

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Кафедра вакуумной электроники

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Лабораторная работа
по курсу вакуумная электроника

Выполнил:
Нехаев Александр,
студент 654 группы,
ФФКЭ

Москва
2017

Оглавление

Оглавление	2
Цель работы	3
Схема установки	3
Устройство основных приборов вакуумной техники	4
Ход работы	6
4.1. Измерение давления в форвакуумной части системы	6
4.2. Определение производительности форвакуумного насоса	8
4.3. Определение производительности турбомолекулярного насоса	12
4.3. Оценка объёма рабочей камеры	16
Выводы	18
6. Список использованной литературы	19

Цель работы

1) Познакомиться с основными принципами работы вакуумной техники, изучить устройство таких вакуумных приборов как:

- пластинчато-роторный форвакуумный насос
- турбомолекулярный насос
- ионизационный вакуумметр
- терморезистивный вакуумметр
- емкостной вакуумметр

2) Ознакомиться с методами получения высокого вакуума, его измерения с помощью перечисленных приборов вакуумной техники.

3) Найти зависимость величины газового потока в системе от давления.

4) Определить производительность турбомолекулярного насоса.

5) Оценить объем рабочей камеры.

Схема установки

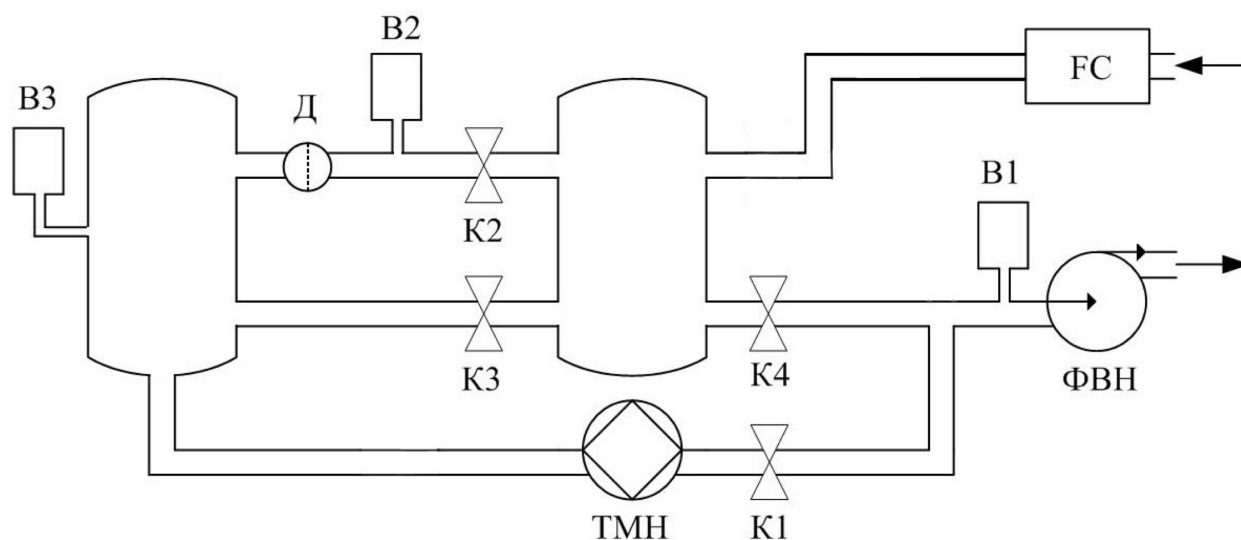


Рисунок 1. — Схема лабораторной установки.

В1 - вакуумметр емкостной;

В2 - вакуумметр терморезистивный;

В3 - вакуумметр ионизационный;

К1 - кран турбомолекулярного насоса;

К3 - высоковакуумная заслонка;

К4 - форвакуумная заслонка;

К2 - коммутационный кран;

Д - диафрагма;

FC - регулятор газового потока (англ. Flow mass controller);

ТМН - турбомолекулярный насос;

ФВН - форвакуумный насос.

Устройство основных приборов вакуумной техники

Пластинчато-роторный форвакуумный насос

Служит для создания предварительного разрежения в вакуумной системе и форвакуумного давления на выходе высоковакуумных газоперемещающих насосов.

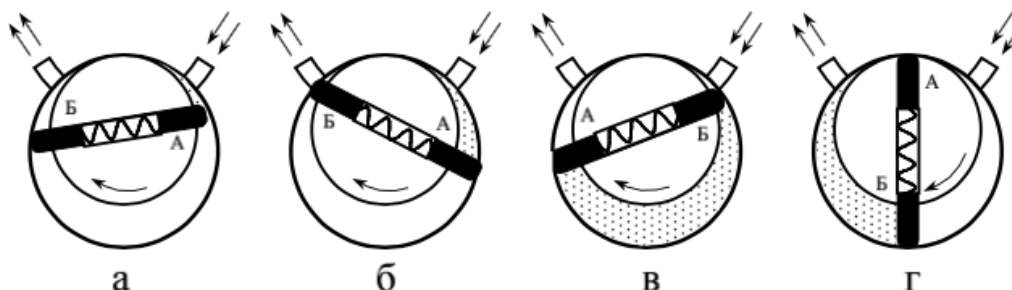


Рис. 2. Схема действия роторного двухпластинчатого форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объема, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

Турбомолекулярный насос

Служит для получения и поддержания высокого вакуума. Имеет ряд преимуществ: постоянная готовность к работе, быстрый запуск, нечувствительность к резкому перепаду давления, широкий диапазон рабочих давлений (10^{-7} - 10^{-1} Па), приблизительно одинаковая быстрота действия по большинству газов, чрезвычайно высокая степень сжатия для газов с большой молекулярной массой ($M \geq 44$).

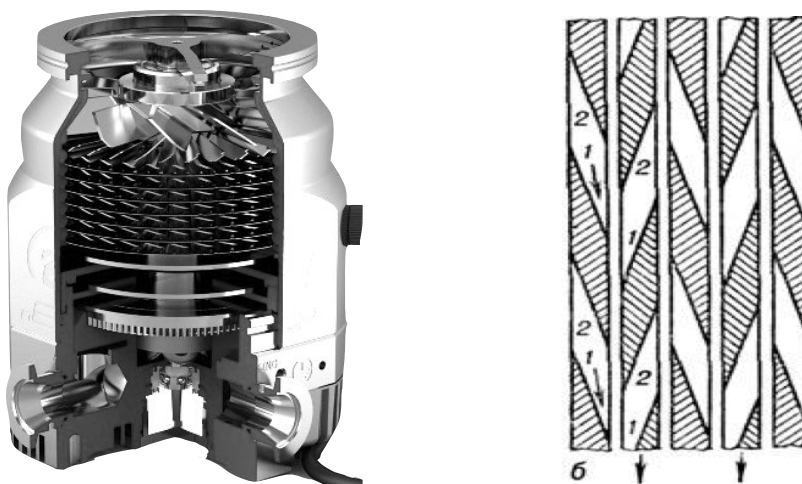


Рисунок 3. — Турбомолекулярный насос.

- а) Модель в разрезе
б) Схематичное изображение разреза

Ёмкостной вакуумметр

Сенсор датчика состоит из металлической ячейки, разделённой на две части туго натянутой плоской металлической диафрагмой (1), с одной стороны которой расположены электроды (2).

