

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МФТИ, Физтех)

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОНИКИ

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Работу выполнил

Д.А.Воронин Б04-407

(подпись, дата)

_____ В.С.Анисимов Б04-407

(подпись, дата)

_____ М. .Кручинин Б04-407

(подпись, дата)

Работу принял, оценка

_____ (подпись, дата, оценка)

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	3
Теоретические сведения	3
Лабораторная установка	5
Ход работы	7
4.1. Форвакуумный насос	7
4.2. Турбомолекулярный насос	9
4.4. Поток воздуха через диафрагму	9
4.5. Производительность турбомолекулярного насоса	11
4.6. Определение объема вакуумной системы	11
Анализ результатов	13
Выводы	14
Приложение	14

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные понятия, используемые в работе

- Поток газа Q — количество газа, проходящего через поперечное сечение трубопровода за единицу времени
- Проводимость U — способность вакуумной системы пропускать газ:

$$U = \frac{Q}{(P_2 - P_1)} \quad (1)$$

- Быстрота действия насоса S_n — объём газа, поступающего в насос в единицу времени при давлении P_1 :

$$S_n = -\frac{dV_n}{d\tau} \Big|_{P_1} \quad (2)$$

Основное уравнение вакуумной техники

Для системы, состоящей из откачиваемого объема, трубопровода и насоса, справедливо соотношение:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_n} \quad (3)$$

где U — проводимость трубопровода, соединяющего насос с откачиваемым объемом.

Режимы течения газа

Вязкостный режим (ламинарное течение) характерен для высоких давлений. Проводимость круглого трубопровода:

$$U_{\text{тв}} = \frac{\pi r_0^4 (P_2 + P_1)}{16\eta l} \quad (4)$$

Молекулярный режим возникает при низких давлениях. Проводимость круглого трубопровода:

$$U_{\text{мол}} = \frac{\pi d^3 \langle v \rangle}{12l} \quad (5)$$

где $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ — средняя тепловая скорость молекул.

Проводимость диафрагмы

Для молекулярного течения через отверстие проводимость определяется формулой:

$$U_{\text{отв}} = \frac{S\langle v \rangle}{4} = 91 \cdot d^2 \quad [\text{л/с}] \quad (6)$$

где d выражено в см.

Уравнение откачки

Процесс откачки описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S(P) \cdot P}{V} \quad (7)$$

При постоянной быстроте действия $S = \text{const}$ решение имеет вид:

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right) \quad (8)$$

В реальных условиях, когда S зависит от давления, используется линеаризованная форма:

$$\ln P(t) = \ln P_0 - \frac{S}{V} \cdot t \quad (9)$$

Методы измерения быстроты действия

Метод постоянного объема основан на измерении зависимости $P(t)$:

$$S_n = \frac{V}{\tau} \ln \frac{P_0}{P_1} \quad (10)$$

Метод постоянного давления используется для высокопроизводительных насосов:

$$S_n = \frac{Q}{P_n} \quad (11)$$

где Q — измеренный поток газа, напускаемого в систему.

Критерий режима течения

Режим течения газа определяется соотношением между длиной свободного пробега молекул λ и характерным размером системы d :

- Вязкостный режим: $\lambda \ll d$
- Молекулярный режим: $\lambda \gg d$
- Переходный режим: $\lambda \sim d$

Длина свободного пробега вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} d_M^2 P} \quad (12)$$

3 ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

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

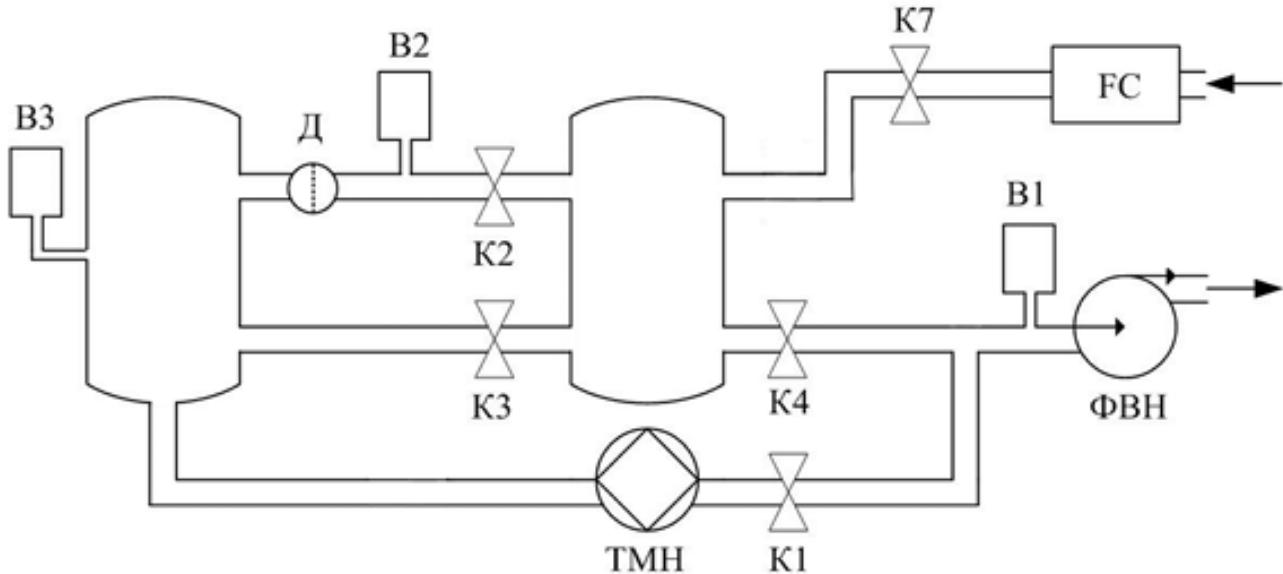


Рисунок 1: Схема лабораторной установки

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
- Δ - диафрагма
- FC - регулятор газового потока (flow controller)
- ТМН - турбомолекулярный насос
- ФВН - форвакуумный насос

