

# Лабораторная работа 2.3.1 А

## Получение и измерение вакуума

Милославов Глеб, Б04-105

2 марта 2022 г.

# 1 Схема установки

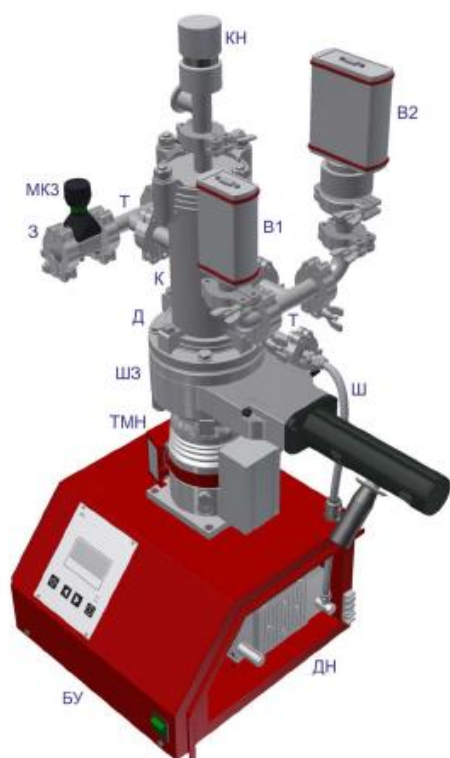


Рис. 1: Внешний вид установки. Вид спереди

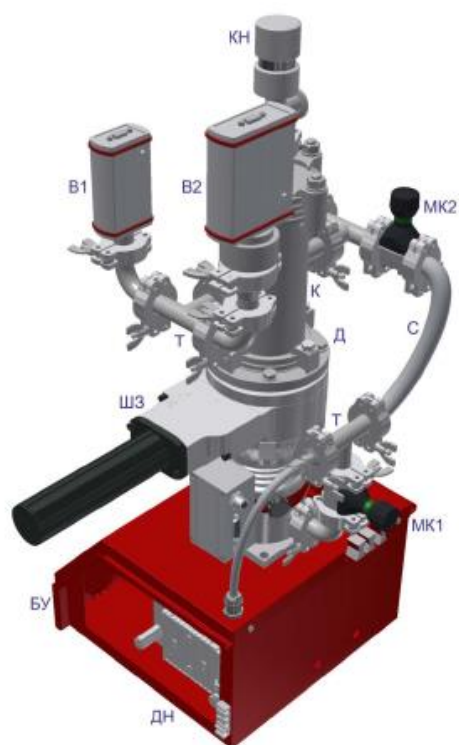


Рис. 2: Внешний вид установки. Вид сзади

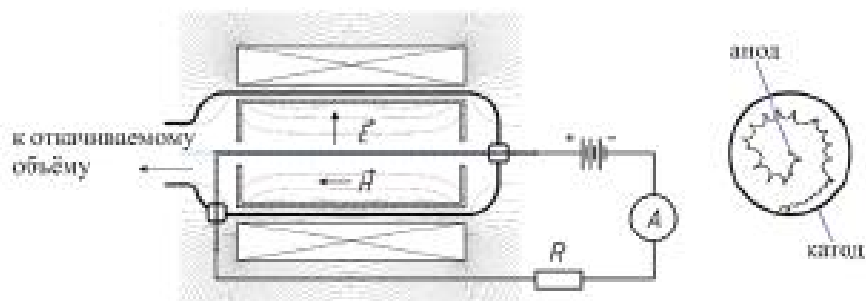


Рис. 3: Принципиальная схема инверсно-магнетронного вакуумметра и траектории электронов в нём

