

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ
ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Методы получения высокого вакуума

выполнили студенты 653 группы ФФКЭ

Агафонов Владислав
Карпова Татьяна

Долгопрудный, 2017 г.

Содержание

1	Цель работы	1
2	Лабораторная установка	1
3	Выполнение работы	2
3.1	Измерение давления в форвакуумной части установки	2
3.2	Измерение давления в форвакуумной части установки	3
3.3	Измерение производительности турбомолекулярного насоса .	6
4	Вывод	11
5	Список использованной литературы	12

1 Цель работы

1. Ознакомиться с принципами работы вакуумной техники: пластинчато-роторного насоса, турбомолекулярного насоса, ионизационного, ёмкостного и терморезистивного вакуумметров.
2. Ознакомиться с методами вакуум-ных расчётов, найти зависимость величины газового потока в системе от давления.
3. Определить производительность турбомолекулярного насоса.
4. Рассчитать объем рабочей камеры.

2 Лабораторная установка

Лабораторная установка предназначена для ознакомления с основными приборами вакуумной техники: насосами, манометрами, измерителями расхода газа. Схема установки представлена на рисунке 1.

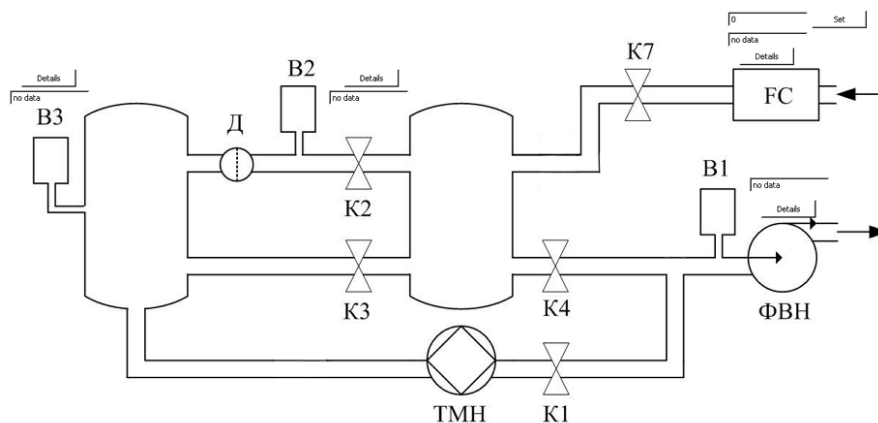


Рис. 1: Схема лабораторной установки

На схеме обозначены:

- B_1 - вакуумметр ёмкостной
- B_2 - вакуумметр терморезисторный
- B_3 - вакуумметр ионизационный
- K_1 - кран турбомолекулярного насоса
- K_3 - высоковакуумная заслонка
- K_4 - форвакуумная заслонка
- K_2, K_7 - коммутационные краны
- Д - диафрагма
- FC - регулятор газового потока (flow controller)

ТМН - турбомолекулярный насос
ФВН - форвакуумный насос

3 Выполнение работы

3.1 Измерение давления в форвакуумной части установки

1. Включаем компьютер, подаём питание на установку
2. Все краны кроме К1 переводим в открытое положение, кран К1 остаётся закрытым
3. Включаем ёмкостной (В1) и терморезисторный (В2) вакуумметры, включаем регулятор газового потока (FC), устанавливаем поток газа 0 сссм. Дожидаемся стабилизации показаний датчика регулятора газового потока. Поток стабилизировался на значении примерно 1.7 сссм и не опускается до нуля.
4. Включаем форвакуумный насос и снимаем показания ёмкостного и терморезисторного вакуумметров. Зависимость показаний давления в форвакуумной части от времени показана на графике 1.

