

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Отчет о выполнении лабораторной работы №2.3.1

Современные средства получения и измерения вакуума

Выполнил студент группы Б03-405
Тимохин Даниил

4 марта 2025 г.

1. Аннотация

В данной работе исследуется, как сейчас получается вакуум. Рассматривается поведение газа в различных условиях. Осваивается работа на вакуумном poste. Изучаются Способы измерения низкого давления.

2. Теоретическая справка

Для получения вакуума используют множество различных способов. В данной работе используется пластинчато-роторный для создания вакуума и турбомолекулярный насос для создания среднего вакуума. В качестве измерительных приборов используются:

В1) Терморезисторный вакуумметр

В2) Магнетронный вакуумметр (с холодным катодом)

В3) Термоэлектронный вакуумметр (с накали́нным катодом)

Первый используется для измерения давления до среднего вакуума. Далее он перестанет работать, так как в процессе теплопередачи основную роль начинает играть излучение, а значит сопротивление перестанет зависеть от давления и датчик зашкаливает на нижнем значении.

Второй может измерять давление только начиная с определенного порога, так как его работа завязана на потоке ионов, проходящего между катодом и анодом. Третий работает аналогично, но для создания ионов используется другой метод. Для второго - электроны в магнитном поле, а для третьего - за счёт нагретого катода.

Газ течет в разных режимах: гидродинамическом и молекулярном. В каком из режимов течет газ можно оценить по числу Кунденса

$$K = \lambda/d \quad (1)$$

В гидродинамическом режиме ($K \ll 1$) работает вязкость и формуле Пуазеля, поэтому

$$U_{mp} = \frac{Q}{\Delta P} = P \frac{\pi R^4}{8l\eta} \sim \frac{R^4}{L} \cdot \frac{P}{\sqrt{Tm}} \quad (2)$$

В молекулярном (Кунденсовом) ($K \gg 1$) режиме молекулы летят отдельно и чаще взаимодействуют со стенкой, чем друг с другом.

$$U_{mp} = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{4R^3}{3L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (3)$$

Из условия постоянности в каждый момент времени пропускной способности по длине всей трубы получим

$$PS_0 dt = -V_0 dP \quad (4)$$

$$S_0 = -V_0 \frac{dP}{P dt} = -V_0 \frac{d(\ln P)}{dt} \quad (5)$$

Если откачка происходит вблизи эффективной зоны, то $S_0 = const$ и его можно вычислить из графика.

Для оценки числа Кунденса используем $P = nkt$ и $\lambda = \frac{1}{\sigma n}$

$$K = \frac{kT}{P\sigma d} \quad (6)$$

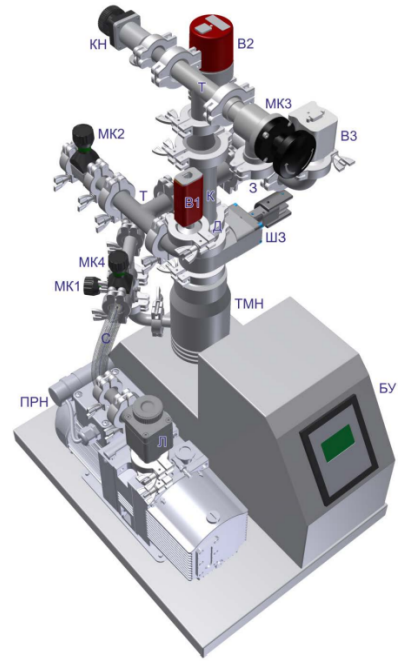


Рис. 1. Экспериментальная установка

И для оценки возьмём $T = 295K$, $\sigma = 2.8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ и $d = 0.05 \text{ м}$.

Также из условия постоянности пропускной способности в трубе можно получить, что

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U_{mp}} \quad (7)$$

3. Оборудование

Вакуумный пост

Набор с доп. сильфоном для измерения объёма

4. Проведение эксперимента

Сначала откачаем полностью установку.

Потом добавим сильфон с известным объёмом воздуха и будем постепенно открывать краны. $V_0 = 252 \text{ мл}$