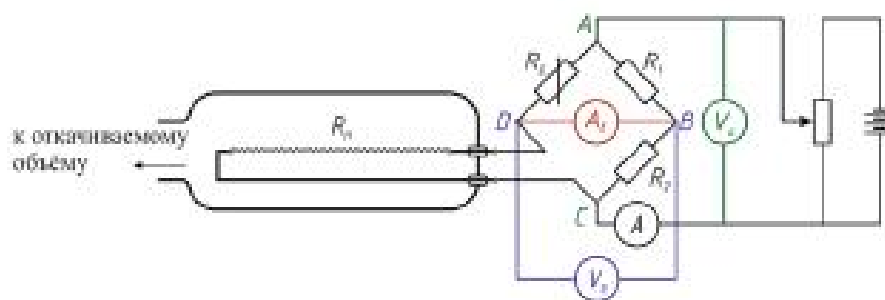


Рис. 4: Принципиальная схема терморезисторного вакуумметра (Пирани)

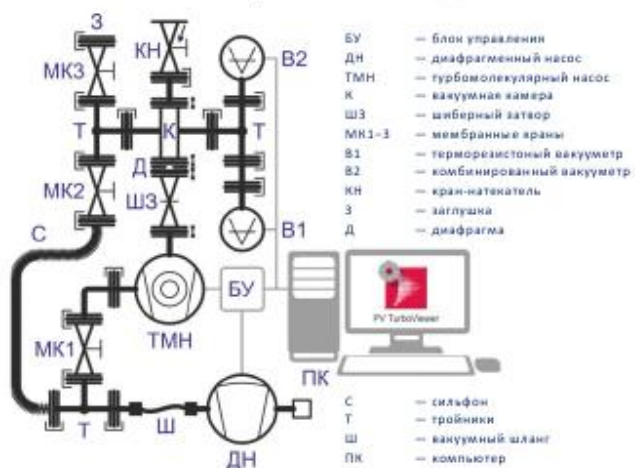


Рис. 5: Схема установки

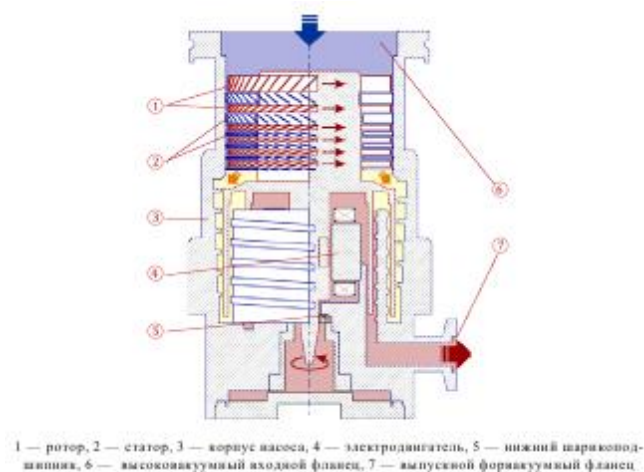


Рис. 6: Устройство турбомолекулярного насоса

На рисунках (1, 2) представлены изображения внешнего вида установки, на рисунках (3, 4) представлены принципиальные схемы вакуумметров, используемых в данной работе. На рисунках (5, 6) представлена принципиальная схема установки и устройство турбомолекулярного насоса.

## 2 Теоретический материал

Одна из основных характеристик систем, работающих при вакууме – число Кнудсена:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

$\lambda$  – длина свободного пробега молекул газа,  $d$  – характерный размер системы.

В зависимости от значений числа Кнудсена определяют:

- 1) низкий вакуум –  $Kn \ll 1$
- 2) средний вакуум –  $Kn \sim 1$
- 3) высокий вакуум –  $Kn \gg 1$

Выпишем основные формулы, отображающие теоретические зависимости между исследуемыми величинами.

