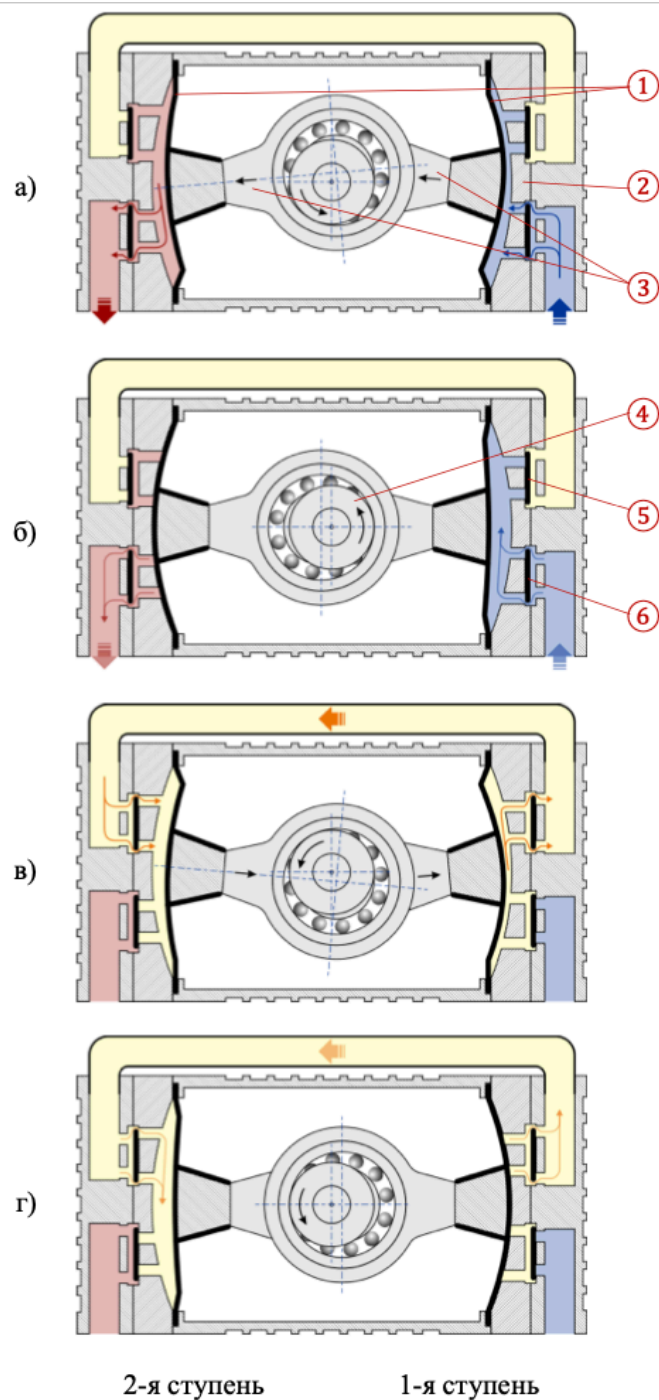


Рисунок 2. Экспериментальная установка с разных ракурсов

Мембранный (диафрагменный) насос

В мембранном насосе две или более гибких диафрагмы (1) (рис. 4) жестко закреплены на стенках корпуса (2), образуя герметичные полости изменяемого объема. Диафрагмы приводятся в движение электродвигателем, вращательное движение которого преобразуется в возвратно-поступательное с использованием кривошипно-шатунного механизма (3, 4). С движением диафрагмы синхронизирована работа впускного и выпускного клапанов (5). 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.



1 — гибкие диафрагмы, 2 — корпус, 3 — шатун,
4 — коленвал, 5 — впускной и выпускной клапаны

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

Рисунок 3. Схема и принцип работы двухступенчатого диафрагмального вакуумного насоса.

