

Работа 2.3.1

Современные методы измерения и получения вакуума

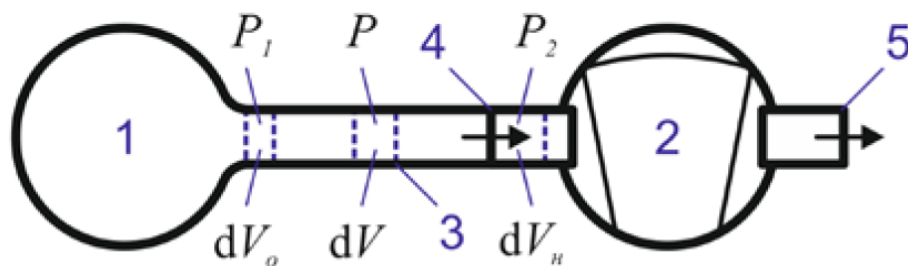
Мыздриков Иван Витальевич
группа Б06-401

14 мая 2025 г.

Краткая теоритическая справка

Основные понятия

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы (рис. 1).



1 — откачиваемый объём, 2 — вакуумный насос, 3 — вакуумпровод (трубка),
4 — впускной патрубок (вход) насоса, 5 — выпускной патрубок (выход) насоса

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

Здесь и далее L - единица измерения длины, M - единица измерения массы, T - единица измерения времени.

1. **Предельное остаточное давление** (предельный вакуум) $P_{\text{пр}}[L^{-1}MT^{-2}]$ - наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в

рассматриваемом сечении вакуумпровода (рассматриваемой точке вакуумной системы). Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

2. **Наибольшее выпускное давление** $[L^{-1}MT^{-2}]$ - максимально допустимое давление газа на входе насоса.
3. **Быстрота откачивающего действия** (скорость откачки) вакуумной системы $S[L^3T^{-1}]$ - объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dT}$$

Следовательно быстродействие насоса S_n определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dt}$$

А эффективная скорость откачки камеры S_0 :

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt}$$

4. Падение давления вдоль вакуумпровода $\Delta P = P_1 - P_2$ определяется его **пропускной способностью** (проводимостью) $U[L^3T^{-1}]$:

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2}$$

где $Q[L^2MT^{-3}]$ - **поток газа** через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

5. Величина $Z[L^{-3}T]$, обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U}$$

В общем случае указанные величины S , U , Q , Z как и сами давления P_1 и P_2 зависят от времени. Но в конце процесса откачки устанавливается квазистационарный режим, при котором поток газа становится практически постоянным и равным количеству поступающего в систему газа в единицу времени вследствие наличия течей, т.е. нарушения герметичности (в основном в местах механического соединения отдельных узлов вакуумной системы). Для стационарного режима можно записать условие непрерывности потока откачиваемого газа:

$$P_1 S_0 = P S = P_2 S_n = Q$$

6. Основное уравнение вакуумной техники

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{H}}} + \frac{1}{U}$$

Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = P \frac{\pi R^4}{8\nu L} \sim \frac{R^4}{L} \frac{P}{\sqrt{Tm}}$$
$$U_{\text{тр}} = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

В случае последовательного соединения:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{\Sigma Z_i}$$
$$S_0 = \frac{S_{\text{H}} U_{\Sigma}}{S_{\text{H}} + U_{\Sigma}} = \frac{S_{\text{H}}}{\frac{S_{\text{H}}}{U_{\Sigma}} + 1} \approx S_{\text{H}}$$

Время откачки

Положим, что за промежуток dt давление в откачиваемом объеме V_0 снижается на dP_1 . Тогда за промежуток времени dt количество газа, поступающего в трубу равно $S_0 P_1 dt$, а эта же убыль газа в объеме равна $V_0 dP_1$, следовательно

$$S_0 P_1 dt = -V_0 dP_1$$
$$dt = -\frac{V_0}{S_0} \frac{dP_1}{P_1}$$
$$dt = -V_0 \left(\frac{1}{S_{\text{H}}} + \frac{1}{U} \right) \frac{dP_1}{P_1}$$

Итого получаем, что

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

Экспериментальная установка

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco с диафрагменным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Pfeiffer Vacuum