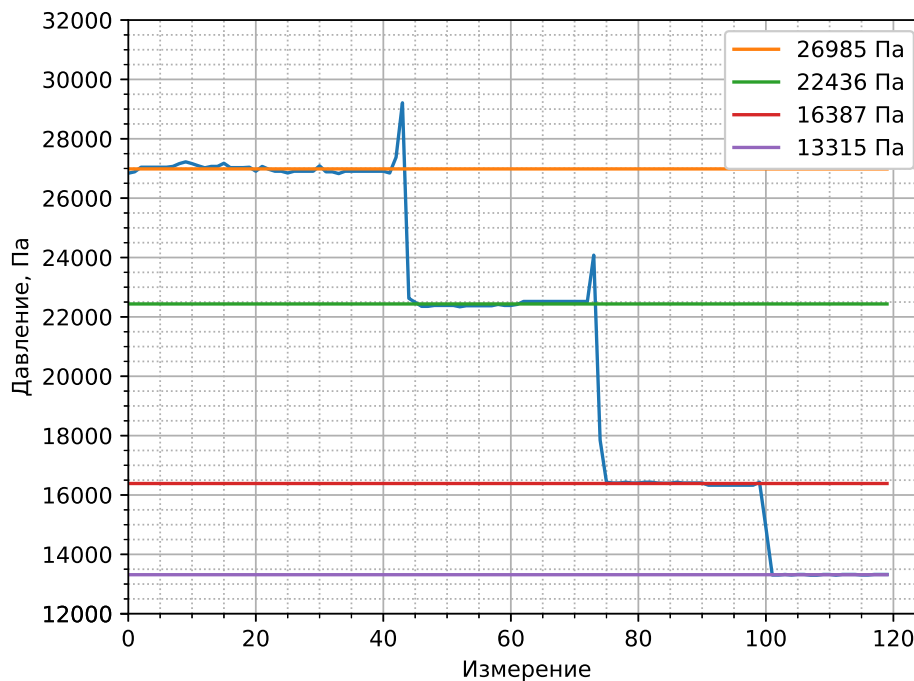


Рис. 2. Давление при поочередном открытии кранов в одном из опытов

Из этих данных и других повторов, применив формулу Менделеева-Клапейрона при постоянной температуре получим, такие данные:

Давление, Па	Комментарий	Добавленный объём, мл	ε_V
26871	объём вакуумной камеры	685.8	0.01
22684	сильфон	173.1	0.01
16432	турбомолекулярный	422.7	0.01
13386	форвакуумный насос	349.0	0.01

Далее рассмотрим откачку форвакуумным насосом.

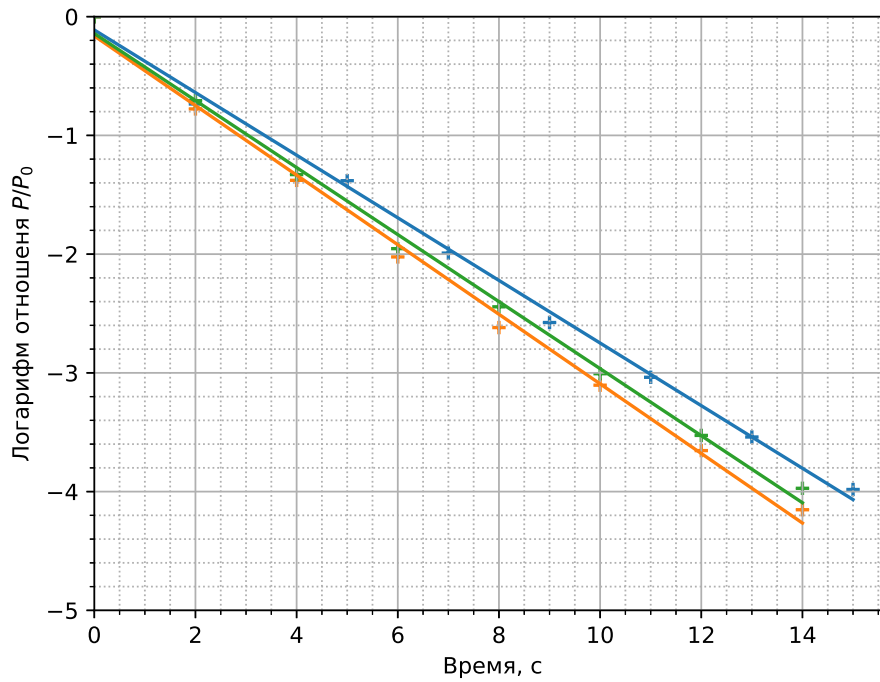


Рис. 3. Нахождение производной для формулы 5 для коэффициента наклона

Получаем:

Эксперимент	Значение коэффициента наклона, $1/c$	ε_k
Эксперимент 1	-0.26	0.02
Эксперимент 2	-0.29	0.02
Эксперимент 3	-0.28	0.02

Рассчитав среднее, получим $k = -0.28 \text{ } 1/c$, $\varepsilon_k = 0.02$. И используя формулу 5, а также предыдущие результаты, получим скорость откачки насосов. Общий объём откачки равен 1.6 л, а значит $S_0 = 0.45 \text{ л/с}$. Это попадает в диапазон, указанный в лабораторной работе.

Изучим натекание, происходящее при среднем вакууме в нашей установке.