– Преимущества: отсутствие материалов, загрязняющих рабочий объем насоса и, как следствие, откачиваемый объем: масла, других смазочных веществ, трущихся

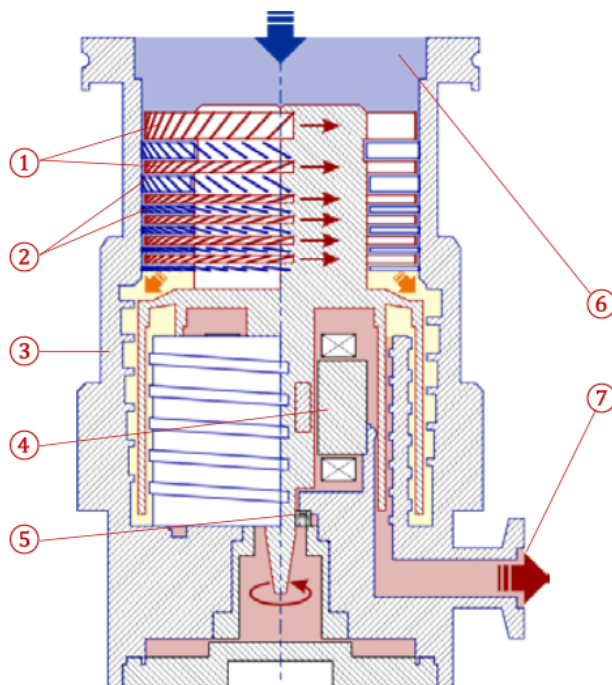
механизмов; используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах безмасляной (т.н. «сухой») откачки с особым требованием чистоты откачиваемого объема; используется до 4-х последовательных ступеней; низкий уровень шума.

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

– Тип вакуума: средний.

Турбомолекулярный насос

Откачка в турбомолекулярном насосе (рис. 5) 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)



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

Рисунок 4. Конструкция турбомолекулярного насоса.

с обратно обращенными 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.

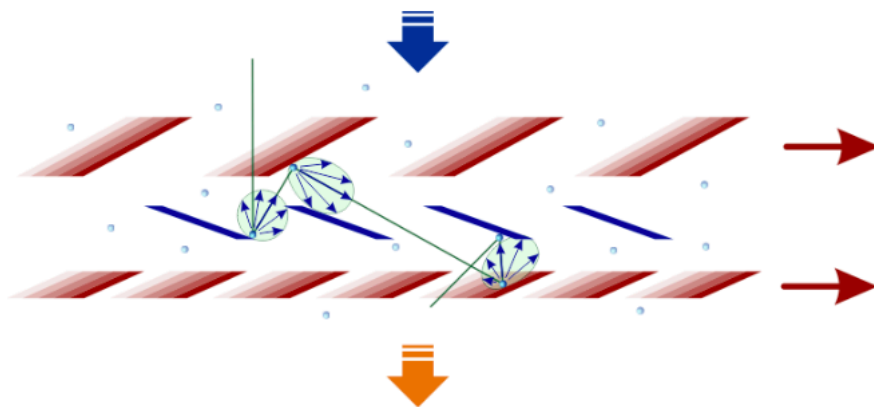


Рисунок 4. Принцип работы турбомолекулярного насоса.

– 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.

Средства измерения вакуума

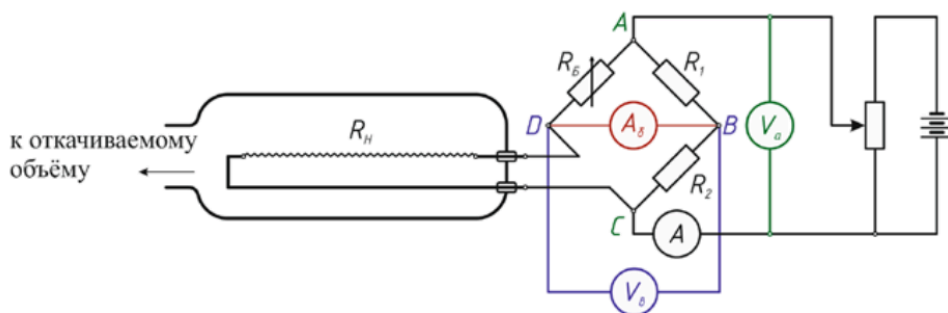
1. Терморезисторный вакуумметр

Принцип действия тепловых манометров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. Чувствительным элементом терморезисторного датчика (рис. 8) является тонкая металлическая нить накала (вольфрам, платина), помещенная в атмосферу откачиваемого газа. Со- сопротивление нити зависит от её температуры. Нить включена в одно из плеч мостовой схемы и разогрета до нескольких сотен градусов про- пускаемым 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 A, C моста или (в) постоянного тока через мост. Мост изначально сбалансирован при давлении много ниже рабочего диапазона (сопротивление R_B).

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

$$P \sim V^2 - V_0^2$$

V_0 — напряжение на клеммах при начальной балансировке



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

Рисунок 5. Схема терморезисторного вакуумметра

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 выдержать 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. Магнетронный вакуумметр

Измерительный объём магнетронного датчика (рис. 9) 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).