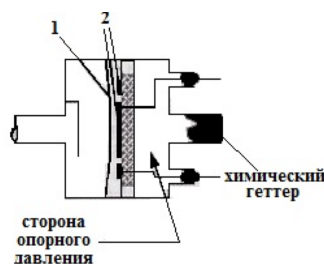


Рисунок 4. — Ёмкостной вакуумметр (схема).

1 – диафрагма; 2 – электроды.

Электроды с диафрагмой образуют две переменные ёмкости, которые включены в плечи измерительного моста. Когда давление по обеим сторонам диафрагмы одинаково, мост сбалансирован. Изменение давления в одной из камер деформирует диафрагму и изменяет ёмкости, разбалансируя мост.

Ёмкостные вакуумметры позволяют измерять давление в диапазоне 10^{-3} - $3 \cdot 10^3$ Торр.

Термопарный вакуумметр

Его действие основано на зависимости теплопроводности газа от давления. Основным элементом является нить накала с известной зависимостью сопротивления от температуры. При постоянной электрической мощности, подведённой к нити, температура нити зависит от давления.

В диапазоне давлений от 1 до 10^{-3} Торр широко применяются термопарные тепловые вакуумметры. В них давление оценивается по ЭДС термопары.

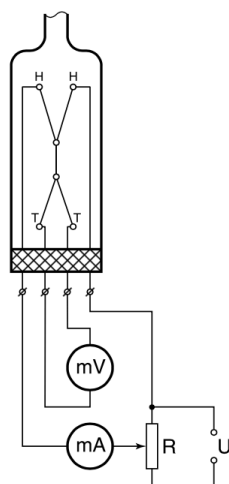


Рисунок 5. — Термопарный вакуумметр (схема).

Электронный ионизационный вакуумметр

Принцип действия основан на прямой пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

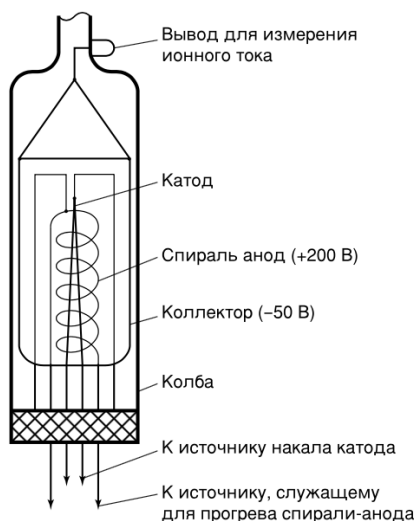


Рисунок 6 Схема ионизационной лампы

Электрические потенциалы электродов таковы, что создают для электронов ускоряющую разность потенциалов в пространстве между анодом и катодом и замедляющую разность потенциалов в пространстве между анодом и коллектором ионов, причём замедляющая разность по величине больше ускоряющей. Накаленный пропускаемым током катод испускает электроны, они ускоряются в пространстве между анодом и катодом, пролетая сетку (анод) они изменяют направление движения, снова вылетая за сетку. Таким образом электроны совершают колебательные движения. В процессе движения электроны ионизируют газ, ионы притягиваются коллектором, создавая ионный ток, который пропорционален давлению.

Ионизационный вакуумметр позволяет измерять давление в диапазоне 10^{-2} - 10^{-10} Торр.

Ход работы

4.1. Измерение давления в форвакуумной части системы

- 1) Включаем компьютер, подаём питание на установку.
- 2) Приводим установку в рабочее состояние. Краны К2, К3, К4 переводим в открытое состояние, кран К1 закрыт. В установке атмосферное давление.
- 3) Включаем вакуумметры В1 и В2 (ёмкостной и терморезистивный), включаем регулятор газового потока (FC) и устанавливаем поток газа равным 0 сссм.
- 4) Включаем форвакуумный насос, снимаем зависимость давления в системе от времени по показаниям В1 и В2 (график 1)

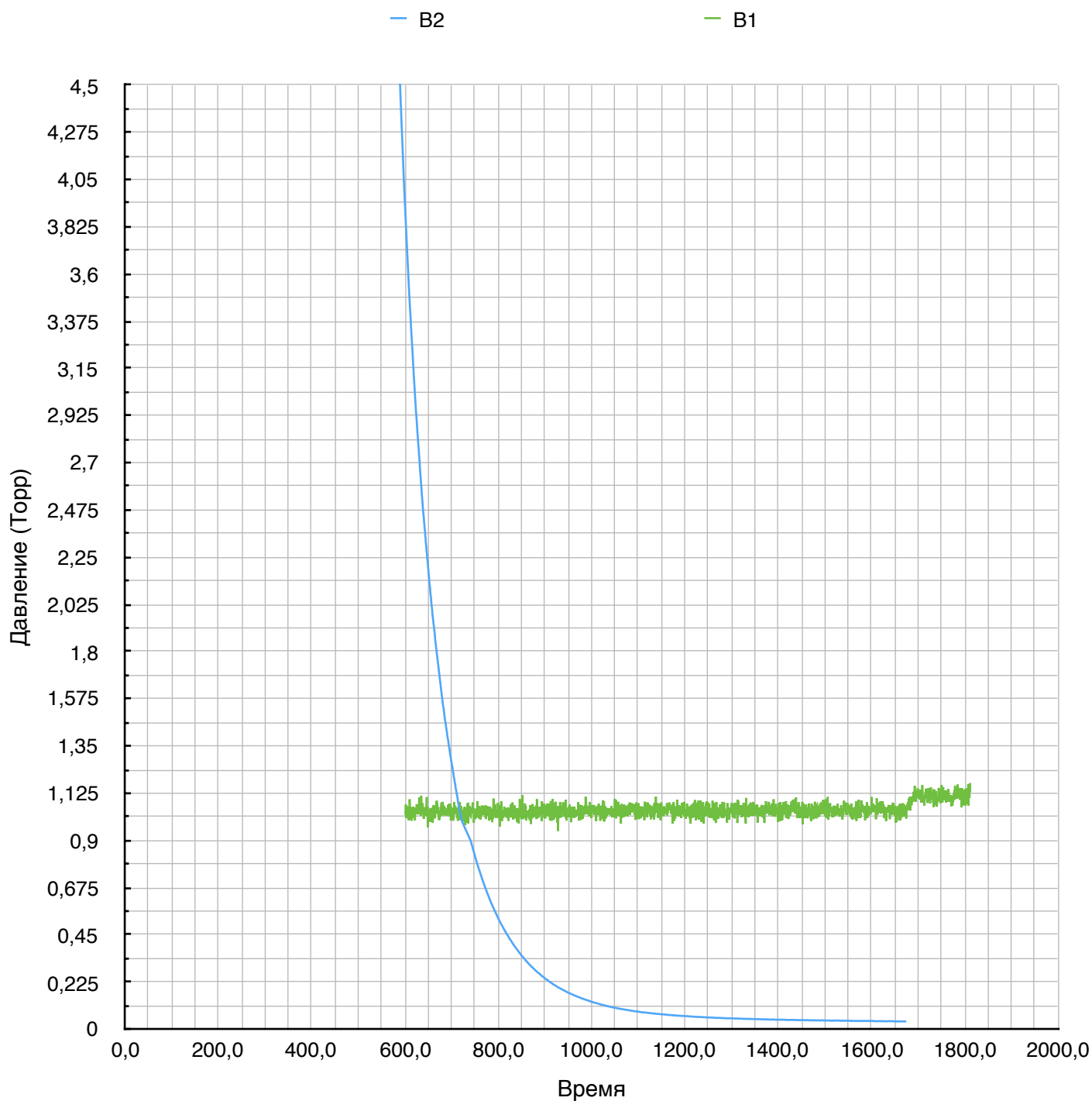


График 1. Зависимость давления в системе от времени при включённом форвакуумном насосе и нулевом газовом потоке через ФС.