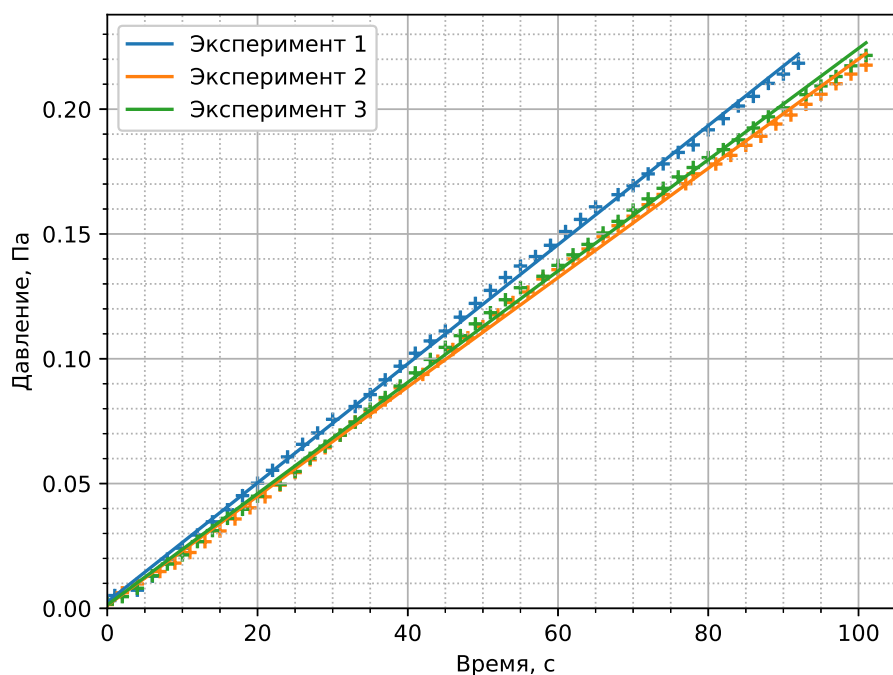


Рис. 4. Исследование натекания

Эксперимент	Значение коэффициента наклона, Па/с	ε_k
Эксперимент 1	0.0024	0.05
Эксперимент 2	0.0022	0.05
Эксперимент 3	0.0022	0.05

Получаем среднее $k = 0.0023$ Па/с и $\varepsilon_k = 0.05$. Тогда получим, что $Q_n = V_0 \frac{dP}{dt}$, но при этом объём натекания - объём вакуумной камеры. $V_0 = 0.68$ л.

$$Q_n = 0.15 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

Теперь рассмотрим откачку турбомолекулярным насосом. Из-за того, что Скорость откачки насоса гораздо больше, чем пропускная способность труб, то вычислить постоянную эффективную скорость откачки не удалось. Получился вот такой график, показывающий зависимость эффективной скорости от внешнего давления.

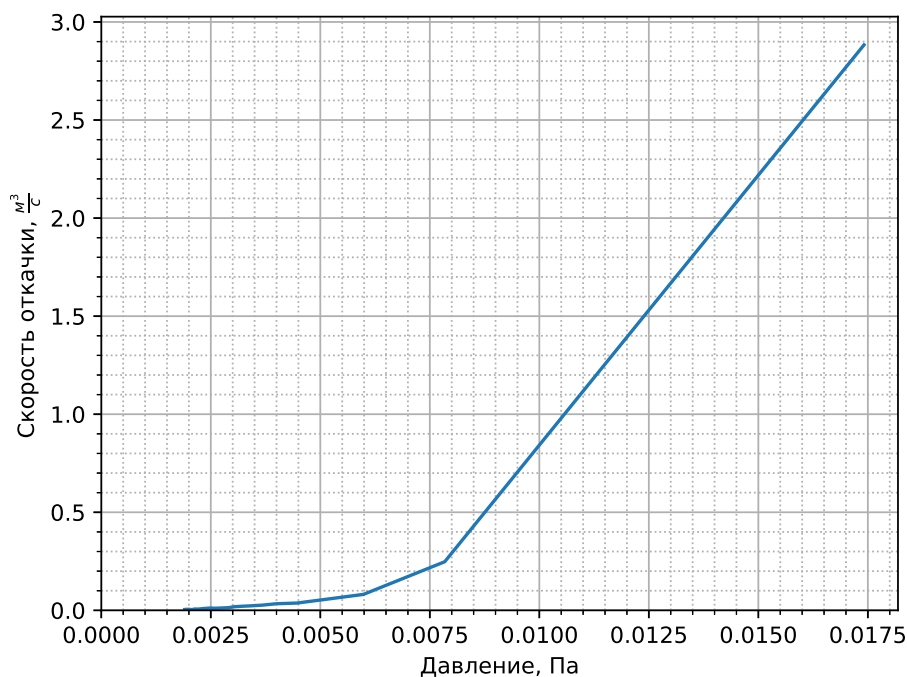


Рис. 5. Исследование турбомолекулярного насоса

А теперь оценим числа Кунденса при крайних значениях.

Минимальное давление получилось $1.2 \cdot 10^{-3}$ Па. Получаем число Кунденса равное 240 по формуле 6.

Максимальное давление было 10^5 Па. При этом давлении число Кунденса равно $3 \cdot 10^{-6}$.

5. Обсуждение результатов и выводы

В данной работе было изучено, как пользоваться турбомолекулярным насосом. Также Были получены эффективные скорости откачки в определенных промежутках давления для насосов.

Было определено натекание насоса количественно. А также были определены объёмы частей вакуумного поста.

Были оценены числа Кунденса для крайних давлений в нашем эксперименте.