Скорость откачки:

$$S = \frac{dV}{dt}; \quad (2)$$

Падение давления:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \quad (3)$$

Пропускная способность:

$$U = \frac{Q}{\Delta P}; \quad (4)$$

Основное уравнение вакуумной механики:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}; \quad (5)$$

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t} \quad (6)$$

Проводимость отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{T/m} \quad (7)$$

Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (8)$$

Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (9)$$

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Определение объёмов разных частей конструкций

Для определения объёмов частей установки (Объём вакуумной камеры –  $V_K$ , объём фор-вакуумной магистрали + объём ТМН –  $V_{\text{ф.м.}} + V_{\text{ТМН}}$  воспользуемся законом Бойля-Мариотта. Для этого необходимо определить давления в различном состоянии установки (Исследовать различные части установки).

Для лучшей точности было проведено 2 измерения, результаты которых занесены в таблицу. Значения погрешностей определяются с помощью МНК.

	1		2	
№	$p$ , мбар	$\sigma_p$ , мбар	$p$ , мбар	$\sigma_p$ , мбар
$p_1$	3,7	0,05	3,7	0,05
$p_2$	200	5	200	5
$p_3$	186	5	187	5
$p_4$	140	5	150	5

Таблица 1: Значения давлений при различных конфигурациях системы

Используя закон Бойля-Мариотта получаем соотношения:

$$V_K = \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{p_2 - p_1} V_c ; \quad \sigma_{V_K} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial p_{\text{атм}}} \sigma_{p_{\text{атм}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial p_2} \sigma_{p_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial p_1} \sigma_{p_1}\right)^2} \quad (10)$$

$$V_{\text{ф.м.}} = \frac{p_3 - p_2}{p_1 - p_3} (V_K + V_c) ; \quad - - // - - \quad (11)$$

$$V_{\text{ТМН}} = \frac{p_4 - p_3}{p_1 - p_4} (V_K + V_c + V_{\text{ф.м.}}) ; \quad - - // - - \quad (12)$$

Используя соотношения (10, 11, 12) определим объёмы составных частей установки:

$N$	$V_c$ , см <sup>3</sup>	$V_k$ , см <sup>3</sup>	$\sigma_{V_k}$ , см <sup>3</sup>	$V_{\text{ф.м.}}$ , см <sup>3</sup>	$\sigma_{V_{\text{ф.м.}}}$ , см <sup>3</sup>	$V_{\text{ТМН}}$ , см <sup>3</sup>	$\sigma_{V_{\text{ТМН}}}$ , см <sup>3</sup>	$V_{\text{полн}}$ , см <sup>3</sup>	$\sigma_{V_{\text{полн}}}$ , см <sup>3</sup>
1	265	1080	35	103	4	489	12	1672	51
2	265	1080	35	95	5	497	12	1672	52

Таблица 2: Значения объёмов отдельных частей насоса и полного объёма установки

### 3.2 Измерение скорости откачки форвакуумным насосом

Перейдем к оценке эффективной скорости откачки системы форвакуумным насосом в области, где она почти постоянна. Для этого построим зависимость  $\ln(p)$  от  $t$ . Тогда из уравнения  $p(t) = p_1 e^{-\frac{S_0}{V_0}t}$  следует, что угол наклона аппроксимирующей прямой этого графика равен  $k = -\frac{S_0}{V_0}$ .