Проанализируем график 1:

- 1) Известно, что начальное давление в системе равнялось атмосферному (≈ 760 Торр).
- 2) При давлении 0,9-1 Торр в показаниях B1 появляются шумы. Это нижняя граница его рабочего диапазона. Это связано с тем, что мембрана емкостного вакуумметра достигает максимального изгиба.
- 3) B2 способен давать показания и при более низких давлениях (в данном случае до $\approx 0,03$ Торр).
- 4) При откачке воздуха с помощью ФВН давление в системе установилось на уровне порядка 0,03 Торр.

По паспортным данным при данном давлении скорость откачки ФВН (его быстродействие) составляет ≈ 3 м³/ч. В данном случае поток газа через ФВН равен $Q_{\text{натекания}}$.

$$Q_{\text{НАТЕК}} = P * S(P) = 11,998 \text{ sccm}$$

4.2. Определение производительности форвакуумного насоса

Снимем зависимость давления в системе от потока через FC, пользуясь терморезистивным вакуумметром. Для этого:

- 1) Выставим на FC поток в 5 SCCM
- 2) Дождёмся установления давления по показаниям В2.
- 3) Повторим пункты 1, 2, выставляя на FC потоки в диапазоне 0-100 SCCM

Результат представлен на Графике 2. При этом поток газа через FC (Q_{FC}) изменялся так, как показано на Графике 3.

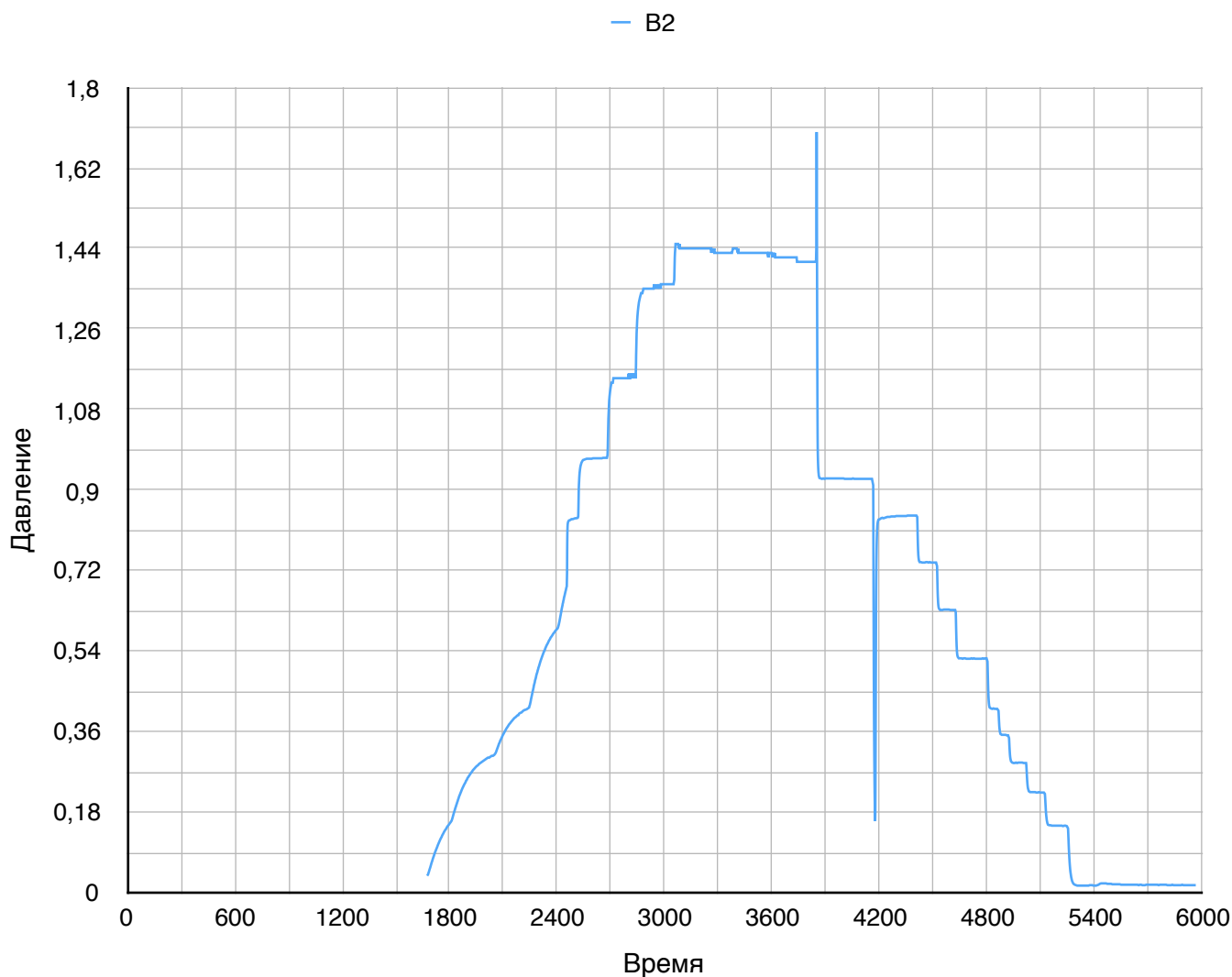


График 2. Зависимость давления в системе от времени при включённом форвакуумном насосе.

