

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа  
по курсу Вакуумная электроника  
**Методы**  
**получения высокого вакуума**

Винокуров Владислав  
Рагозина Елизавета  
Струков Олег  
Группа Б04-404

Долгопрудный, 2025 г.

## Цель работы

1. Ознакомиться с принципами работы вакуумной техники: пластинчато-роторного насоса, турбомолекулярного насоса, 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.

## Теоретическая часть

### 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  $P_1$ :

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

### 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  $\lambda$  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:

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

# Лабораторная установка

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

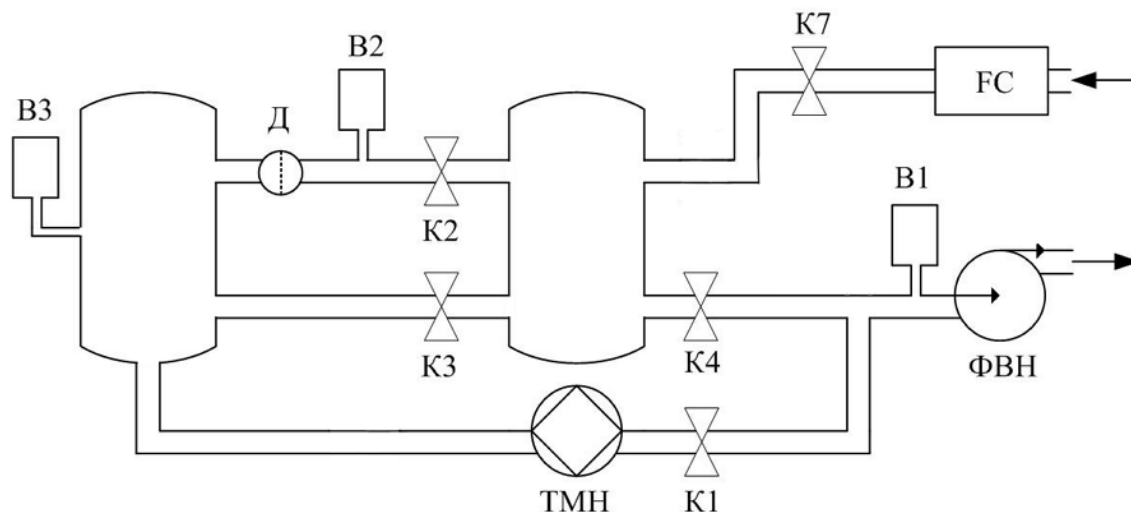


Рис. 1: Схема лабораторной установки

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)
- TMH - турбомолекулярный насос
- ФВН - форвакуумный насос

## Ход работы

### Форвакуумный насос

После ознакомления с установкой был запущен форвакуумный насос, ёмкостной ( $B_1$ ) и терморезисторный ( $B_2$ ) вакуумметры и регулятор газового потока, изначально установленный на  $0 \text{ см}^3/\text{мин}$ . 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  $S = Q/P$  от входного давления. Численные результаты приведены в таблице 1.

## Турбомолекулярный насос

Далее был включён турбомолекулярный насос и ионизационный вакуумметр (ВЗ), 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.

### Параметры установки

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

### Поток воздуха через диафрагму

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

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

$P \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$  – 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:

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

где  $P_2, P_3$  - давления на В2 и В3 соответственно

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

$\mu$  - молярная масса воздуха.

Подставив величины, получаем, что

$$Q \approx 9,1 \cdot 10^{-4} (P_2 - P_3) \text{ л/с (давление выражено в Торрах)}$$

График зависимости величины потока через диафрагму от времени изображён на рисунке 6.

### 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:

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

## Определение объёма вакуумной системы

### Основное уравнение откачки

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

### Решение для постоянной быстроты действия

При условии  $S = const$  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  $t = 0$ .

### Линеаризация зависимости

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  $S_{\text{ср}} = 33,8$  л/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,  $V \approx 3600$  л.

При попытке графической аппроксимации было выяснено, что начальную часть кривой лучше всего описывает зависимость с  $V \approx 3600$  л. Данный вариант изображён на рис. 8.

### Условия применимости аппроксимирующей формулы

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

## Анализ полученных 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 до 36 л/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  $P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right)$

### Анализ течения через диафрагму

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

### Оценка точности определения объёма

- Рассчитанный объём системы (3600 л) не является правдоподобным

## Выводы

В результате выполнения работы

1. Освоены принципы работы вакуумного оборудования: форвакуумного пластинчато-роторного насоса, турбомолекулярного насоса, вакуумметров различных типов
2. Экспериментально определены характеристики насосов
3. Подтверждена применимость формулы молекулярного течения для расчёта потока через диафрагму
4. Определён теоретический объём вакуумной системы
5. Получено предельное минимальное давления порядка  $10^{-6}$  Торр
6. Методики измерений показали свою работоспособность, однако применимость их в некоторых случаях ограничена.