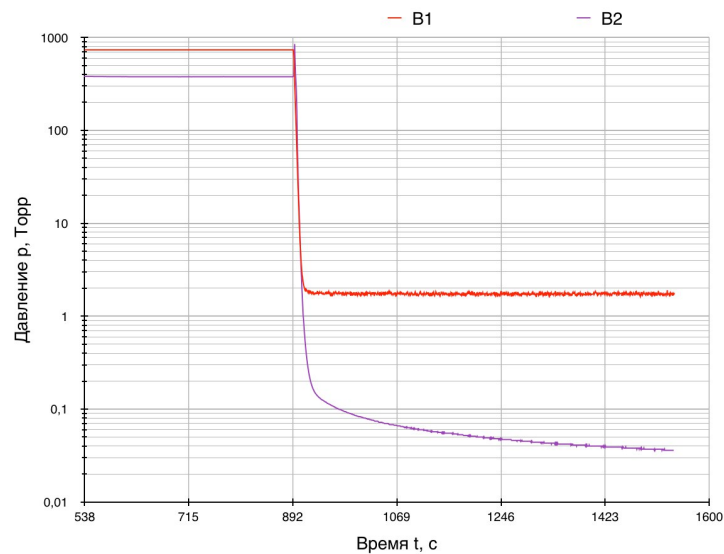


Рис. 2: Зависимость показаний давления в форвакуумной части установки от времени

На графике можно выявить особенности ёмкостного и терморезисторного вакуумметров:

1. Перед началом откачки воздуха из системы показания ёмкостного и терморезисторного вакуумметров отличаются: при атмосферном давлении 760 Торр ёмкостной вакуумметр показывает значение 760 Торр, в то время как терморезисторный 380 Торр. Делаем вывод, что вакуумметр ёмкостного типа применим для измерения давлений 10^2 Торр, а терморезисторного типа определяет давление этого порядка неточно.
2. После включения форвакуумного насоса показания ёмкостного вакуумметра сразу стали уменьшаться и быстро стабилизировались в районе 1 Торр, а у терморезисторного сначала сделали скачок вверх и медленнее стали понижаться. Это объясняется низкой инертностью ёмкостного и сравнительно высокая инертность терморезисторного вакуумметров (связана с внутренним устройством прибора)
3. Предел измерений ёмкостного вакуумметра 1 Торр. Его диафрагма при этих значениях максимально деформирована, на графике появляются неровности
4. По показаниям терморезисторного вакуумметра мы можем с большой точностью определить давление порядка 10^{-2} Торр

В паспортных данных форвакуумного насоса найдём его быстродействие при давлении 0.02 Торр: $S = 5m^3/h$. Вычислим величину газового потока натекания Q_H по формуле

$$Q_H = SP(S) = 0.02torr * 5m^3/h = 0,1torr * m^3/s$$

Переведём в sccm:

$$1torr * lit/s = 3.6torr * m^3/h = 79.05sccm \Rightarrow 0.1torr * m^3/s = 2.2sccm$$

Величина газового потока натекания - характеристика конкретной установки, зависящая от давления в ней.

3.2 Измерение давления в форвакуумной части установки

Используя терморезисторный вакуумметр, снимем зависимость давления в системе от производительности форвакуумного насоса. Для этого сначала выставим на регуляторе потока величину 5 sccm, а затем будем увеличивать её с шагом 10 sccm, дожидаясь стабилизации показаний В2 (2 минуты). На рисунке 3 представлен график зависимости давления от времени, на рисунке 4 - характер изменения потока газа от времени

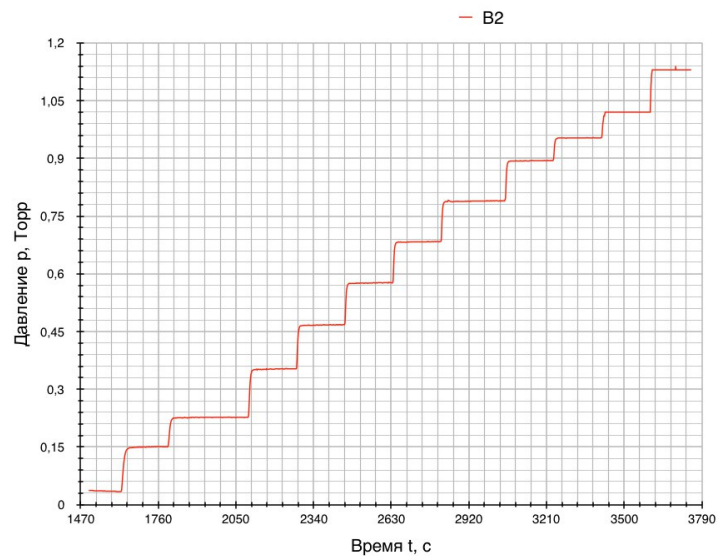


Рис. 3: Зависимость показаний давления в форвакуумной части установки от времени при постепенном увеличении потока воздуха