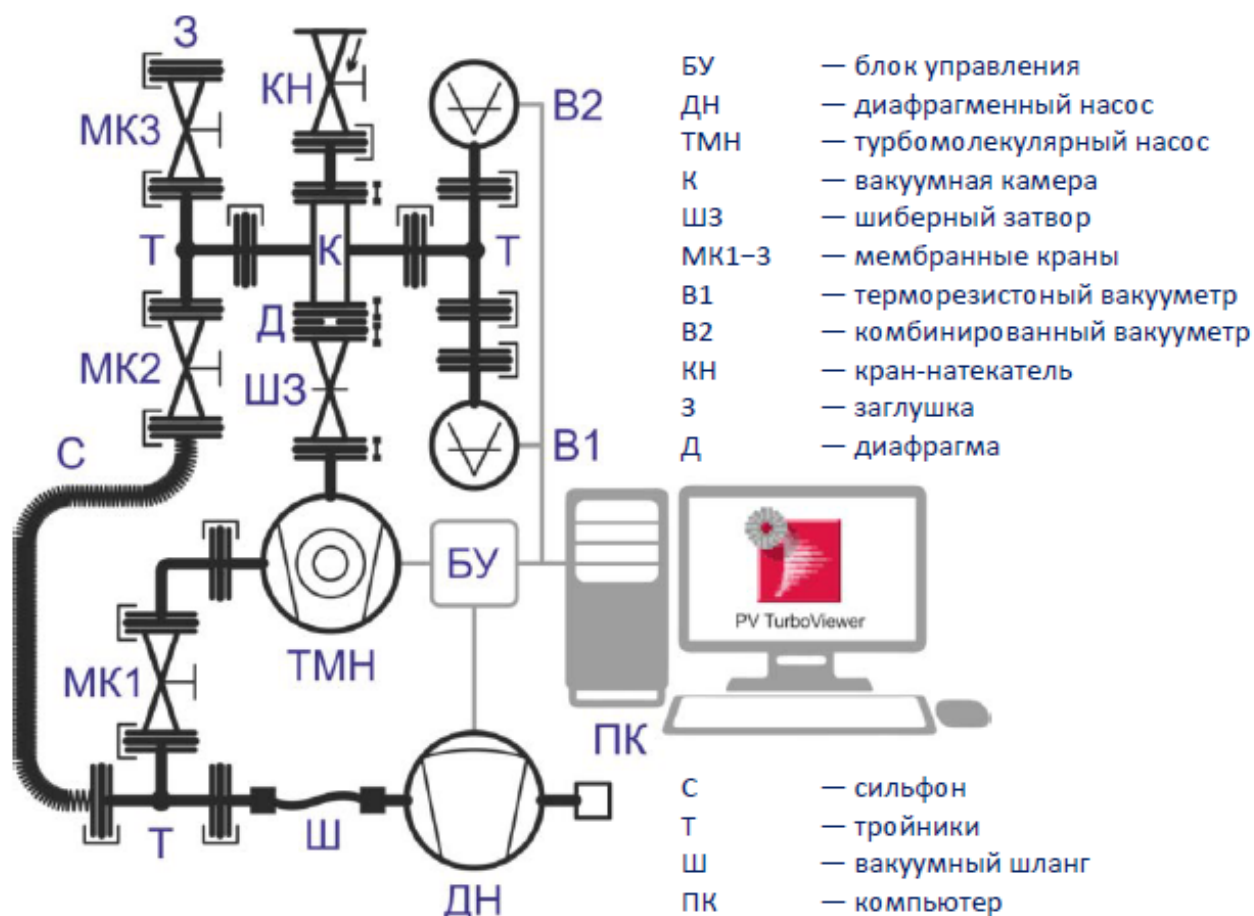
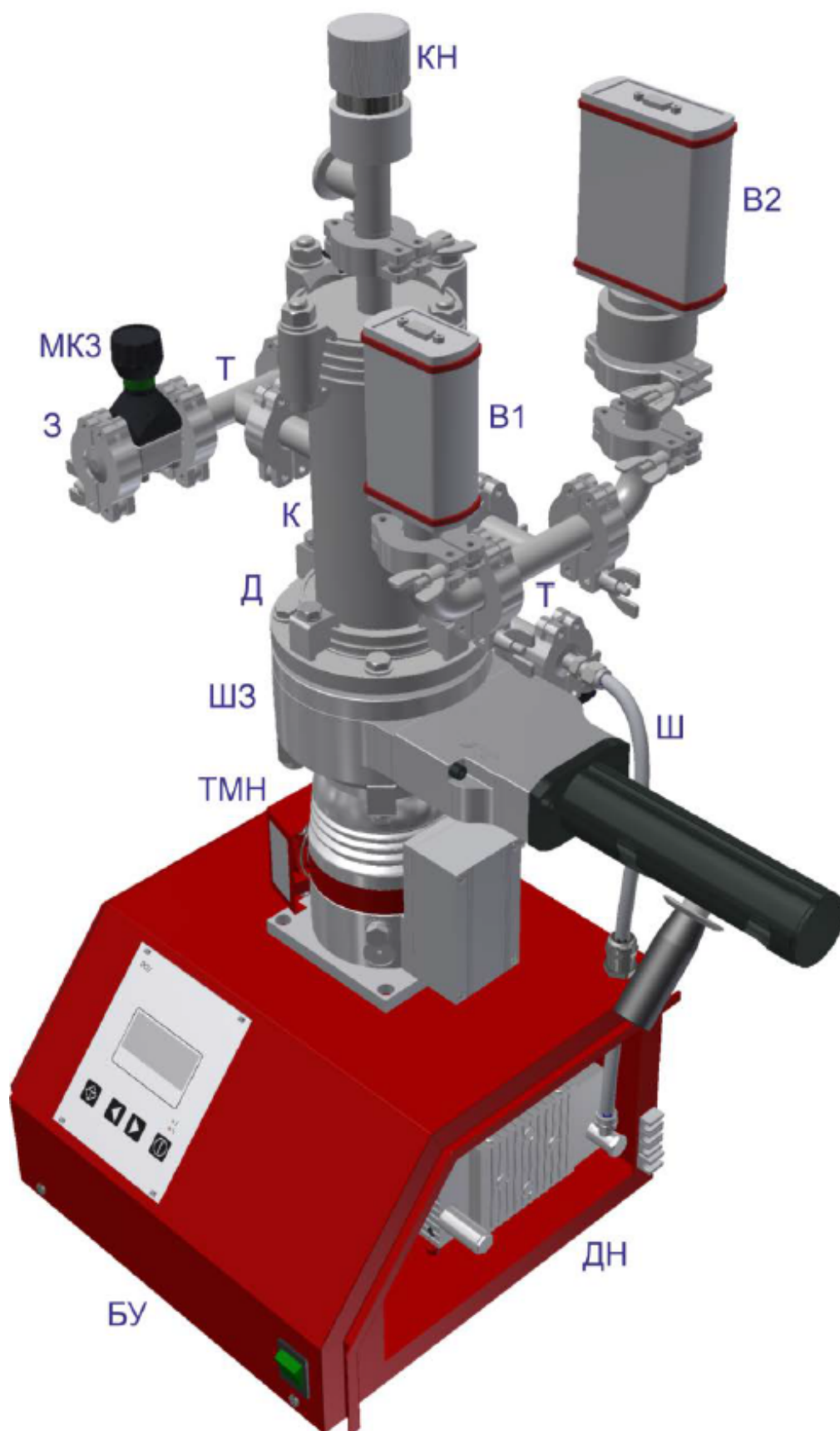