## Приложение

Qset, см <sup>3</sup> /мин	Q, см <sup>3</sup> /мин	P, Торр	S, л/с
0	0	0,094	0
5	5,03	0,216	0,295
10	10,07	0,300	0,425
15	15,07	0,379	0,504
20	20,07	0,454	0,560
25	25,06	0,526	0,604
30	30,07	0,597	0,638
35	35,07	0,669	0,664
40	40,07	0,739	0,687
45	45,07	0,810	0,705
50	50,10	0,879	0,722
55	55,50	0,931	0,755
60	55,76	0,933	0,757
55	55,40	0,931	0,754
50	50,08	0,884	0,718
45	45,08	0,815	0,701
40	40,06	0,746	0,680
35	35,06	0,675	0,658
30	30,07	0,602	0,633
25	25,06	0,531	0,598
20	20,06	0,457	0,556
15	15,07	0,380	0,502
10	10,07	0,298	0,428
5	5,06	0,209	0,307
0	0	0,082	0

Таблица 1: Зависимость давления и быстроты действия от газового потока



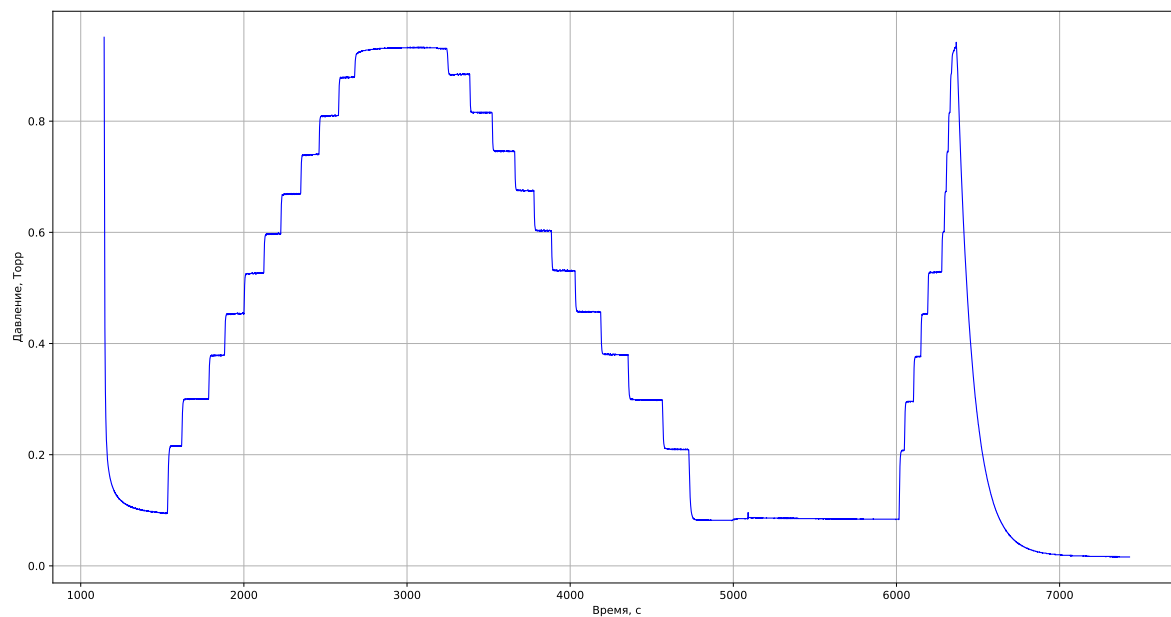