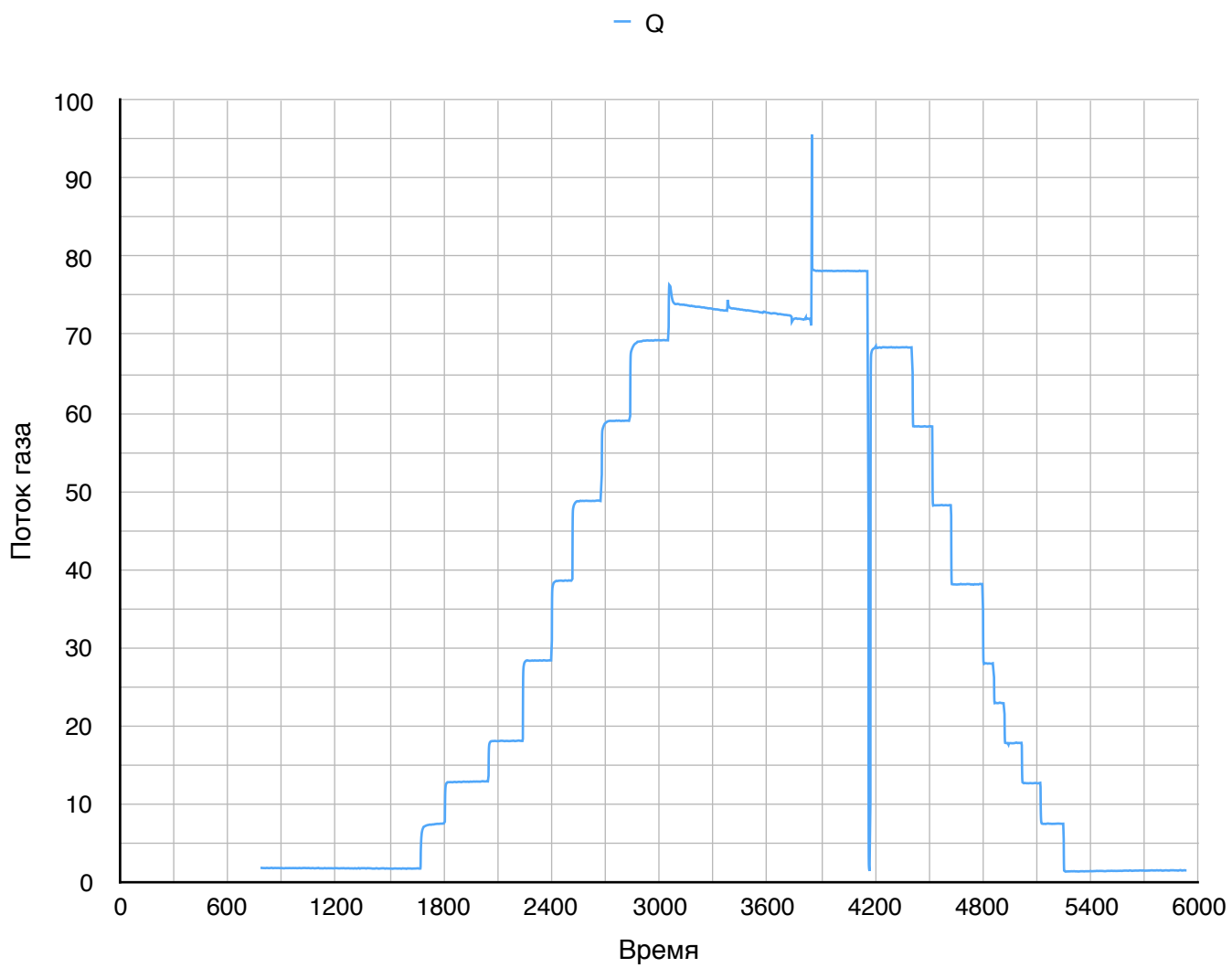


График 3. Зависимость расхода газа через FC от времени.

Приведём в таблице 1 значения установившегося давления в системе при каждом из потоков через FC.

Таблица 1

Q, sscm	B2	S
1,74	0,138	0,378260869565217
7,45	0,152	1,47039473684211
12,85	0,306	1,25980392156863
18,06	0,411	1,31824817518248
28,35	0,587	1,4488926746167
38,55	0,836	1,38337320574163
48,73	0,972	1,50401234567901
59,01	1,15	1,53939130434783
69,32	1,36	1,52911764705882
73,11	1,43	1,53377622377622
72,84	1,43	1,52811188811189
72,6	1,42	1,53380281690141
78,15	0,926	2,53185745140389
68,136	0,843	2,42476868327402
58,25	0,738	2,36788617886179
48,22	0,632	2,28892405063291
39,12	0,523	2,24397705544933
27,93	0,411	2,03868613138686
22,85	0,352	1,94744318181818
17,78	0,29	1,83931034482759
12,62	0,225	1,68266666666667
7,47	0,149	1,50402684563758
1,38	0,016	2,5875

Таблица 1. — Давление в форвакуумной части (P_2), величина газового потока (Q_{FC}), скорость откачки газа (S).

$$\frac{d(PV)}{dt} = Q_{FC} + Q_{НАТЕК} - P * S(P)$$

При установившемся давлении $\frac{d(PV)}{dt} = 0$. Тогда

$$S(P) = \frac{Q_{FC} + Q_{НАТЕК}}{P}$$

Причём при $Q_{FC} > 45$ SCCM $Q_{\text{натекания}}$ составляет менее 10% от Q_{FC} . Поэтому

$$Q \approx P * S(P) \text{ и } Q_{SCCM} \approx \frac{P}{P_0} * S(P)$$

По этой формуле рассчитаем скорость откачки газа насосом для каждого из давлений $S(P)$ (Таблица 1).

Построим график зависимости $Q_{FC}(P_2)$ (График 4). Предположив, что скорость откачки газа постоянна и не зависит от P , аппроксимируем полученную зависимость под прямую. Её коэффициент угла наклона:

$$S = 53,525 \frac{\text{SCCM}}{\text{Torr}} = 53,525 * 0,0456 = 2,44 \text{ м}^3/\text{ч}$$

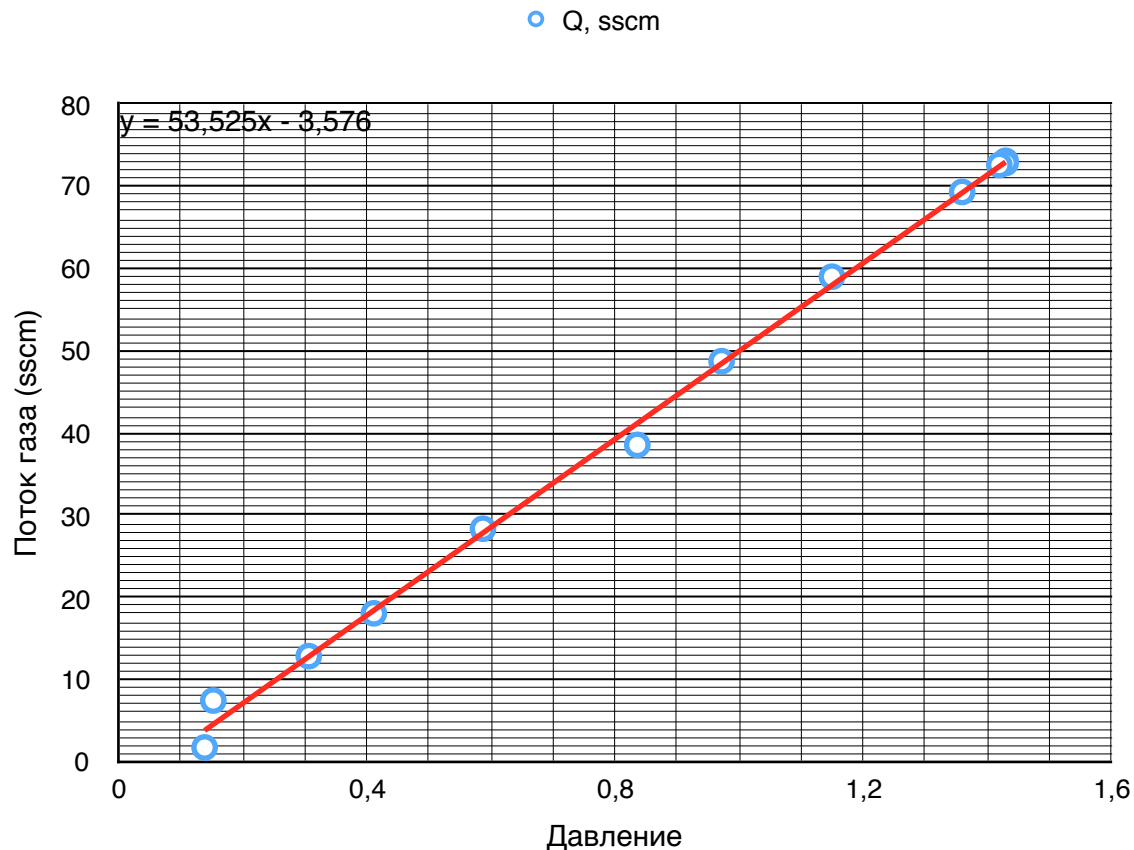


График 4. Зависимость потока газа через FC от давления в системе.