– Преимущества: Могут включаться в широком диапазоне давлений, т.к. не содержат накаливаемых 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.

Теоретическая часть

Одна из основных характеристик систем, работающих при вакууме – число Кнудсена:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

λ – длина свободного пробега молекул газа, d – характерный размер системы.

В зависимости от значений числа Кнудсена определяют:

- 1) низкий вакуум – $Kn \ll 1$
- 2) средний вакуум – $Kn \sim 1$
- 3) высокий вакуум – $Kn \gg 1$

Выпишем основные формулы, отображающие теоретические зависимости между исследуемыми величинами.

Скорость откачки:

$$S = \frac{dV}{dt}; \quad (2)$$

Падение давления:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \quad (3)$$

Пропускная способность:

$$U = \frac{Q}{\Delta P}; \quad (4)$$

Основное уравнение вакуумной механики:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U}; \quad (5)$$

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t} \quad (6)$$

Проводимость отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{T/m} \quad (7)$$

Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (8)$$

Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (9)$$

Выполнение работы

1. Для определения объемов частей установки (Объем вакуумной камеры — V_K , объем форвакуумной магистрали + объем ТМН - $V_{\text{ф.м.}} + V_{\text{тмн}}$ воспользуемся законом Бойля-Мариотта). Для этого необходимо определить давления в различном состоянии установки (исследуем различные части установки).

Включим форвакуумный насос и откачаем установку до предельного давления, занесем результаты в таблицу 1.

Перекрыем откачку вакуумной камеры К, закрыв кран МК2. Далее **плавно**, не допуская резкого изменения показаний вакуумметров, откроем кран МК3 для распространения «запертого» воздуха по объёму вакуумной камеры К. Зафиксируем установившееся давление и занесем результат в таблицу 1.

Далее выровняем давление и запустим в установку воздух с помощью крана МК1, внесем результаты в таблицу. Погрешности определим с помощью МНК.

1		2		3	
p, mbar	σ_p , mbar	p, mbar	σ_p , mbar	p, mbar	σ_p , mbar
3,32	0,08	3,26	0,06	3,05	0,08
193	9	185	5	188	5
140	4	132	4	132	4

Таблица 1. Результаты измерения давления при различных конфигурациях системы

По закону Бойля-Мариотта:

$$V_K = \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{p_2 - p_1} V_{\text{сильф}}; \tag{10}$$