Таблица 1: Характеристики форвакуумного насоса

Параметр	5	9	14	18
Фланец (вход)	DN 25 ISO-KF			
Фланец (выход)	DN 25 ISO-KF			
Скорость откачки, м ³ /ч	5	9	14	18
Предельное давление (без газового балласта), мбар		$5 \cdot 10^{-4}$		
Предельное давление (с газовым балластом), мбар		$1 \cdot 10^{-2}$		
Ёмкость масляной системы, л	0,83	0,95	0,95	0,98

Таблица 2: Технические характеристики масс-спектрометра В3

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых масс	1–100 или 1–200 а.е.м.
Длина фильтра	4" (100 мм)
Детектор	чаша Фарадея или чаша Фарадея с УВЭ (умножителем вторичных электронов)
Катоды	Вольфрамовый или иридиевый, покрытый окисью тория
Максимальное рабочее давление	1×10^{-4} торр ($1,3 \times 10^{-4}$ мбар)
Чувствительность ионного источника	2×10^{-4} А/мбар
Мин. определяемое парциальное давление (накопление в течение 300 мс, 3 среднеквадратических отклонения)	2×10^{-11} торр ($2,6 \times 10^{-11}$ мбар) — чаша Фарадея 5×10^{-14} торр ($6,7 \times 10^{-14}$ мбар) — умножитель

4 ХОД РАБОТЫ

4.1 Форвакуумный насос

После ознакомления с установкой был запущен форвакуумный насос, ёмкостной (В1) и терморезисторный (В2) вакуумметры и регулятор газового потока, изначально установленный на 0 см³/мин.

Затем была получена зависимость давления от времени при откачке системы форвакуумным насосом (рис. 2) и зависимость давления от величины газового потока (рис. 3) Получена зависимость производительности насоса $S = Q/B$ от входного давления.

Таблица 3: Данные при увеличении Q_{set} от 5 до 100

Q_{set}	$Q_{\text{факт}}$	$B2$	S
5	6.9	0.164	42.07
10	12.3	0.242	50.83
15	17.47	0.308	56.72
20	22.62	0.371	60.97
25	27.74	0.431	64.36
30	32.83	0.488	67.27
35	37.87	0.545	69.49
40	42.96	0.599	71.72
45	48.00	0.655	73.28
50	53.00	0.709	74.75
55	58.12	0.764	76.07
60	63.15	0.818	77.20
65	68.19	0.874	78.02
70	73.20	0.915	80.00
75	78.27	0.944	82.91
80	83.26	0.973	85.57
85	88.25	1.000	88.25
90	93.28	1.060	88.00
95	98.37	1.120	87.83
100	103.40	1.180	87.63

Таблица 4: Данные при уменьшении Q_{set} от 100 до 0

Q_{set}	$Q_{\text{факт}}$	$B2$	S
95	98.32	1.12	87.79
90	93.23	1.07	87.13
85	88.24	1.01	87.37
80	83.12	0.975	85.25
75	78.12	0.946	82.58
70	73.06	0.917	79.67
65	68.03	0.878	77.48
60	62.99	0.824	76.44
55	57.94	0.769	75.34
50	52.89	0.713	74.18
45	47.80	0.658	72.64
40	42.79	0.602	71.08
35	37.70	0.545	69.17
30	32.65	0.487	67.04
25	27.58	0.428	64.44
20	22.46	0.368	61.03
15	17.36	0.308	56.36
10	12.20	0.235	51.91
5	6.90	0.159	43.40
0	1.07	0.033	32.42