Однако на самом деле S не является константой. Выведем зависимость $S(P)$:

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

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

$$P(t) = P_0 + P(0)e^{-\frac{S_0}{V}t}$$

Подставляя получим:

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

По вычисленным в таблице 1 значениям построим график зависимости $S(P)$ (График 5) и аппроксимируем его под зависимость:

$$S_0 = 3,99$$

$$P_0 = 0,055 \text{ Torr}$$

Вычисленное S_0 отличается от найденного по графику 6 на 10%. При этом при данных давлениях .
А значит в исследуемом диапазоне быстродействие ФВН можно принять за постоянное.

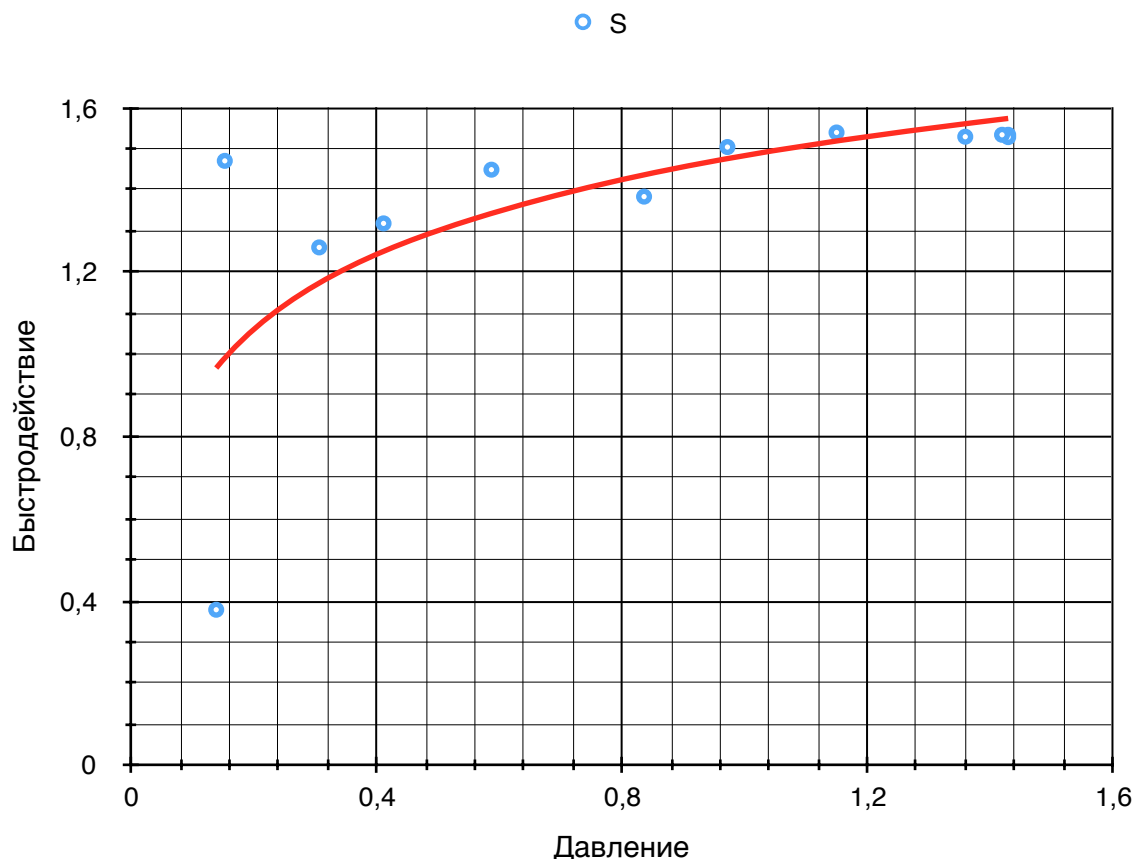


График 5. Зависимость быстродействия ФВН от давления в системе.

4.3. Определение производительности турбомолекулярного насоса

- 1) Прекращаем подачу газа через FC.
- 2) Закрываем кран K3, открываем кран K1.
- 3) Включаем турбомолекулярный насос (ТМН).
- 4) Включаем ионизационный вакуумметр В3.
- 5) Подбираем такой поток через FC, чтобы В3 показывал давления порядка $5 \cdot 10^{-4}$ Торр (в высоковакуумной части устанавливается большее давление). Ждём, пока давление в системе установится.
- 6) Прекращаем подачу газа через FC, перекрываем кран K2. Между краном K2 и диафрагмой запирается некоторое кол-во воздуха, давление которого соответствует давлению в высоковакуумной части системы. Это давление показывает В2. Перепад давлений на диафрагме создаёт поток газа сквозь неё.

Снимем зависимость давлений P2 и P3 от времени (Графики 6 и 7).