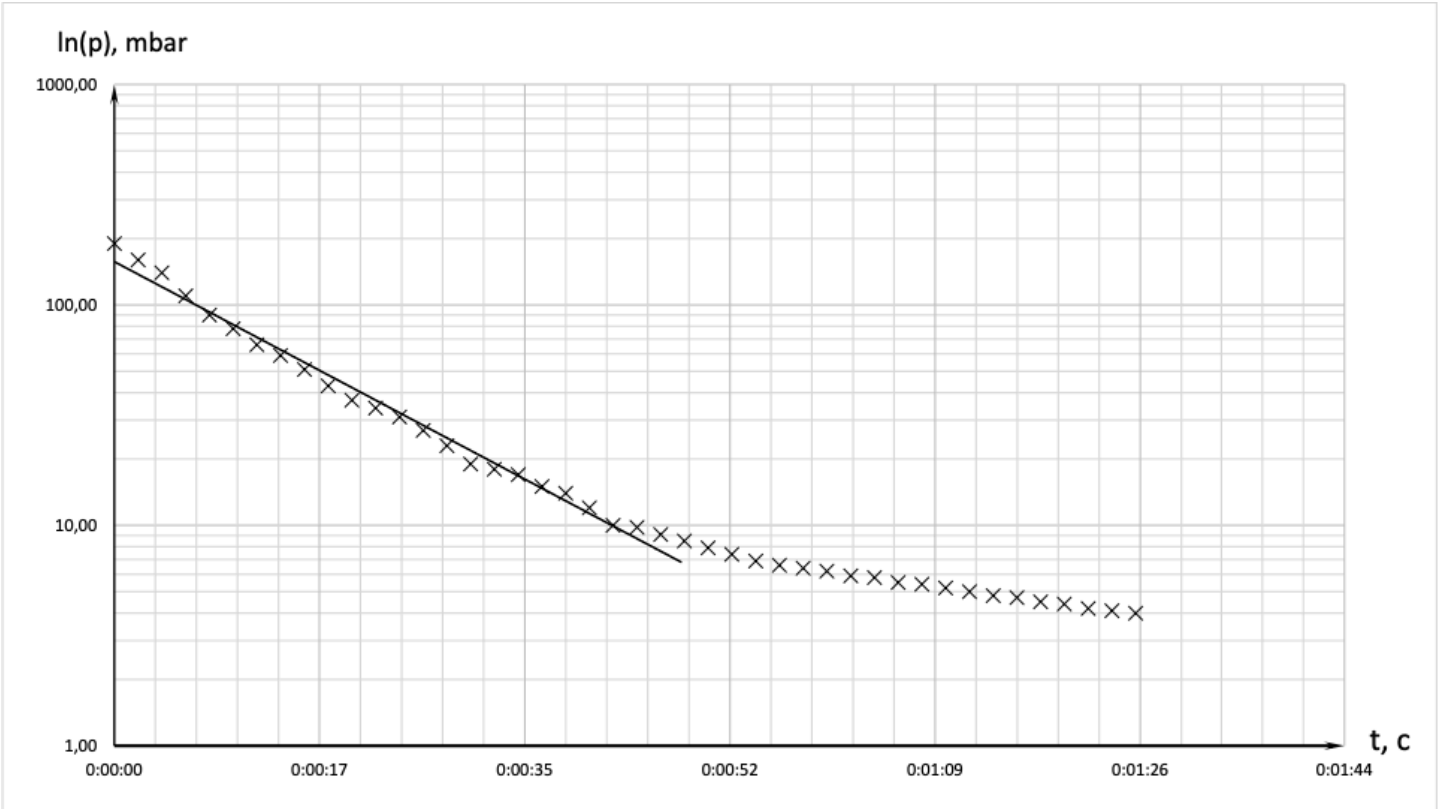
$$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}} = \frac{(p_3 - p_2) (V_K + V_{\text{сильф}})}{p_1 - p_3}; \tag{11}$$

Отсюда, определим объемы составных частей установки и погрешности. Значения внесем в таблицу 2.

номер измерения	$V_C, \text{см}^3$	$V_K, \text{см}^3$	$\sigma_{V_K}, \text{см}^3$	$V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}}, \text{см}^3$	$\sigma_{V_{\text{ф.м.} + \text{тмн}}}, \text{см}^3$
1	265	1140	60	550	25
2	265	1120	40	575	25
3	265	1120	40	600	25

Таблица 2. Результаты измерения объемов составных частей установки.

Построим график зависимости $\ln(P)$ от t :



Оценим скорость откачки системы форвакуумным насосом в области, где она примерно постоянна. Определим, где на графике линейный участок: это область

$$\tau = 5700 \pm 300 \text{ mbar} \cdot \text{с}^{-1}$$

Тогда определим эффективную скорость откачки (воспользовавшись формулой (9)):

$$S_0 = 0,66 \pm 0,12 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

2. Теперь определим скорость откачки турбомолекулярным насосом. Так же построим график $\ln(P)$ от t .



График 2. $\ln(P)$ от t при откачке турбомолекулярным насосом

На линейном участке:

$$\tau = 350 \pm 30 \text{ mbar} \cdot \text{с}^{-1}$$

Отсюда, определим эффективную скорость откачки:

$$S \approx (0,34 \pm 0,04) \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Тогда можем оценить натекание по формуле (6):

$$Q_H = V_k \cdot \frac{P_k - P_0}{\delta t} \approx 2,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

То есть за секунду в систему через один квадратный метр поступает примерно $2,1 \cdot 10^{-6}$ кг вещества.

Оценим длину свободного пробега молекул газа, взяв за характерный линейный размер 10 см, а $d = 2 \cdot 0,32 \text{ нм}$. Получим:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \ll 10 \text{ см}$$

Получили, что средние длины свободного пробега молекул много меньше характерного линейного размера объемов, что соответствует высокому вакууму.

Вывод

Выполнив данную лабораторную работу мы оценили скорости эффективной откачки вакуума для двух различных насосов и получили:

Форвакуумный насос:

$$S_0 = 0,66 \pm 0,12 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Турбомолекулярный насос:

$$S \approx (0,34 \pm 0,04) \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Выяснилось, что турбомолекулярный насос работает медленнее в 2 раза (с учетом погрешности), однако он позволяет откачать систему до высокого вакуума.