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

серии DigiLine, и вакуумных быстроразъёмных компонентов. Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer8. Вакуумный пост Pfeiffer Vacuum HiCube 80 Eco (PM S03 555 A) выполнен на базе диафрагменного форвакуумного насоса MVP 015 (ДН) и турбомолекулярного насоса HiPace 80 (ТМН). Откачка вакуумной камеры (К) может происходить как двумя насосами (ТМН и ДН) через шиберный затвор (ШЗ) и мембранный кран 1 (МК1), так и только форвакуумным насосом (ДН) по схеме «байпас» (англ. bypass — обходной путь), выполненной на основе вакуумных компонентов: сильфона (С), мембранного крана 2 (МК2), тройников (Т), переходников, шланга (Ш). Для контроля и измерения давления в вакуумной камере используются цифровой вакуумметр PPT 100 (В1) типа Пирани (терморезисторный) и комбинированный вакуумметр MPT 100 (В2) типов Пирани (терморезисторный) и холодный катод (инвертированный магнетрон). Контролируемый напуск воздушной атмосферы в камеру осуществляется через кран-натекатель EVN 116 (КН) с регулируемым потоком.

Дополнительный выход с краном 3 (МКЗ) закрыт заглушкой (З) и служит для присоединения дополнительного объема в случае необходимости.