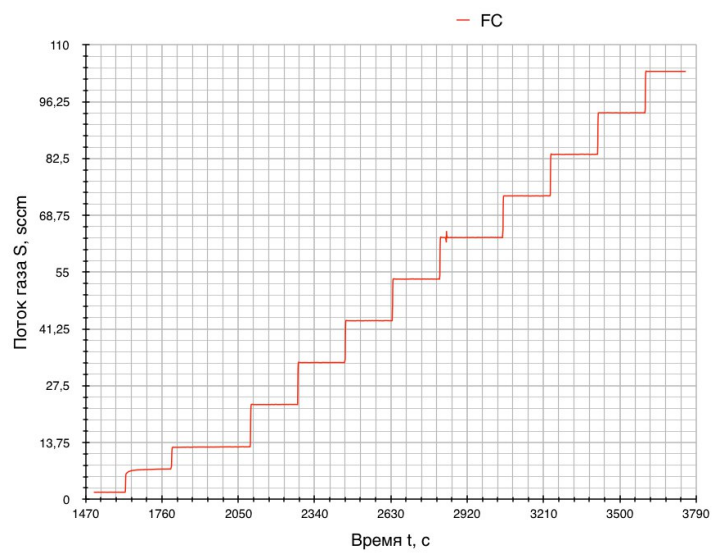


Рис. 4: Зависимость потока газа через регулятор расхода от времени

Таблица 1: Величина газового потока Q_{FC} , давление в форвакуумной части P_2 и скорость откачки газа S

$Q_{FC}, sccm$	$Q_{FCset}, sccm$	$\Delta Q, sccm$	$P_2, torr$	$S, m^3/h$
1.73	0	1.73	0.041	1.922
7.33	5	2.33	0.15	2.225
12.66	10	2.66	0.227	2.540
22.97	20	2.97	0.353	2.963
33.11	30	3.11	0.467	3.229
43.23	40	3.23	0.577	3.412
53.32	50	3.32	0.683	3.555
63.37	60	3.37	0.789	3.658
73.47	70	3.47	0.894	3.743
83.55	80	3.55	0.953	3.993
93.57	90	3.57	1.02	4.178
103.6	100	3.6	1.13	4.175

В таблицу 1 занесём значения установившегося давления В2 и значения соответствующих потоков через FC. В столбце $Q_{FCset}, sccm$ указаны значения, подаваемые непосредственно на регулятор расхода, ΔQ - разница между этими значениями

При давлении примерно 0.02 Торр получили $\Delta Q \approx 2.2sccm$, что по нашей оценке равно натеканию газа на нашей установке. Можно предположить, что датчик на регуляторе потока показывает значение потока сразу с учётом натекания. $Q_{leak} + Q_{FC} = Q$

Поток воздуха

$$Q - P * S(P) = \frac{d(PV)}{dt}$$

При $P = const$

$$\frac{d(PV)}{dt} = 0$$

Тогда

$$S(P) = \frac{Q}{P}$$

По этой формуле рассчитаем значения $S(P)$ и занесём результаты в таблицу 1. Построим график зависимости Q от P (рисунок 5), тогда по формуле среднее значение S будет равно угловому коэффициенту получившейся прямой, переведённой в m^3/h .

$$S = 95.242sccm = 4.33m^3/h$$

Но рассчитанные значения не совпадают с этой аппроксимацией. Значит, имеется другой характер зависимости. Быстродействие насоса также зависит от давления в установке.

$$Q = \frac{d(PV)}{dt}$$

$$S(P) = \frac{Q}{P} = -V \frac{d(\ln P)}{dt}$$

$$P(t) = P_0 + P(0) * \exp\left(\frac{S_0}{V} * t\right)$$

$$S(P) = S_0 \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)$$

По значениям из таблицы 1 построим график зависимости быстродействия от давления в установке (рисунок 6). Экстраполируем его под полученную зависимость: $S_0 = 3.65 m^3/h$, $P_0 = 0.02 torr$. Полученное значение на 16% отличается от экстраполированного по прямой.