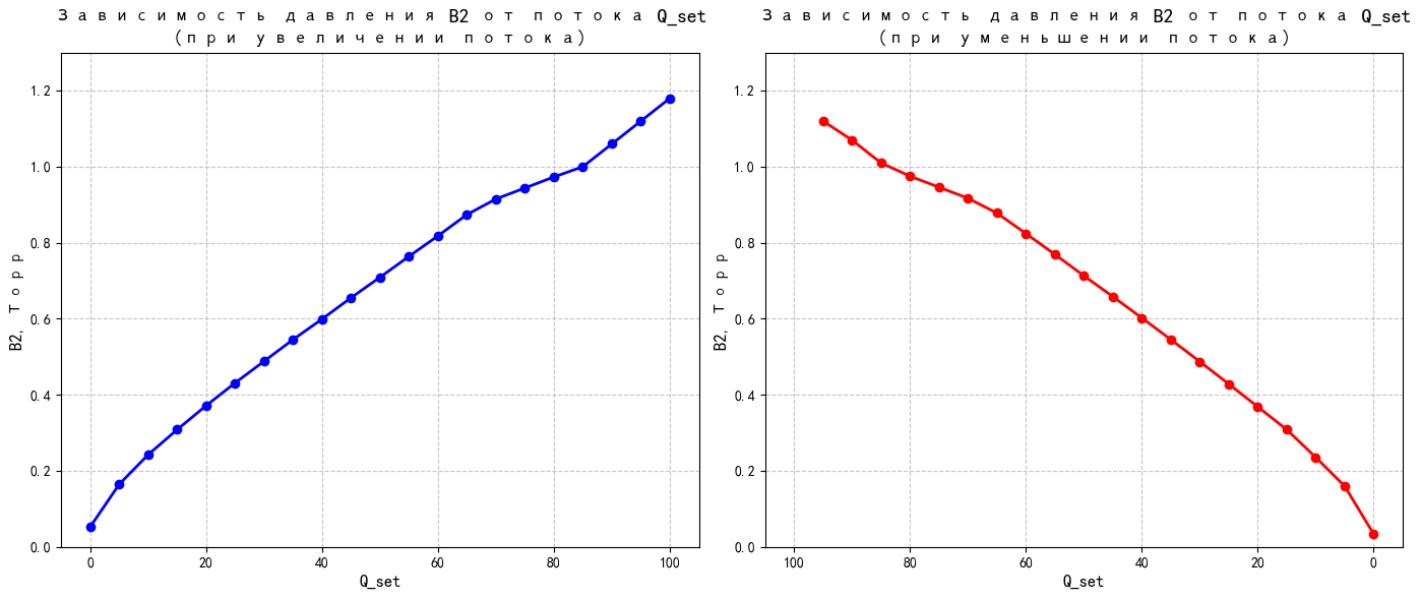


Рисунок 2: Зависимость B2 от Q_{Set}

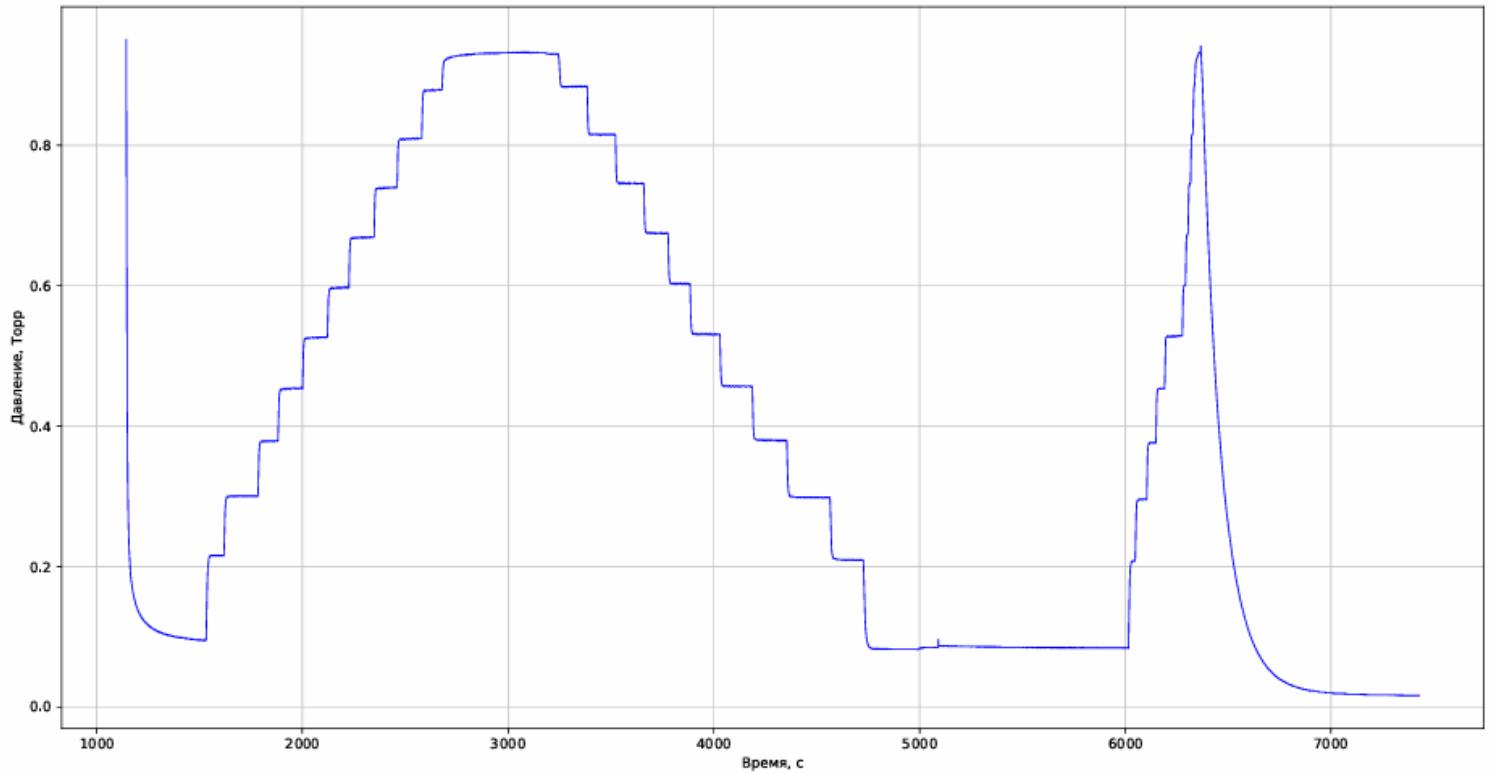


Рисунок 3: График зависимости давления в форвакуумной части от времени

4.2 Параметры установки

- Диаметр диафрагмы: $d = 100 \text{ мкм} = 0.01 \text{ см}$
- Газ: воздух (молярная масса $M = 29 \text{ г/моль}$)
- Температура: $T = 293 \text{ K}$