Ход работы

Подготовка оборудования

1. В первую очередь нужно выровнять давление во всех частях установки.
2. Затем впускаем атмосферный воздух в установку через кран-натекатель с верхней и нижней ручкой регулировки.
3. Далее нужно отгородить систему от внешней атмосферы, чтобы создать вакуум.
4. Готовим компьютер и блок управления установкой к работе и записи данных.

Определение откачиваемого объёма и измерение скорости откачки форвакуумным насосом

1. Выключаем турбомолекулярный насос.
2. Откачиваем установку форвакуумным насосом.
3. Присоединяем к установке сильфон с воздухом при атмосферном давлении. ($V_{\text{сильфона}} = V_0 = 265\text{ml}$).
4. Выравниваем давление в сильфоне и вакуумной камере экспериментального стенда.
5. Выравниваем давление в вакуумной камере К и форвакуумной магистрали установки.
6. Напустим воздух в установку до атмосферного давления.
7. Готовим установку к повтору предыдущих пунктов. Повторяем их еще 1-2 раза.
8. По данным, полученным с установки считаем все объёмы. $P_{\text{для камеры}} = 220\text{mbar}$, $P_{\text{для всей установки}} = 170\text{mbar} \Rightarrow V_{\text{камеры}} = \frac{P_{\text{атм}} V_0}{P_1} - V_0 \approx (0,84 \pm 0,05) \text{ л}$, $V_{\text{всей установки}} = \frac{P_{\text{атм}} V_0}{P_2} \approx (1,26 \pm 0,05) \text{ л}$, $\Rightarrow V_{\text{форвакуумной магистрали}} = (0,5 \pm 0,05) \text{ л}$

1			2		
t, c	$P, mbar$	$\sigma_P, mbar$	t, c	$P, mbar$	$\sigma_P, mbar$
2	700,0	0,1	2	1000,0	0,1
4	560,0	0,1	4	480,0	0,1
6	400,0	0,1	6	340,0	0,1
8	320,0	0,1	8	220,0	0,1
10	300,0	0,1	10	160,0	0,1
12	300,0	0,1	12	120,0	0,1
14	300,0	0,1	14	90,0	0,1
16	300,0	0,1	16	68,0	0,1
18	300,0	0,1	18	58,0	0,1
20	230,0	0,1	20	44,0	0,1
22	180,0	0,1	22	37,0	0,1
24	150,0	0,1	24	31,0	0,1
26	120,0	0,1	26	26,0	0,1
28	98,0	0,1	28	20,0	0,1
30	83,0	0,1	30	18,0	0,1
32	69,0	0,1	32	15,0	0,1
34	62,0	0,1	34	13,0	0,1
36	55,0	0,1	36	11,0	0,1
38	46,0	0,1	38	9,5	0,1
40	38,0	0,1	40	8,5	0,1
42	35,0	0,1	42	7,5	0,1
44	32,0	0,1	44	6,8	0,1
46	29,0	0,1	46	6,4	0,1
48	25,0	0,1	48	6,1	0,1
50	21,0	0,1	50	5,7	0,1
52	18,0	0,1	52	5,4	0,1
54	17,0	0,1	54	5,1	0,1
56	16,0	0,1	56	4,9	0,1
58	14,0	0,1	58	4,6	0,1
60	13,0	0,1	60	4,4	0,1
62	11,0	0,1	62	4,1	0,1
64	10,0	0,1	64	3,9	0,1
66	9,3	0,1	66	3,9	0,1
68	8,7	0,1	68	3,8	0,1
70	8,1	0,1	70	3,7	0,1
72	7,7	0,1	72	3,6	0,1
74	7,1	0,1	74	3,6	0,1

1			2		
t, c	$P, mbar$	$\sigma_P, mbar$	t, c	$P, mbar$	$\sigma_P, mbar$
76	6,8	0,1	76	3,5	0,1
78	6,5	0,1	78	3,5	0,1
80	6,3	0,1	80	3,4	0,1
82	6,1	0,1	82	3,4	0,1
84	5,9	0,1	84	3,3	0,1
86	5,7	0,1	86	3,3	0,1
88	5,5	0,1	88	3,3	0,1
90	5,4	0,1	90	3,2	0,1
92	5,2	0,1	92	3,2	0,1
94	5,0	0,1	94	3,2	0,1
96	4,9	0,1	96	3,1	0,1
98	4,8	0,1	98	3,1	0,1
100	4,6	0,1	100	3,1	0,1
102	4,5	0,1	102	3,1	0,1
104	4,4	0,1	104	3,1	0,1
106	4,2	0,1	106	3,0	0,1
108	4,1	0,1	108	3,0	0,1
110	4,1	0,1	110	3,0	0,1
112	3,9	0,1	112	3,0	0,1
114	3,9	0,1	114	3,0	0,1
116	3,9	0,1	116	2,9	0,1
118	3,8	0,1			
120	3,8	0,1			
122	3,8	0,1			
124	3,7	0,1			
126	3,7	0,1			
128	3,7	0,1			
130	3,7	0,1			
132	3,6	0,1			
134	3,6	0,1			
136	3,6	0,1			
138	3,6	0,1			
140	3,6	0,1			
142	3,5	0,1			
144	3,5	0,1			
146	3,5	0,1			
148	3,5	0,1			
150	3,5	0,1			
152	3,5	0,1			