3.3 Измерение производительности турбомолекулярного насоса

1. Закроем К3, откроем кран К1 до появления шарика в центре ручки крана, включим турбомолекулярный насос, включим ионизационный вакуумметр, дождёмся пока вакуумметр переключит режим работы, повысив накал нити при уменьшении давления. Постепенно увеличим поток через ФС до 90 sccm. Фактический поток составляет 93,5 sccm, давление в форвакуумной части 1,01 Торр.
2. Проведём снятие зависимости производительности турбомолекулярного насоса от давления. Для этого:
 - Перекрываем кран К2, прекращаем подачу газа через ФС. Между краном К2 и диафрагмой запирается некоторое количество воздуха, давление которого соответствует давлению в форвакуумной части системы. Это давление показывает В2. Перепад давлений на диафрагме создаёт поток газа сквозь неё.
 - Снимем зависимость показаний вакуумметров В2 и В3 от времени, графики представлены на рисунках 7 и 8
3. Появление скачков на рисунке 8 связано с тем, что ионизационный вакуумметр переключает режим работы, повышая накал нити при уменьшении давления.
4. Определим, можно ли считать течение газа через диафрагму молекулярным. Для этого оценим длину свободного пробега молекул:

$$\lambda = \frac{kT}{\sigma P} \approx 1.22m$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана

$T \approx 293$ К – комнатная температура

$\sigma = 62,5 \cdot 10^{-20} m^2$ – среднее эффективное сечение рассеяния для воздуха

$P \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Торр = $4 \cdot 133 \cdot 10^{-5}$ Па – порядок давления в высоковакуумной части системы