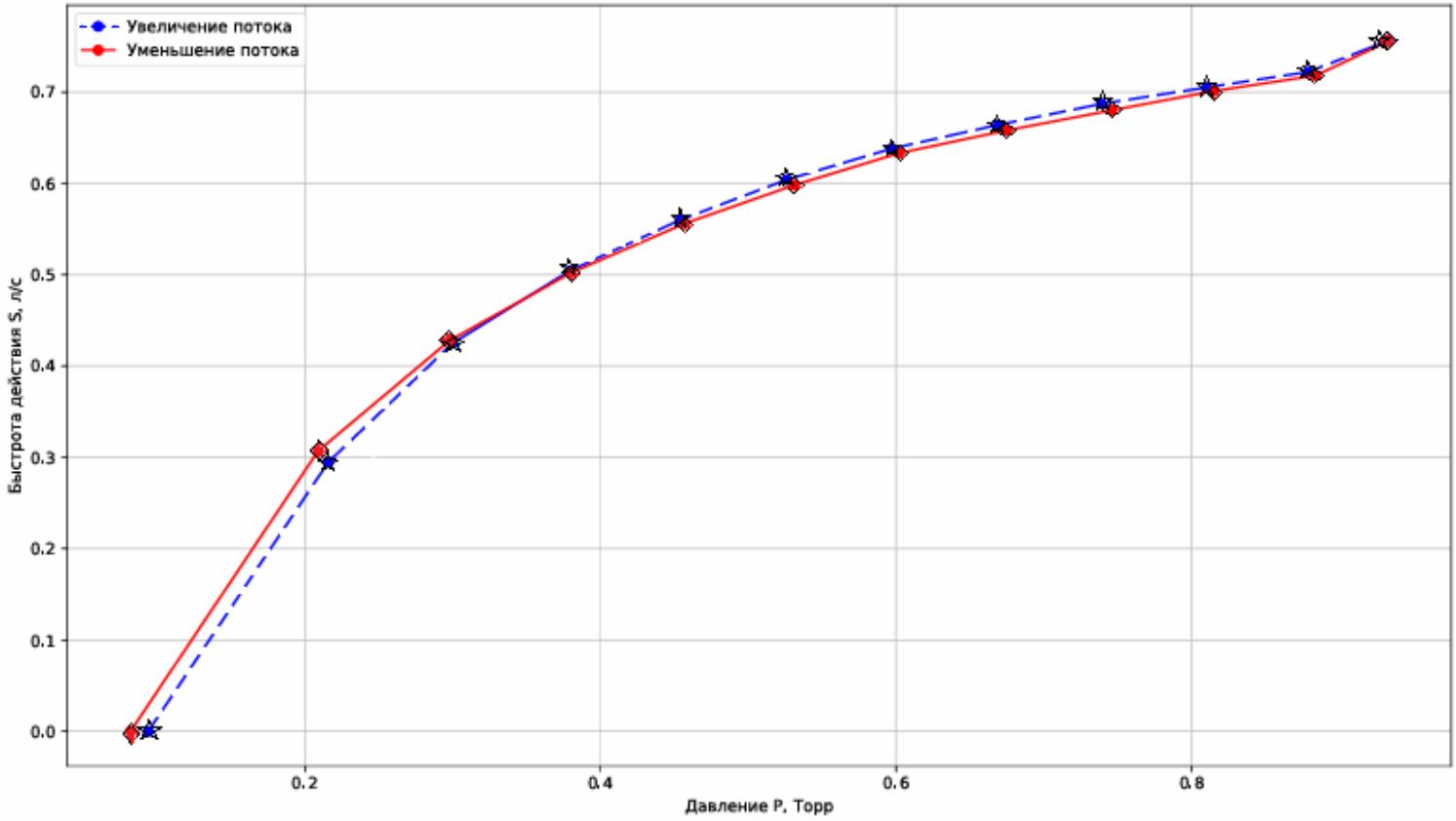


Рисунок 4: График зависимости быстроты действия форвакуумного насоса от давления

4.3 Турбомолекулярный насос

Был включён турбомолекулярный насос и ионизационный вакуумметр (В3), после чего была получена зависимость давления в высоковакуумной части от времени при откачке и при потоке газа через диафрагму. Появление скачков на некоторых графиках связано с тем, что ионизационный вакуумметр переключает режим работы, повышая накал нити при уменьшении давления.