9. считаем эффективную скорость форвакуумной откачки, для этого мы в на графике $\ln(P/P_1)$ от t ищем наклон графика на интервале 10 – 100 мбар. Потом считаем $\tau = -\frac{t}{\ln(P/P_1)} = (15.63 \pm 0,02)$ с. А далее, зная объем камеры рассчитываем эффективную скорость откачки $S_0 = V_{\text{всей установки}}/\tau \approx (80.6 \pm 3.1)m^3/c$
10. Зная S_0 и S_H мы находим U по формуле

$$U = \frac{S_H - S_0}{S_H \cdot S_0} \approx 190ml/c$$

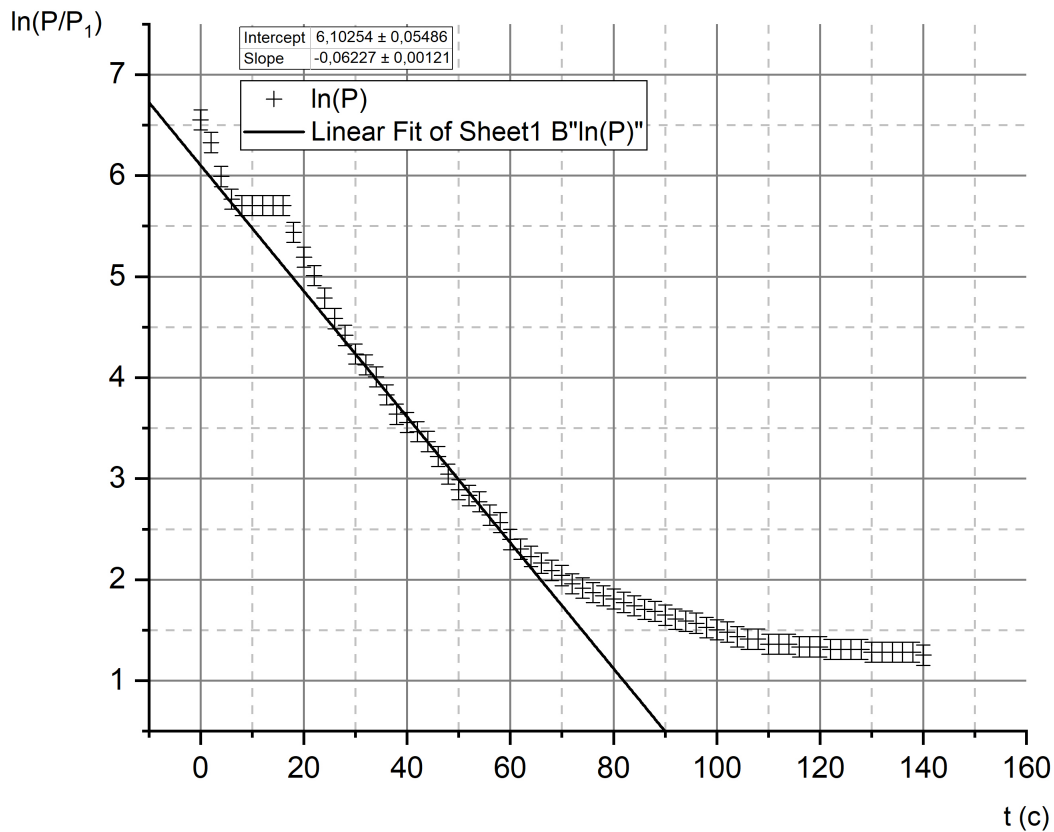


Рис. 3: График зависимости $\ln(P/P_1)$ от t для форвакуумного насоса

Измерение скорости откачки турбомолекулярным насосом и определение предельного вакуума

1. Откачиваем установку форвакуумным насосом.