Рис. 2: График зависимости давления в форвакуумной части от времени

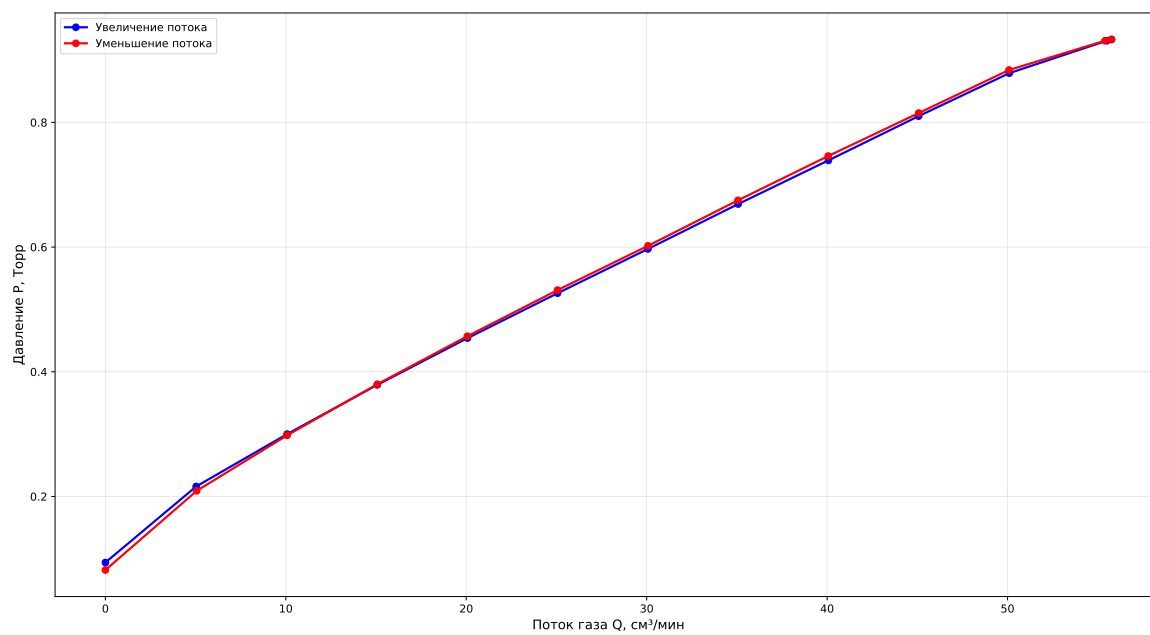


Рис. 3: График зависимости давления в форвакуумной части от газового потока

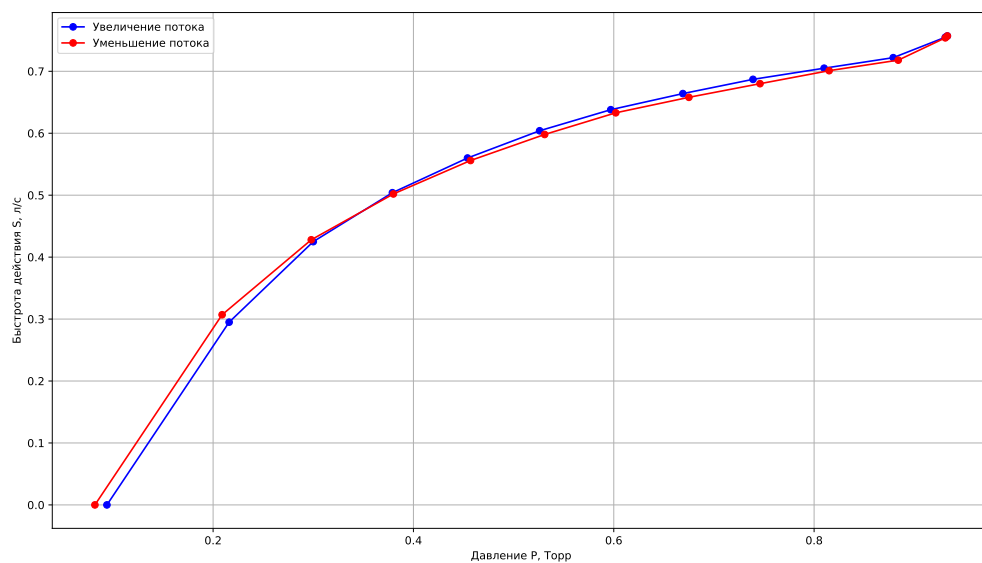


Рис. 4: График зависимости скорости действия форвакуумного насоса от давления

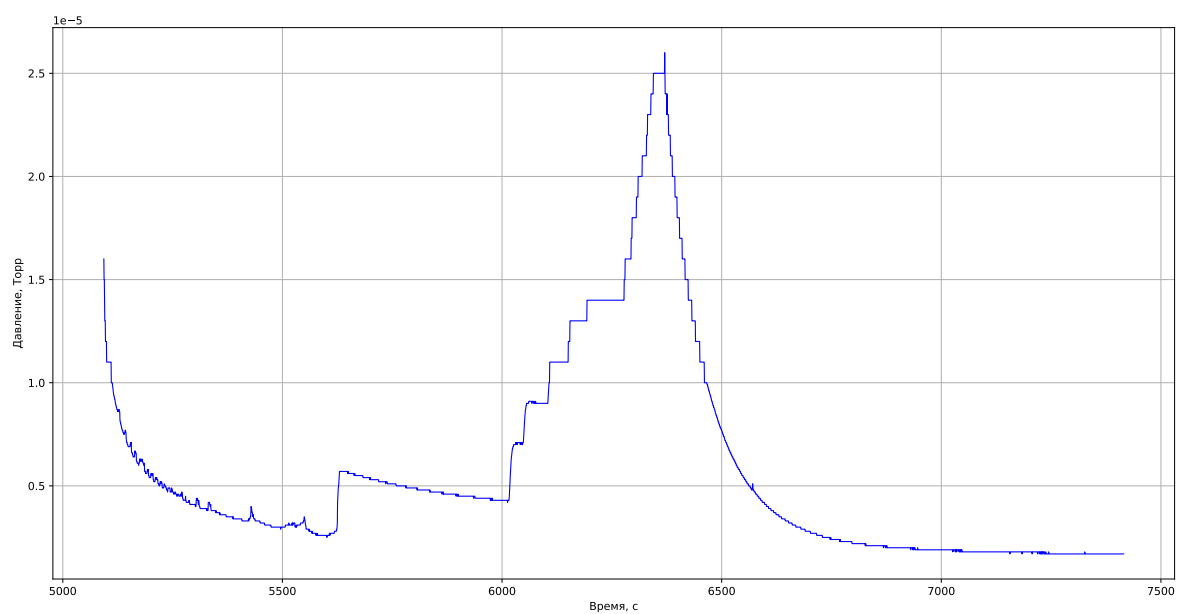


Рис. 5: График зависимости давления в высоковакуумной части от времени