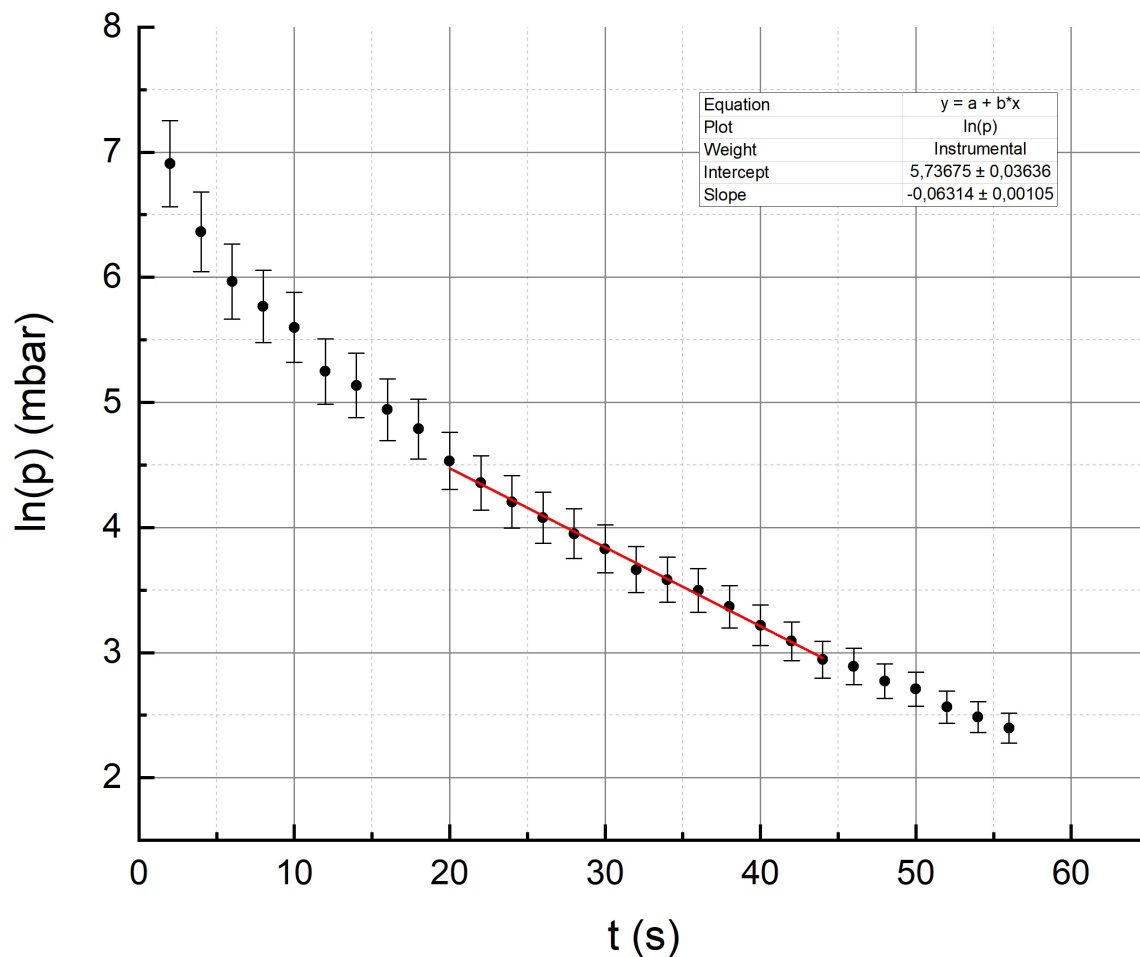


Рис. 7: График зависимости  $\ln(p)$  от  $t$  для ФВН

Линейному участку на данном графике соответствует значение

$$k = -0,063 \pm 0,001 \text{ мбар} \cdot \text{с}^{-1}$$

Эффективное время откачки:

$$\tau = 15,8 \pm 0,3 \text{ с}$$

Зная объём всей установки рассчитаем эффективную скорость откачки:

$$S_0 = 0,44 \pm 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Согласно техническим характеристикам форвакуумного насоса скорость откачки должна быть равна  $S_0 = 0,50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Погрешность полученного значения относительно заявленного в технических характеристиках составляет 12%.