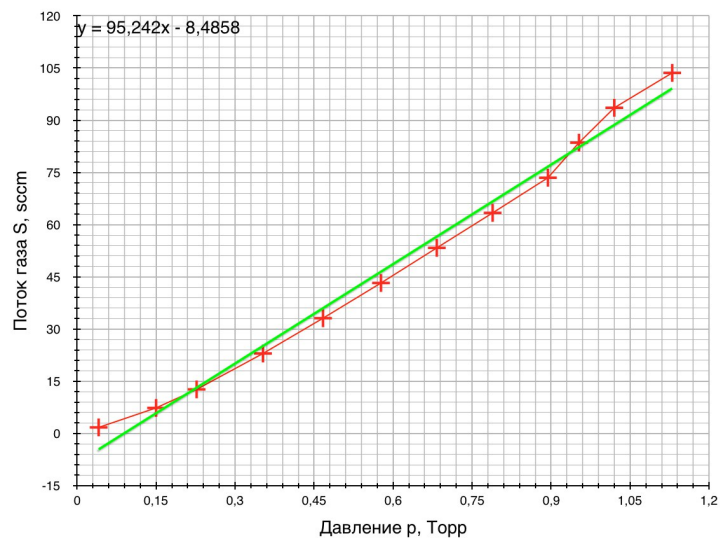


Рис. 5: Зависимость потока газа через регулятор расхода от давления

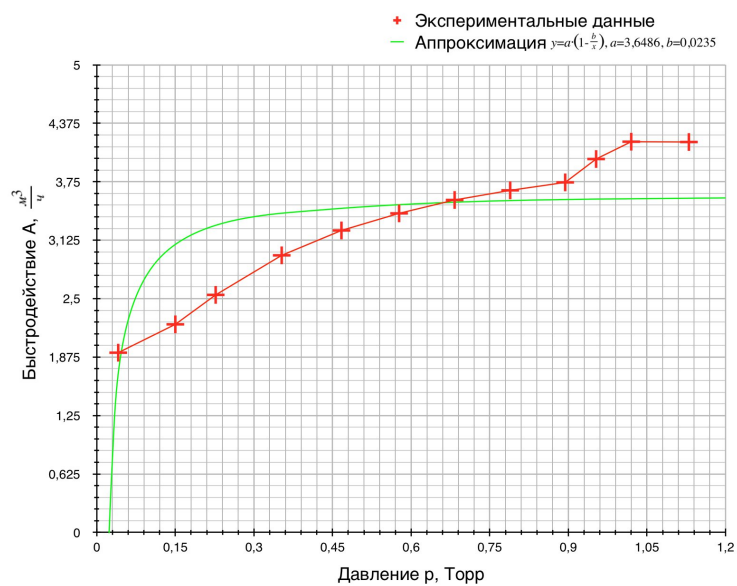


Рис. 6: Зависимость быстродействия форвакуумного насоса от давления в системе

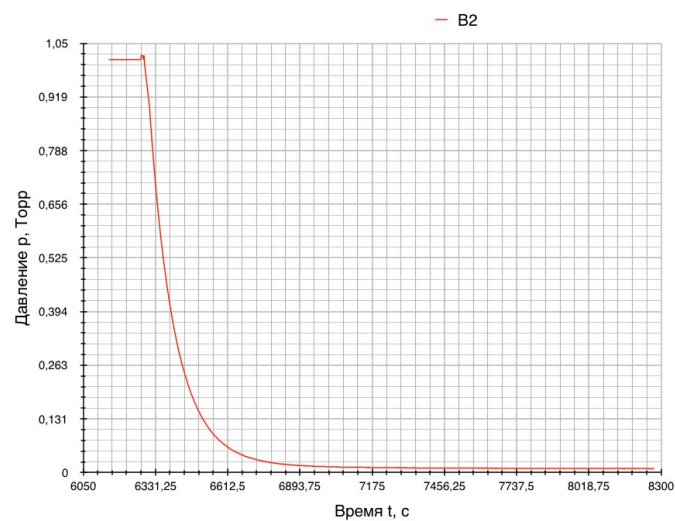


Рис. 7: Зависимость давления в форвакуумной части системы от времени

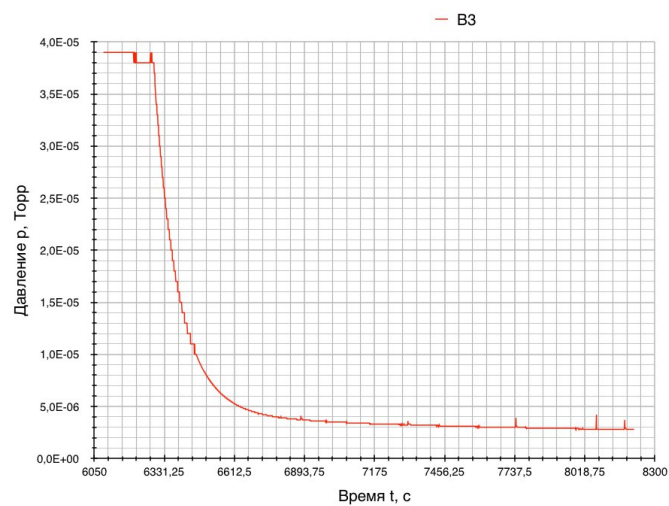


Рис. 8: Зависимость давления в высоковакуумной части системы от времени

Диаметр отверстия диафрагмы равен $d = 100$ мкм. Видно, что $d \ll \lambda$, поэтому течение газа через диафрагму можно считать молекулярным. Следовательно, справедлива формула нахождения молекулярного потока через диафрагму (отверстие):

$$Q = S \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} (P_2 - P_3)$$

где P_2, P_3 - давления на В2 и В3 соответственно

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь отверстия в диафрагме

μ - молярная масса воздуха

Так как P_3

$\ll P_2$, формула примет вид

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} P_2$$

5. Рассмотрим модель потока через турбомолекулярный насос

$$P_3 S(P_3) = Q - \frac{d(P_2 V)}{dt}$$

$$Q \gg \frac{d(P_2 V)}{dt}$$

Получим:

$$P_3 S(P_3) = Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} P_2$$

6. Быстродействие насоса определим через значение потока:

$$Q = P_3 S(P)$$

Пользуясь тем, что производительность можно считать постоянной в некоторой области при установившемся давлении, найдём её из отношения потока к давлению. Для этого воспользуемся графиком, представленным на рис. 9

Здесь значение производительности будет угловым коэффициентом аппроксимирующей прямой: $S = 0.0574 \text{ sccm} / 2.2 = 0.0261 \text{ m}^3/\text{s} = 26.1$ л/с

7. Сравним это значение с данными производителя: график зависимости производительности от давления при разных газах представлен на рисунке 10

По документации производительность ТМН, перекачивающего азот (основная часть атмосферы), равна 30 л/с при давлениях порядка 10^{-5} Торр и практически постоянна. Турбомолекулярный насос в нашем эксперименте быстро вышел на свои предельные значения при 10^{-5} Торр и рассчитанная производительность практически совпадает с данными производителя.