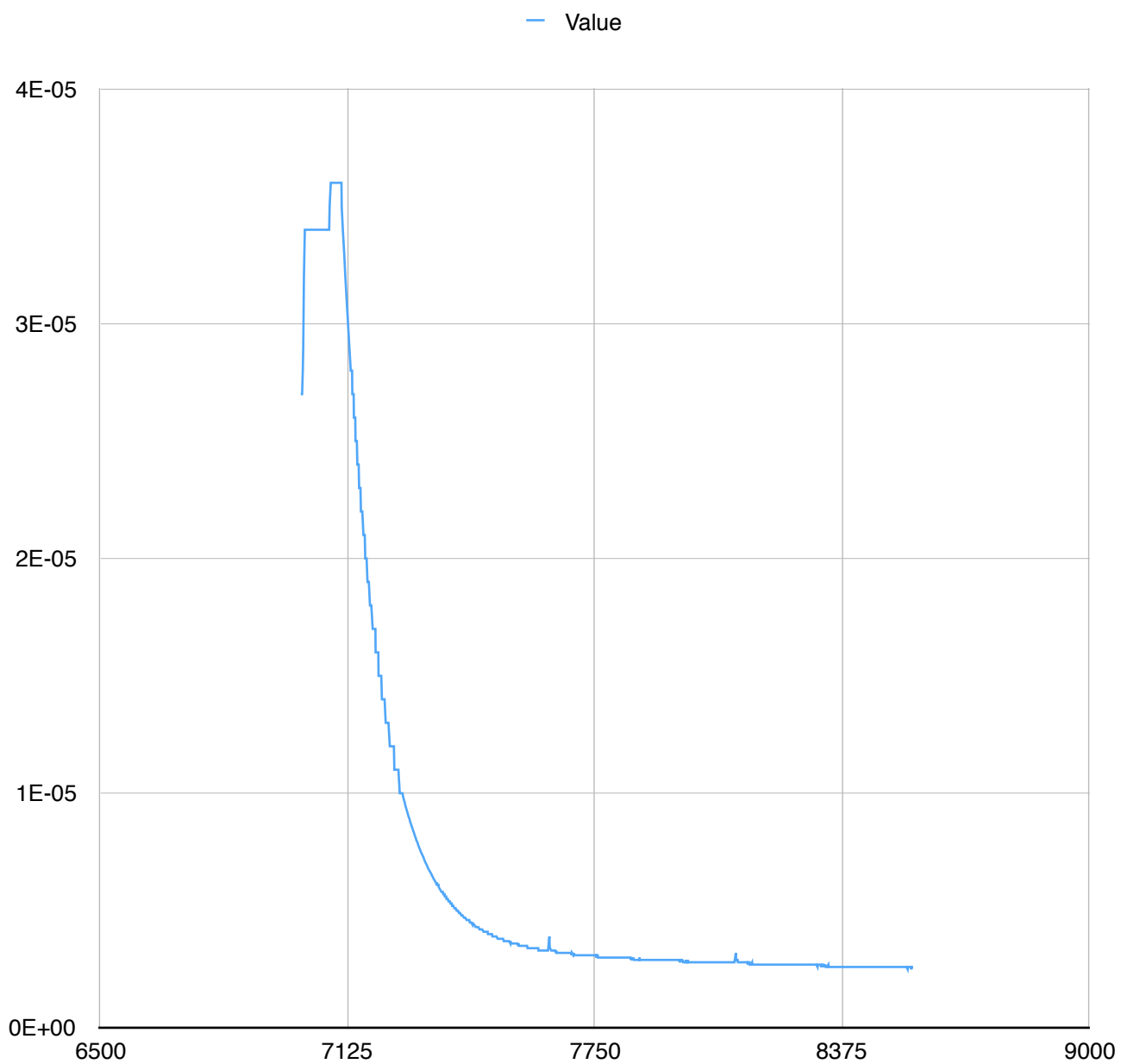


График 6. Зависимость давления P_3 (ионизационного вакуумметра) от времени.

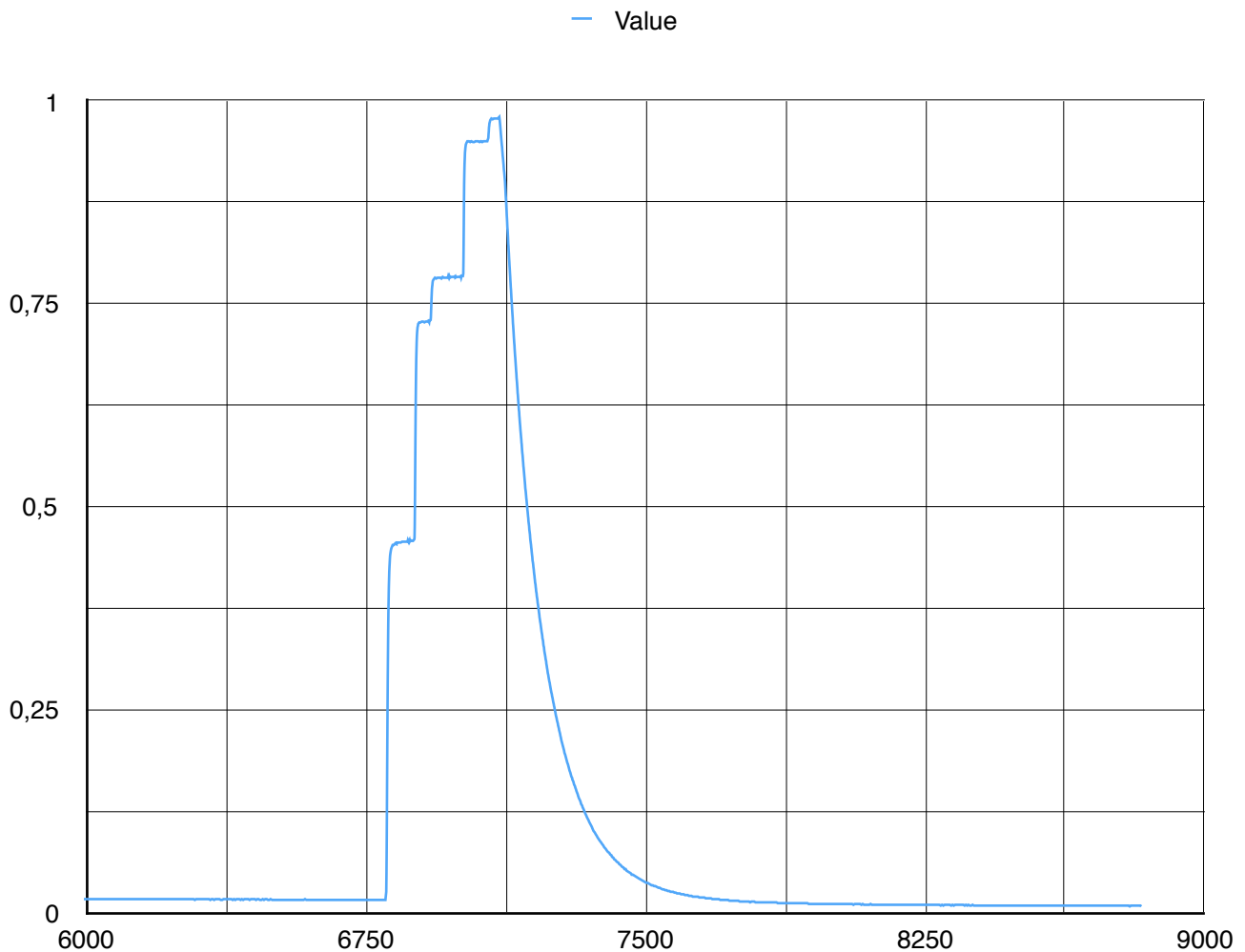


График 7. Зависимость давления P_2 (терморезистивного вакуумметра) от времени.

Определим, можно ли считать течение газа через диафрагму молекулярным. Для этого оценим длину свободного пробега молекул:

$$\lambda = \frac{kT}{\sigma P} \approx 4,85 \text{ m}$$

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

$T \approx 293 \text{ K}$ – комнатная температура

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

$P \approx 10^{-5}$ – порядок давления в высоковакуумной части системы

Диаметр отверстия равен $d = 100 \text{ мкм}$. Видно, что $d \ll \lambda$, поэтому течение газа через диафрагму можно считать молекулярным. В этом случае для потока газа верна формула:

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

P_2, P_3 – давления по разные стороны от диафрагмы (на В2 и В3)

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

μ – молярная масса воздуха

Т.к. $P_3 \ll P_2$ в процессе измерения, то

$$Q = S \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} P_2$$

Целесообразно в данном диапазоне давлений считать производительность ТМН постоянной (График 8) (это также понадобится для расчета объема рабочей камеры). Построим график

зависимости $Q(P)$ для высокого вакуума (График 8), Q рассчитывается по формуле $Q = S \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}} P_2$,
 аппроксимируем его под прямую и найдём коэффициент угла наклона, который и будет равен
 производительности ТМН:
 $S = 0,0283 \text{ м}^3/\text{с} = 28,3 \text{ л/с} = 101,88 \text{ м}^3/\text{ч}$