4.4 Поток воздуха через фиафрагму

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

$$\lambda = \frac{kT}{\sigma P} \approx 1,24 \text{ м},$$

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

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

$P \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Торр – максимальное давление в высоковакуумной части системы

Видно, что $d \ll \lambda$, поэтому течение газа через диафрагму можно считать молекулярным. Следовательно, справедлива формула нахождения молекулярного потока через диафрагму:

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

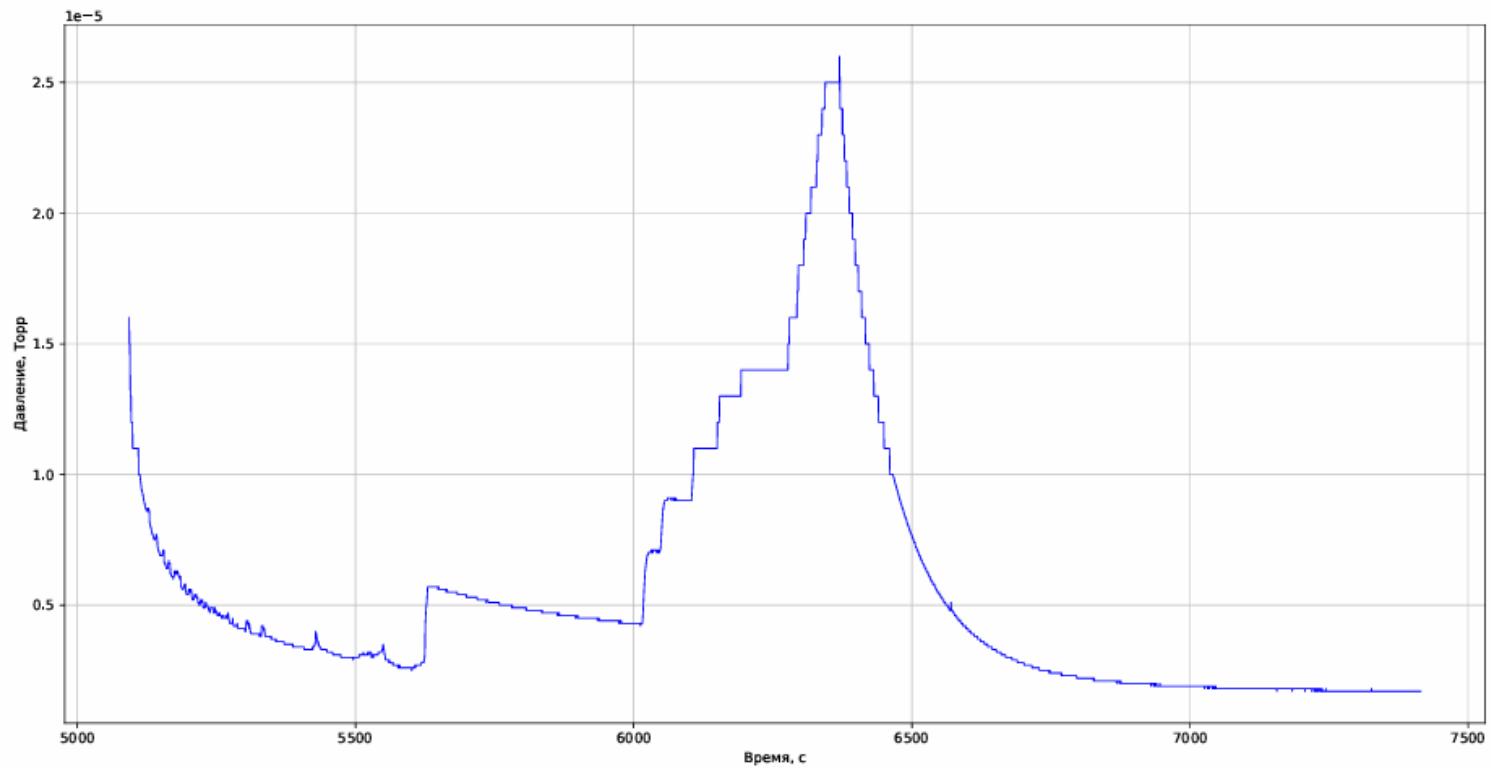


Рисунок 5: График зависимости давления в высоковакуумной части от времени

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.

Подставив величины, получаем, что

$$Q \approx 8.9 \cdot 10^{-4} (P_2 - P_3) \text{ л/с (давление выражено в Торрах)}$$

График зависимости величины потока через диафрагму от времени изображён на рисунке:

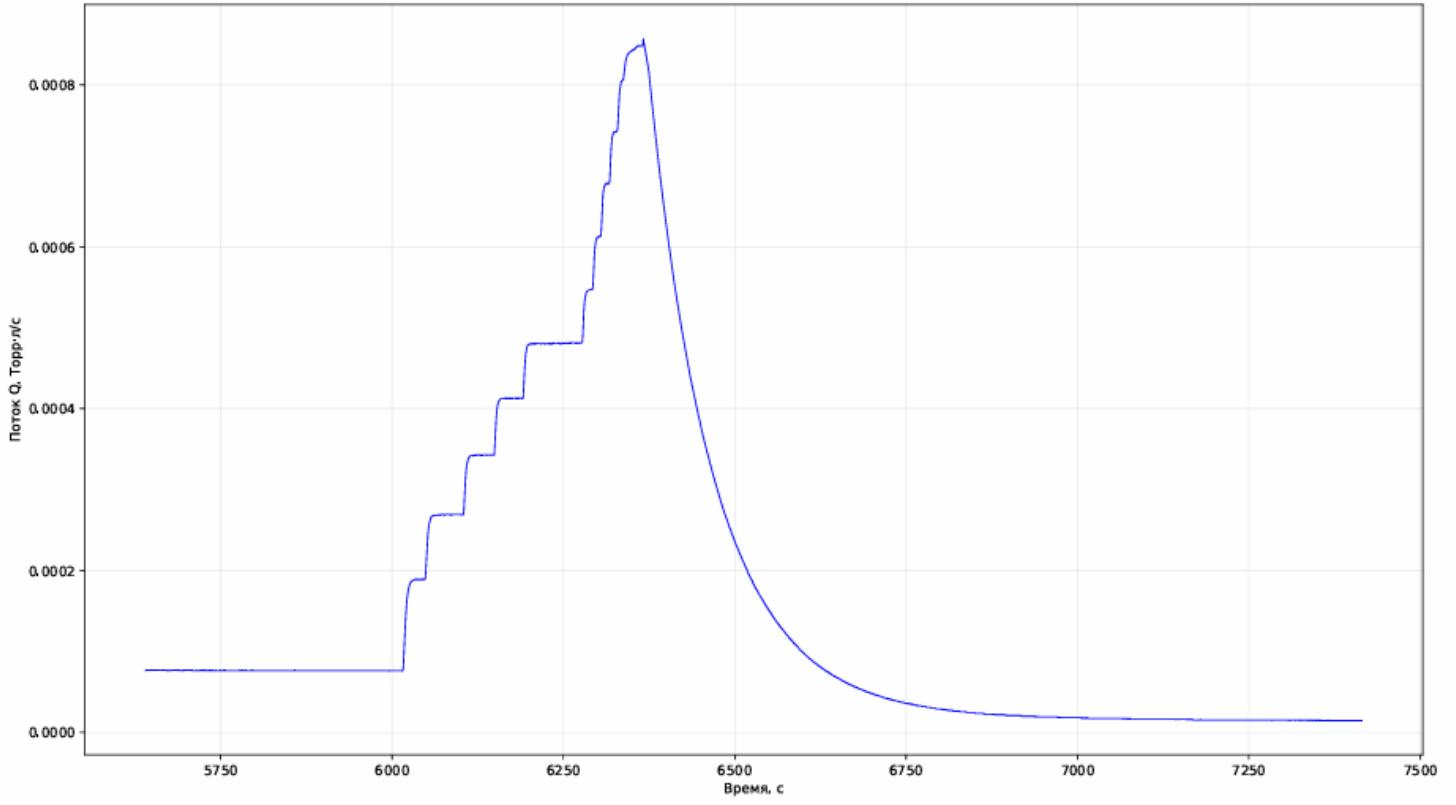


Рисунок 6: График зависимости потока воздуха через диафрагму от времени

4.5 Производительность турбомолекулярного насоса

Рассмотрим модель потока через турбомолекулярный насос. В установившемся режиме выполняется баланс:

$$P_3 \cdot S(P_3) = Q$$

Отсюда определим быстроту действия насоса определим через значение потока:

$$S(P_3) = \frac{Q}{P_3}$$

4.6 Определение объёма вакуумной системы

Процесс откачки описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S(P) \cdot P}{V}$$

где:

- P – давление в системе, Торр
- t – время, с
- $S(P)$ – быстрота действия насоса, л/с
- V – объём системы, л

При условии $S = \text{const}$ на выбранном участке, уравнение имеет решение:

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right)$$

где P_0 – начальное давление при $t = 0$.

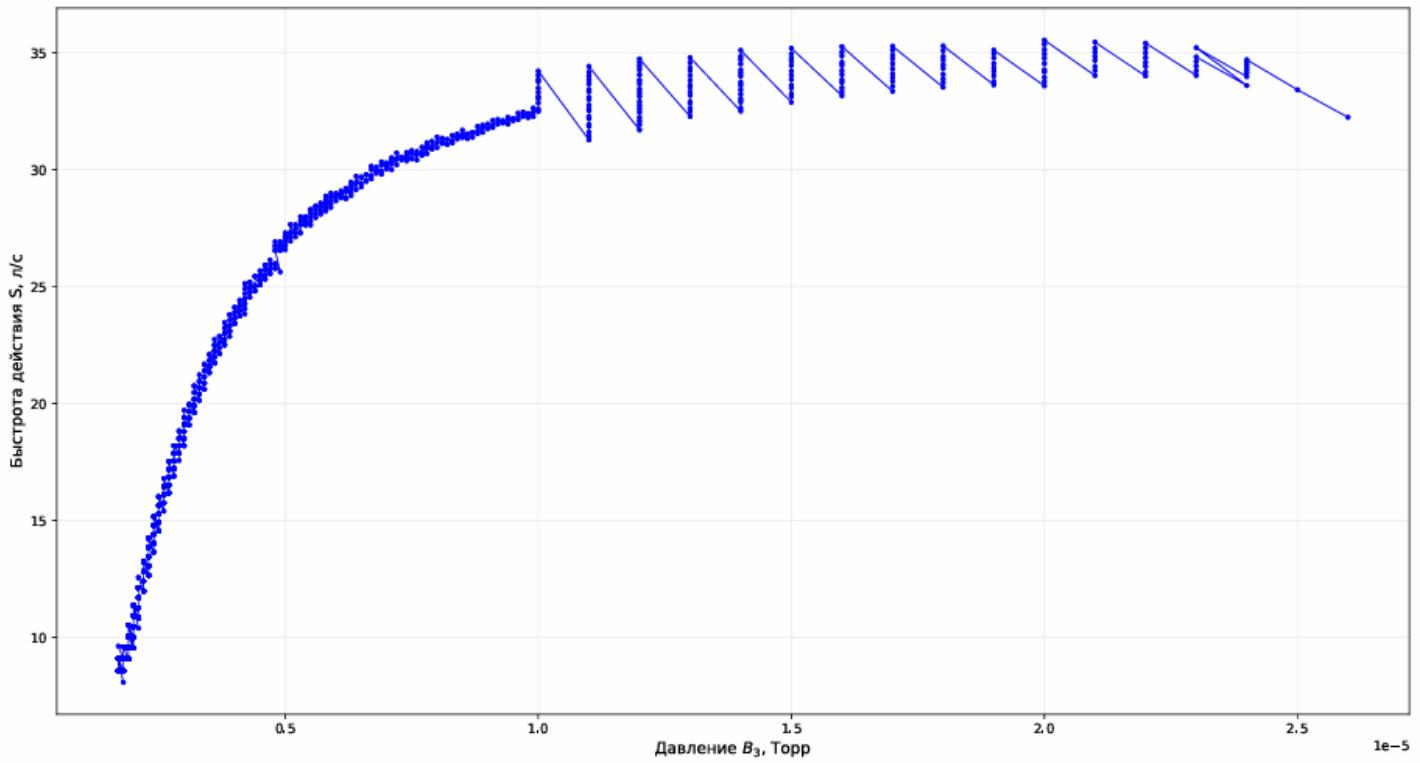
Прологарифмируем уравнение откачки:

$$\ln P(t) = \ln P_0 - \frac{S}{V} \cdot t$$

Получили линейную зависимость вида

$$y = A + Bx$$

Для расчётов был взят участок, на котором S почти линейно зависела от времени, найдено её среднее значение $S_{\text{ср}} = 33,8 \text{ см}^3/\text{с}$, а также угловой коэффициент наклона зависимости $\ln P(t) = \ln P_0 - \frac{S}{V} \cdot t$, то есть отсюда $S/V \approx 0,00938 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, $V \approx 3100 \text{ см}^3$ или 0.0031 м^3 .



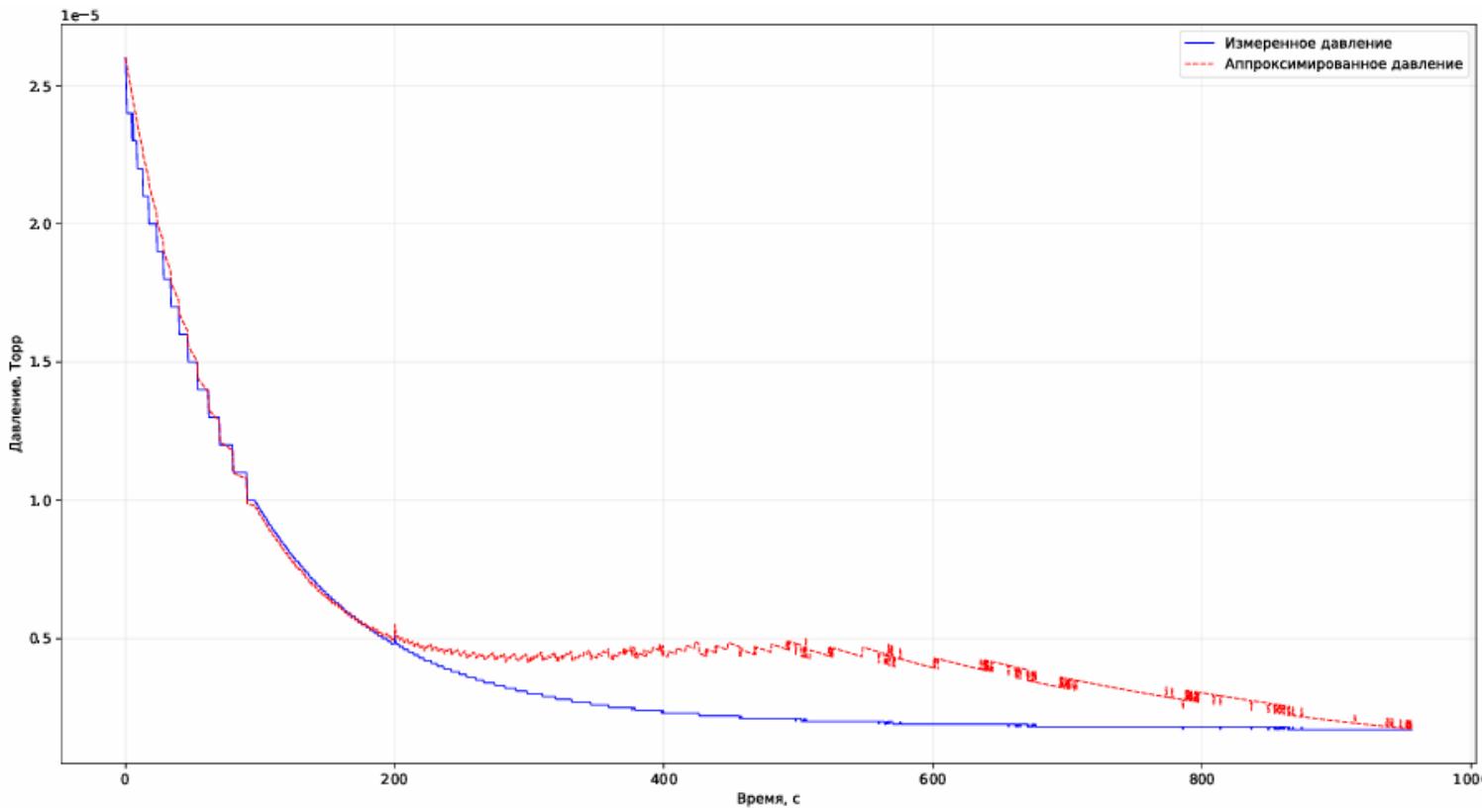


Рисунок 8: Аппроксимация давления в высоковакуумной части

4.7 Оценка применимости формулы

1. Быстрота действия насоса S постоянна на выбранном временном интервале
2. Отсутствуют значительные натекания газа в системе
3. Температура системы постоянна
4. Однотипный режим течения газа (молекулярный или вязкостный)

5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики форвакуумного насоса

- Быстрота действия форвакуумного насоса при атмосферном давлении составляет около 0,75 л/с
- Зависимость $S(P)$ показывает относительную стабильность производительности насоса
- Предельное давление в форвакуумной части, достигнутое в результате выполнения работы, составляет 0,016 Торр.

Характеристики турбомолекулярного насоса

- Быстрота действия турбомолекулярного насоса варьируется от $(8 \text{ до } 36) * 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ в рабочем диапазоне давлений