2. Откачиваем объем турбомолекулярным насосом.

3. считаем скорость откачки воздуха $\tau \approx 18.26c$, $S_0 \approx 49ml/c$, тогда при $S = 6000$ будет $U \approx 49.6ml/c$.

t, c	$P, mbar$	t, c	$P, mbar$
2	2,800000	54	0,000120
4	1,800000	56	0,000110
6	0,630000	58	0,000100
8	0,015000	60	0,000095
10	0,003800	62	0,000091
12	0,002400	64	0,000088
14	0,001500	66	0,000083
16	0,001100	68	0,000080
18	0,001000	70	0,000076
20	0,001000	72	0,000073
22	0,001000	74	0,000069
24	0,000870	76	0,000067
26	0,000660	78	0,000065
28	0,000580	80	0,000064
30	0,000500	82	0,000062
32	0,000390	84	0,000061
34	0,000350	86	0,000059
36	0,000310	88	0,000058
38	0,000280	90	0,000057
40	0,000240	92	0,000055
42	0,000190	94	0,000054
44	0,000180	96	0,000053
46	0,000170	98	0,000052
48	0,000150	100	0,000051
50	0,000140	102	0,000050
52	0,000130		

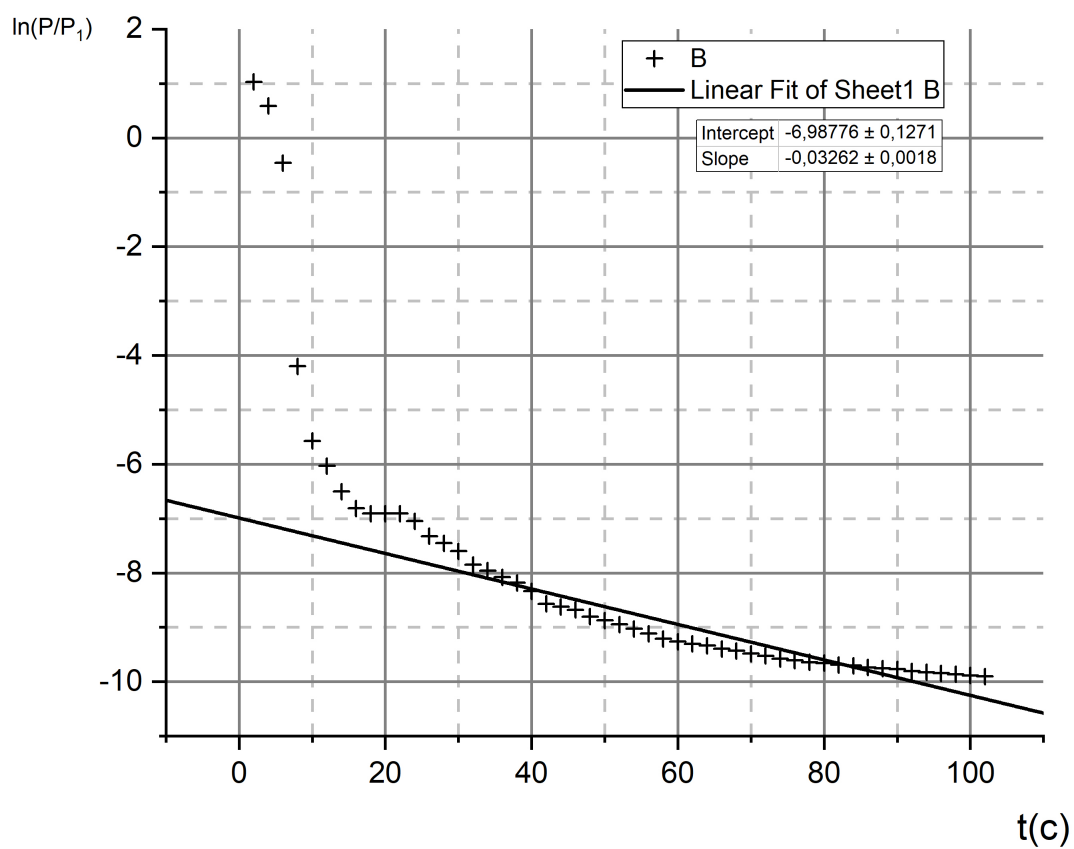


Рис. 4: График зависимости $\ln(P/P_1)$ от t для турбомолекулярного насоса