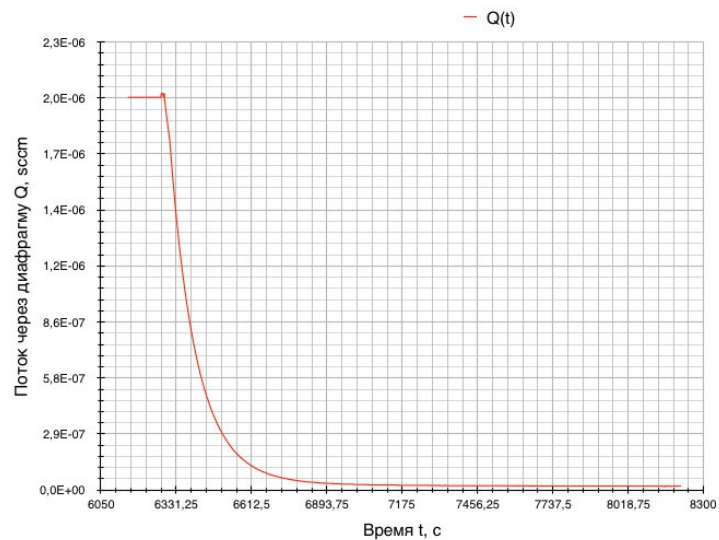


Рис. 9: Зависимость потока через турбомолекулярный насос Q от времени

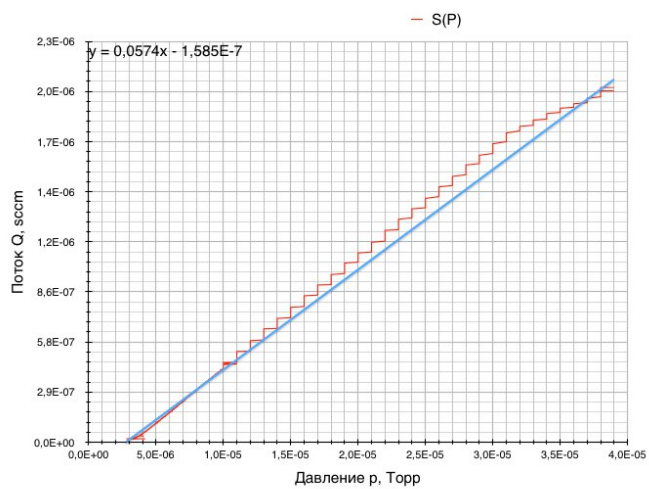


Рис. 10: Зависимость потока через ТМН от давления в системе для определения производительности ТМН

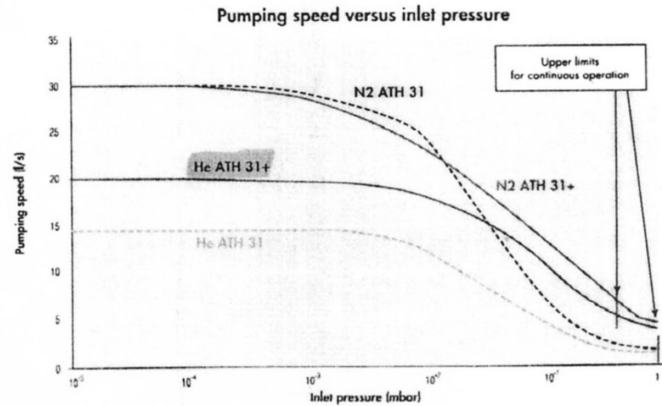


Рис. 11: Данные производителя о зависимости производительности тМН от давления

8. Для определения объёма рабочей камеры необходимо создать условия отсутствия натекания газа через диафрагму. В нашем эксперименте таких условия предоставлено не было, следовательно, нельзя с большой точностью определить объём рабочей камеры

4 Вывод

В ходе работы мы ознакомились с принципами работы вакуумной техники, определили характеристики насосов и вакуумметров, изучили методы получения и измерения вакуума.

1. Определены рабочие диапазоны вакуумметров:
 - ёмкостной: 760 – 1 Торр
 - терморезисторный: $10 - 10^{-3}$ Торр
 - ионизационный: $10^{-3} - 10^{-5}$ Торр
2. На установке получен высокий вакуум порядка 10^{-5} Торр
3. Определены быстродействия вакуумных насосов:
 - форвакуумный: $3.65 m^3/h$
 - турбомолекулярный $26.1 m^3/h$:

5 Список использованной литературы

1. Методы получения высокого вакуума: лабораторная работа по курсу Вакуумная электроника / сост.: А.С. Батурин, И.Н. Ескин, Д.А. Свинцов, П.А. Стариков, Е.П. Шешин – М.: МФТИ, 2010. – 36 с.
2. Шешин Е.П. — Основы вакуумной электроники: учеб. пособие. – 2-е издание, испр. И доп. - М.: МФТИ, 2009. - 149 с.
3. Шешин Е.П. — Вакуумные технологии: учеб. пособие. / Долгопрудный: издательский Дом «Интеллект», 2009. - 504 с.