- Насос работает в диапазоне давлений $10^{-5} - 10^{-3}$ Торр, предельное давление – $1,7 \cdot 10^{-6}$ Торр
- Зависимость $P_3(t)$ при несильно низких давлениях аппроксимируется функцией $P(t) = P_0 \cdot \exp(-\frac{S}{V} \cdot t)$

Анализ течения через диафрагму

- Подтверждён молекулярный режим течения ($d \ll \lambda$)
- Рассчитанная проводимость диафрагмы соответствует теоретическим ожиданиям
- Поток через диафрагму стабилен в установившемся режиме

6 ВЫВОДЫ

В ходе проведённой работы были достигнуты следующие результаты:

Изучены и успешно применены на практике основы функционирования вакуумного оборудования, включая форвакуумный пластинчато-роторный, турбомолекулярный насосы и вакуумметры разных систем.

Проведён экспериментальный анализ рабочих характеристик используемых насосов.

Экспериментально подтверждена справедливость использования формулы молекулярного течения для расчёта газового потока через диафрагму.

Рассчитан теоретический объём вакуумной системы.

Достигнуто предельное остаточное давление в системе на уровне 10^{-6} Торр.

Применённые методики измерений в целом доказали свою эффективность, однако для некоторых задач были выявлены ограничения по их применению.

7 Приложение

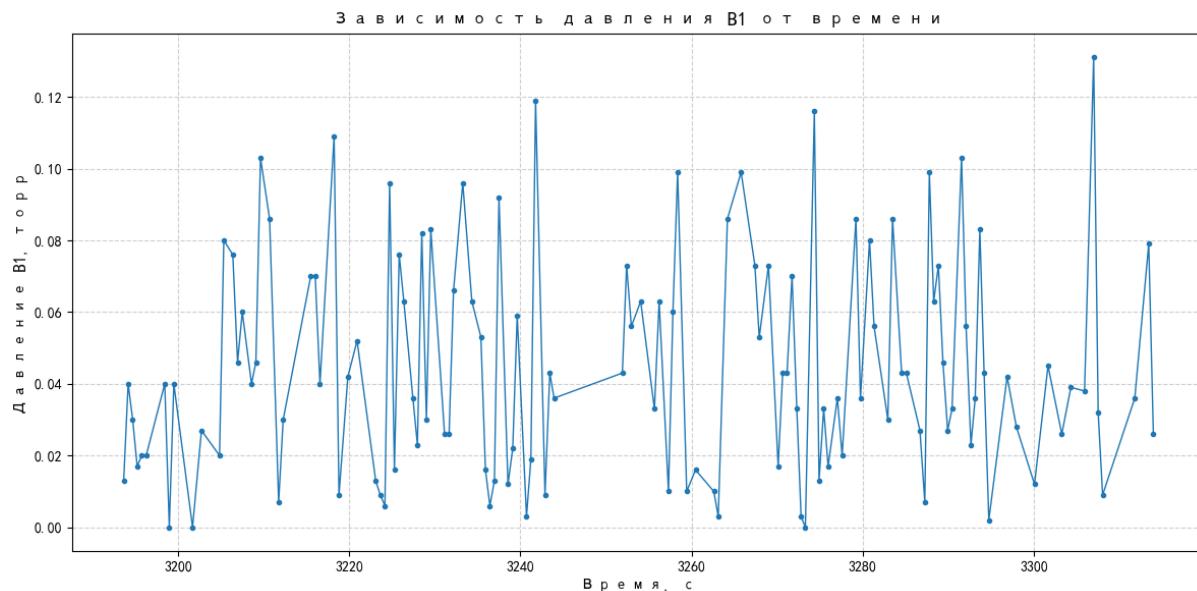


Рисунок 9: Зависимость давления от времени емкостного насоса B1