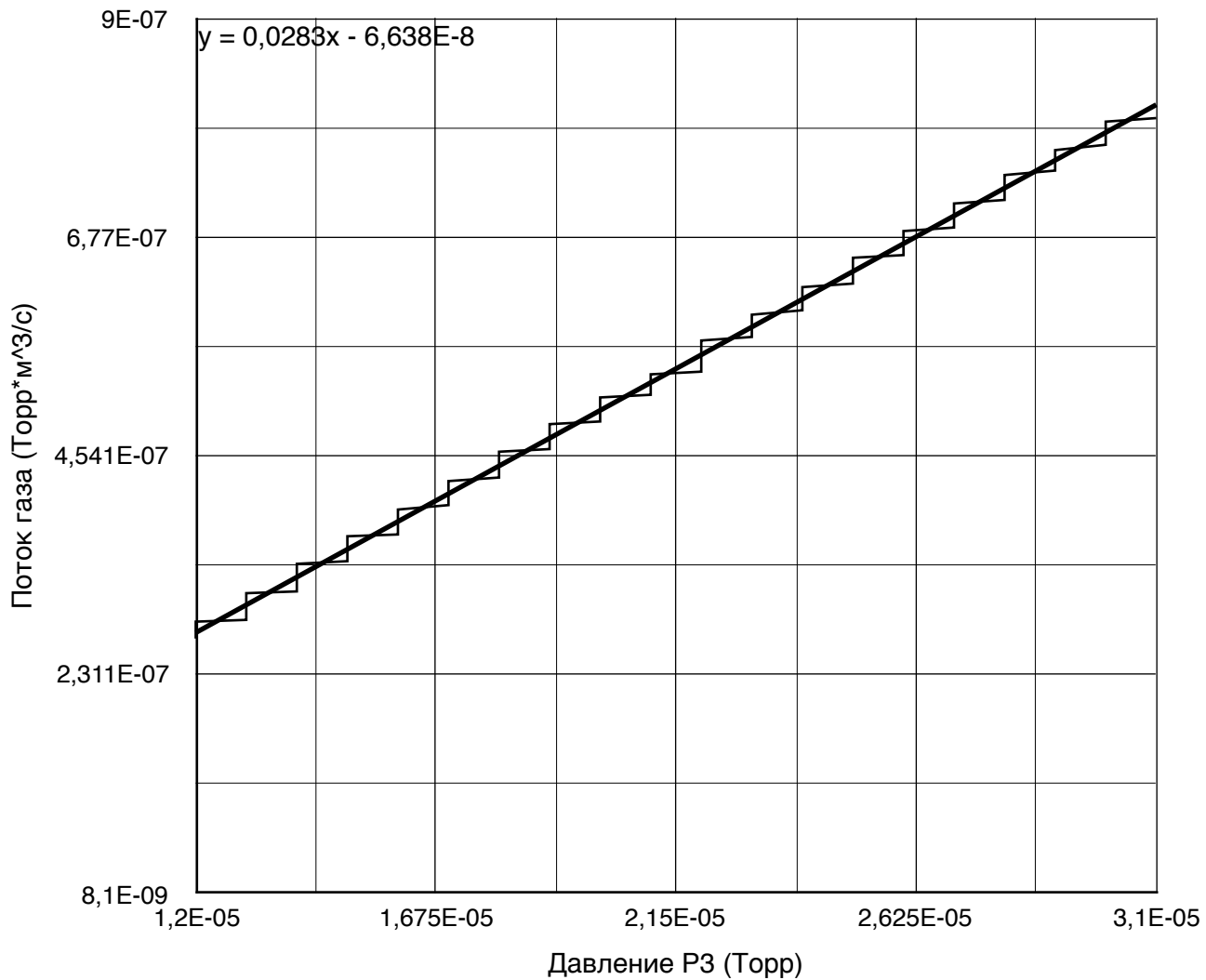


График 8. Зависимость потока газа через диафрагму от давления P_3 в высоковакуумной части

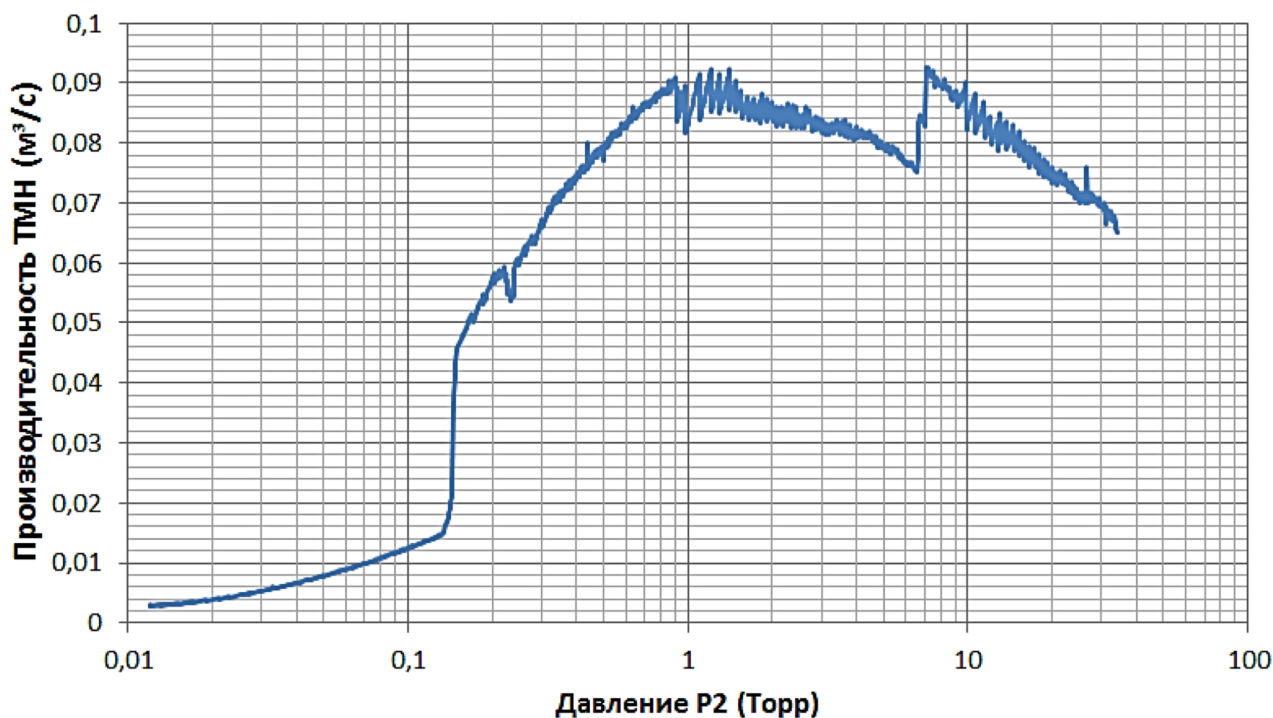


График 9. Зависимость производительности ТМН от впускного давления

4.3. Оценка объёма рабочей камеры

- 1) Откроем все краны, кроме К4.
- 2) Устанавливаем на FC поток в 2 SCCM, ждем установления давления в камере, затем перекрываем поток (ТМН включён)
- 3) Снимем зависимость показаний ВЗ от времени.

Воспользуемся формулой (8). Зависимость $\lg P$ от t вначале будет представлять прямую линию с угловым коэффициентом, равным

$$\frac{d \lg(P(t) - P_0)}{dt} = \frac{S_0}{2,303V}$$

$$V = \left(\frac{d \lg(P(t) - P_0)}{dt} \right)^{-1} \frac{S_0}{2,303}$$

Приняв в качестве предельного значения $P_0 = 3,9 \cdot 10^{-6}$ Торр, построим график зависимости давления от времени (График 9) и график зависимости $\lg(P(t) - P_0)$ от времени (График 10). Из первого графика видно, что нужно использовать лишь три точки.