### 3.3 Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума

Перейдем к определению скорости откачки турбомолекулярным насосом. Аналогично с предыдущим пунктом, построим график зависимости  $\ln(p)$  от  $t$ :

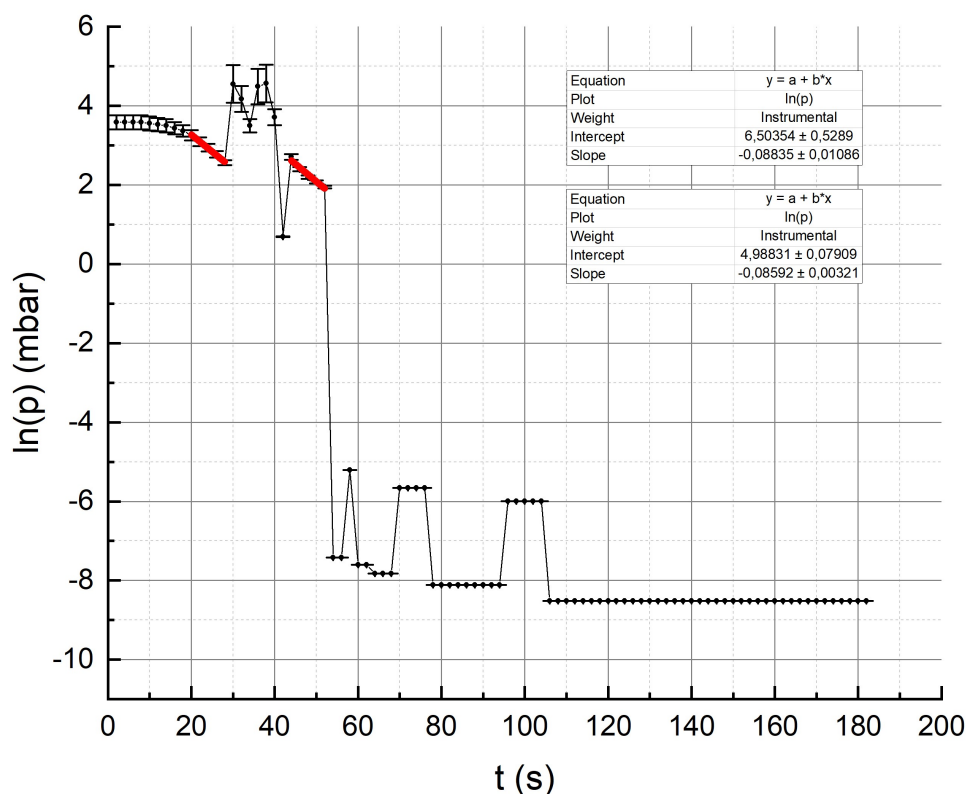


Рис. 8: График зависимости  $\ln(p)$  от  $t$  для ТМН

Участки, на которых эффективная скорость откачки почти постоянна, непродолжительны. Но оценить скорость откачки на этих участках можно.

Эффективное время откачки:

$$\tau = 11,6 \pm 1,4 \text{ мбар} \cdot \text{с}^{-1}$$

Зная объём всей установки рассчитаем эффективную скорость откачки:

$$S_0 = 0,15 \pm 0,02 \text{ л/с}$$

Согласно техническим характеристикам турбомолекулярного насоса скорость откачки должна быть равна  $S_0 = 65 - 70 \text{ л/с}$ . Очевидно, что рассчитанная по экспериментальным данным скорость откачки ТМН сильно отличается от заявленной (на 2 порядка). Это может быть связано с неисправностями в установке или с некорректным проведением опыта, однако точно сказать нельзя.

### 3.4 Определение уровня течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки шибером

Определим уровень течей в установке по формуле

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t}$$

График зависимости  $p$  от  $t$  во время перекрытия ТМН имеет вид:

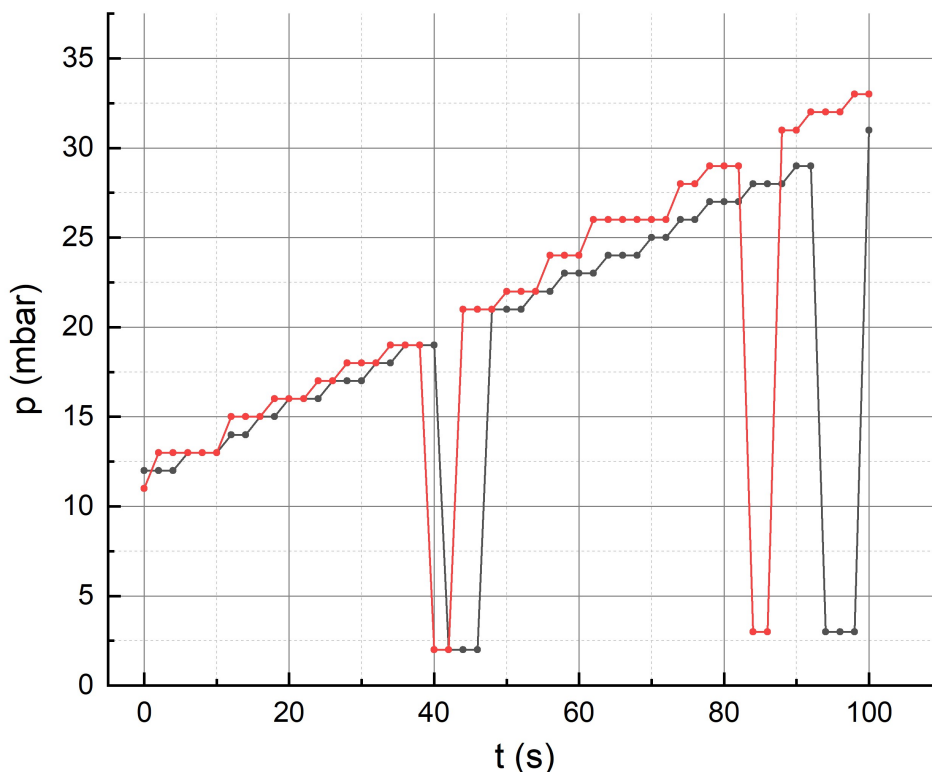


Рис. 9: График зависимости  $p$  от  $t$  при перекрытии ТМН

Определим уровень течей в установке по формуле

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t} \quad ; \quad \sigma_{Q_n} = Q_n \sqrt{\left(\frac{\sigma_{P_k + P_n}}{P_k + P_n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2}$$

Исходя из экспериментальных данных получили:

$$Q_n = 0,205 \pm 0,008 \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}}$$

Такой уровень течей считается допустимым в измеряемом диапазоне давлений (от 2мбар, так как выполняется условие:

$$Q_n = 0,205 \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}} \ll Q = PS_0 = 1,3 \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}},$$

где  $P = 2\text{мбар}$ , а  $S_0 = S_0 = 65 \text{ л/с}$  согласно табличному значению (для ТМН расчётное значение  $S_0$  некорректно)

### 3.5 Исследование зависимости мощности турбины ТМН от давления в камере К при создании искусственной течи

Общие изменения мощности турбины ТМН и давления в камере во время проведения опыта показаны на графике:

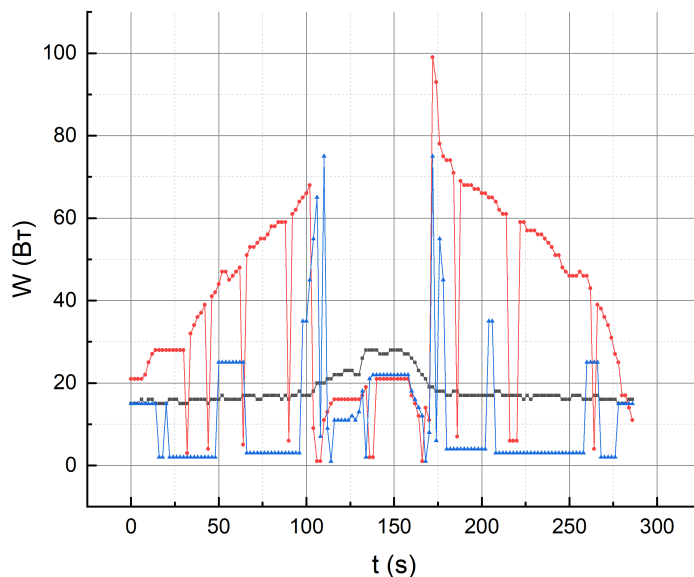


Рис. 10: Обзменение параметров системы во время проведения опыта

Графики зависимости  $W$  от  $P$  на двух почти линейных участках имеют вид:

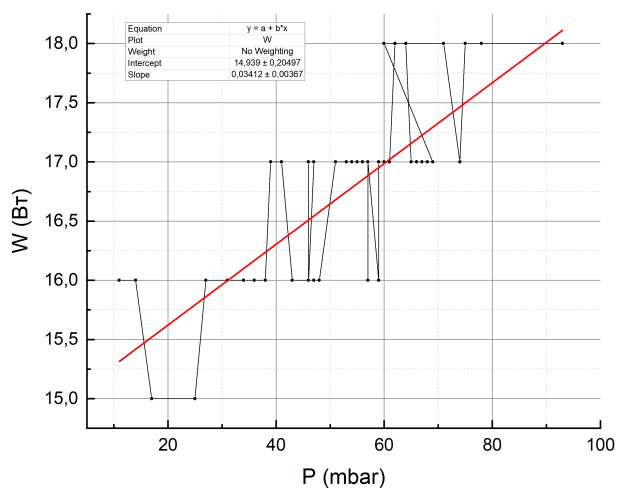


Рис. 11: График  $W(P)$  №1

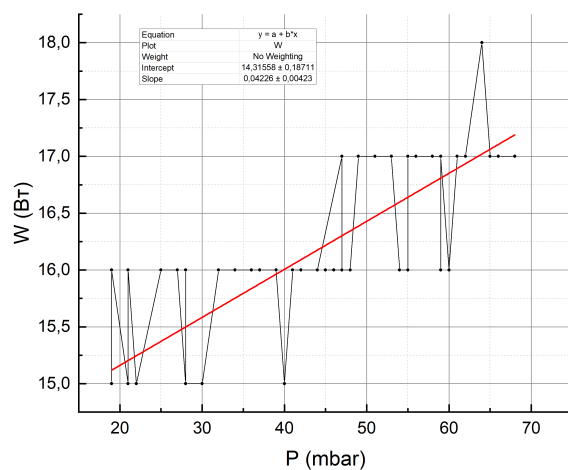


Рис. 12: График  $W(P)$  №2

Ввиду малой точности показаний мощности (значения распределены дискретно, только в целых числах), давление перехода ТМН в молекулярный режим определить затруднительно.



## 4 Вывод

1. С помощью уравнений термодинамики (закон Майора) были получены объёмы разных частей установки и общий объём :

(a)  $V_k = 1080 \pm 35 \text{ см}^3$

(b)  $V_{\text{ф.м.}} = 103 \pm 4 \text{ см}^3$

(c)  $V_{\text{тмн}} = 489 \pm 12 \text{ см}^3$

(d)  $V_{\text{полн}} = 1672 \pm 51 \text{ см}^3$

2. Была показана экспоненциальность зависимости давления от времени в период откачки для ФМН, для ТМН ввиду некорректных данных судить об этом невозможно. Исходя из этой зависимости рассчитана эффективная скорость откачки:

(a) ФМН:  $S_0 = 0,44 \pm 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$  ; Табличное значение:  $S_0 = 0,50 \text{ м}^3/\text{ч}$  ;  
Относительная погрешность: 12%

3. Был определён уровень течей в установке, он оказался допустимым для диапазона рабочих давлений (больше 2 мбар)

$$Q_{\text{н}} = 0,205 \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}} \ll Q = PS_0 = 1,3 \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}},$$

4. Была показана линейность зависимости мощности ТМН от давления при возникновении искусственных течей, давление перехода в молекулярный режим рассчитать не удалось