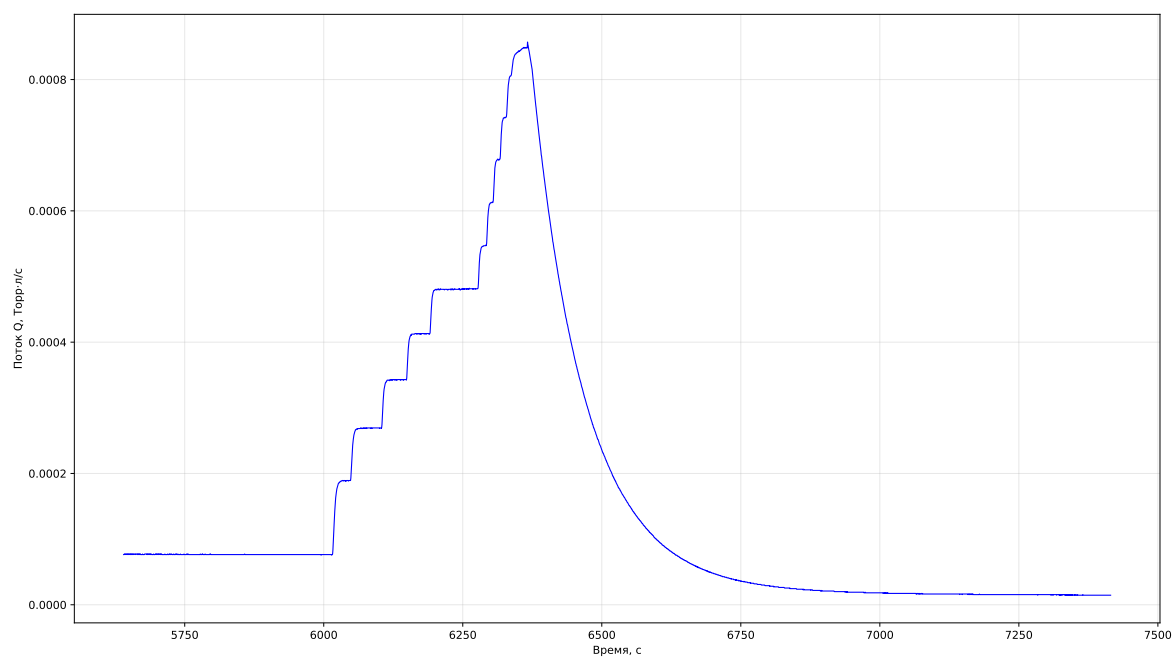


Рис. 6: График зависимости потока воздуха через диафрагму от времени

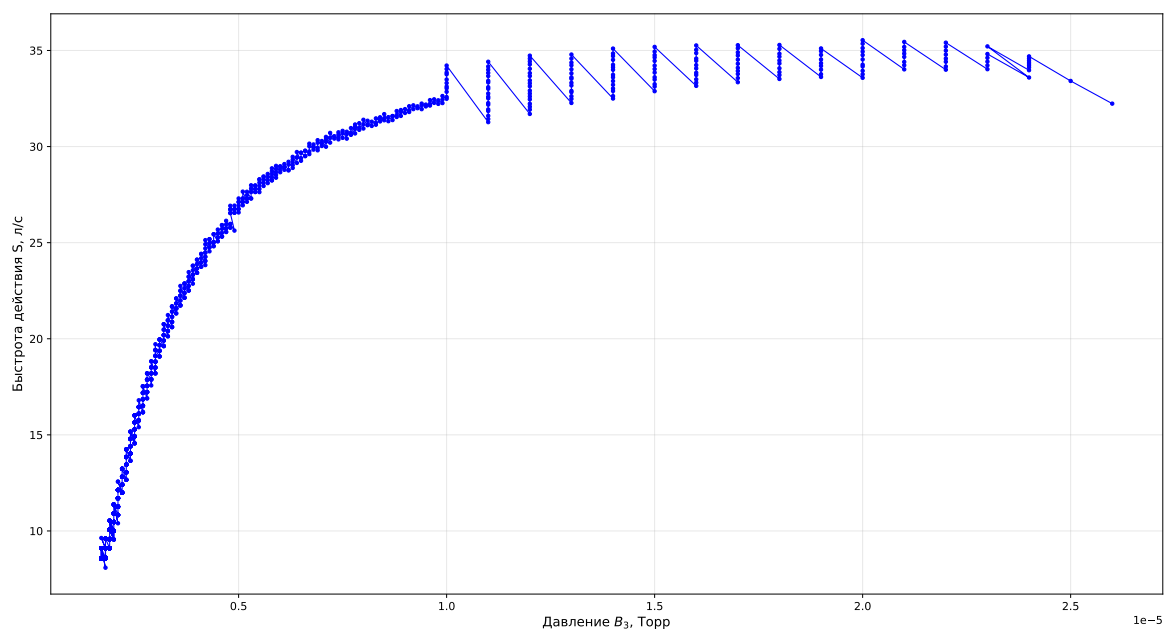


Рис. 7: График зависимости быстродействия турбомолекулярного насоса от впускного давления

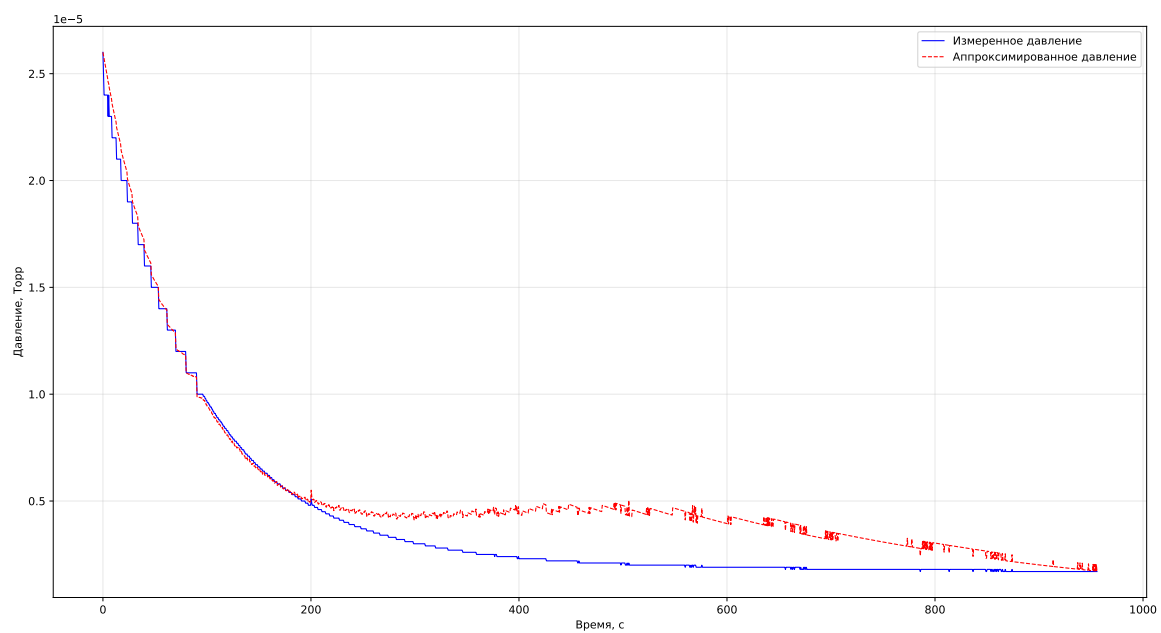


Рис. 8: Аппроксимация давления в высоковакуумной части