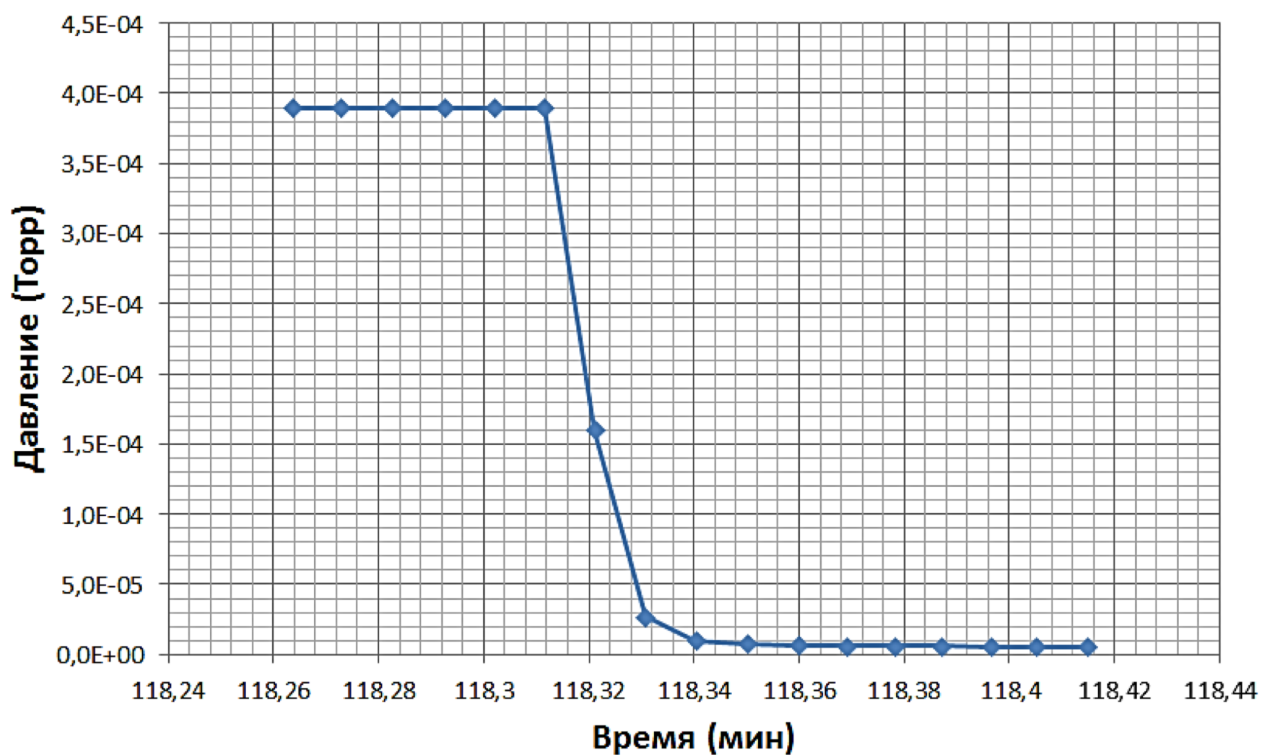


График 10. Зависимость давления от времени.

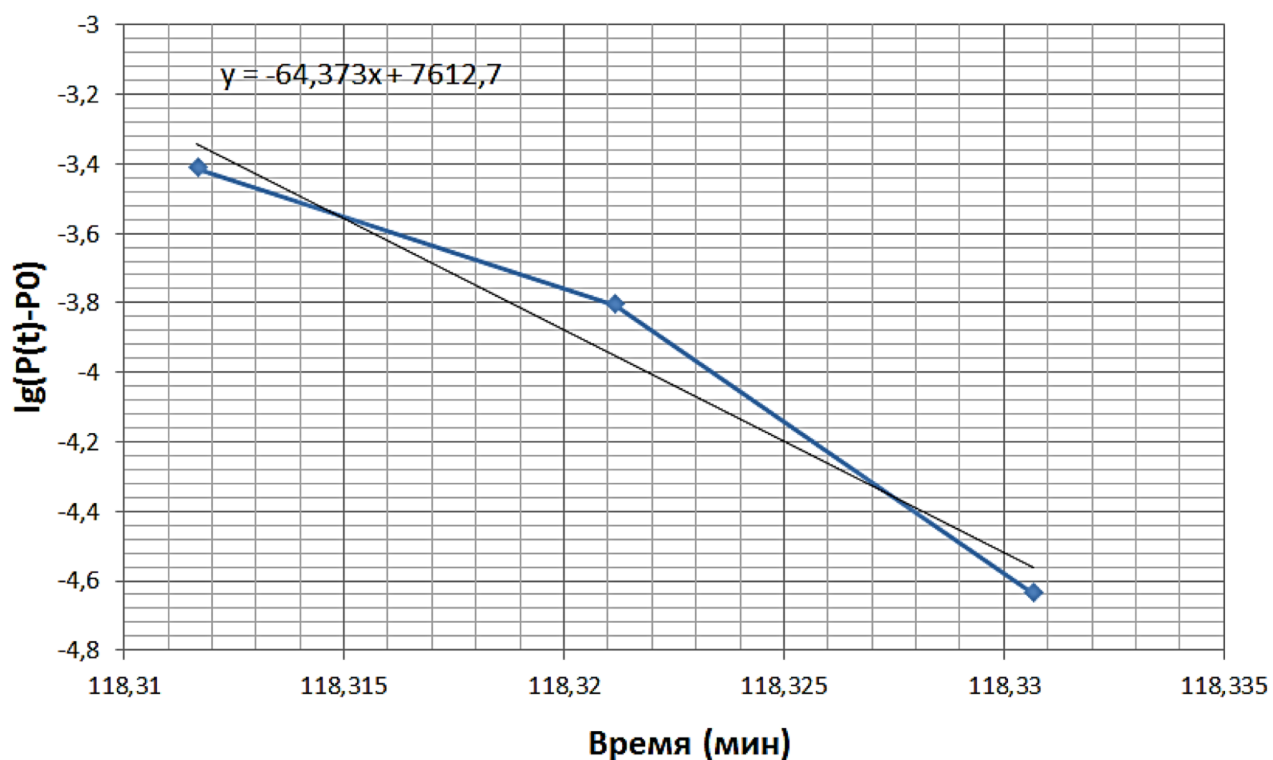


График 11. Зависимость $\lg(P(t)-P_0)$ от времени.

Подставив значение коэффициента угла наклона (с учётом того, что время отложено в минутах, коэффициент угла наклона нужно поделить на 60) и быстродействие ФВН в формулу (14), получим $V = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 2,0 \text{ л}$.

Выводы

- 1) В ходе работы мы ознакомились с основными принципами работы вакуумной техники.
- 2) Ознакомились с методами получения и измерения вакуума. Получили высокий вакуум порядка $3 \cdot 10^{-6}$ Торр. Нашли диапазоны рабочих давлений вакуумметров (емкостной – 10-760 Торр, терморезистивный наиболее эффективен при 10^{-3} - 10 Торр, ионизационный – 10^{-6} – 10^{-3} Торр)
- 3) Оценили быстродействие вакуумных насосов (форвакуумного и турбомолекулярного), придя к выводу, что в исследуемом диапазоне давлений их можно считать постоянными.
ФВН: $S = 2,44 \text{ м}^3/\text{ч}$
ТМН: $S = 101,88 \text{ м}^3/\text{ч}$
- 4) Оценили объем рабочей камеры: $V \approx 2,0 \text{ л}$

6. 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.