

# Получение и измерение вакуума (2.3.1)

Манро Эйден

## Введение

**Цель работы:** 1) измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума.

**Оборудование:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным. В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления  $10^{-2}$  торр и диффузионным масляным насосом до давления  $10^{-4}$  торр.

## Теоретические сведения

### Процесс откачки

Опишем процесс откачки математически: Пусть  $W$  — объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени,  $Q_i$  для различных значений  $i$  обозначим различные притоки газа в сосуд (в единицах  $PV$ ), такие как течи извне  $Q_{\text{и}}$ , десорбция с поверхностей внутри сосуда  $Q_{\text{д}}$ , обратный ток через насос  $Q_{\text{н}}$ . Тогда, приравнявая убыль газа из сосуда (с точностью до  $RT/\mu$ ) в единицу времени  $-VdP$  и сумму перечисленных токов имеем:

$$-VdP = (PW - \sum_i Q_i)dt$$

При достижении предельного вакуума устанавливается давление  $P_{\text{пр}}$ , и  $dP = 0$ . Тогда

$$W = \frac{\sum_i Q_i}{P_{\text{пр}}}$$

Поскольку обычно  $Q_{\text{и}}$  постоянно, а  $Q_{\text{н}}$  и  $Q_{\text{д}}$  слабо зависят от времени, также считая постоянной  $W$ , можем проинтегрировать (1) и получить:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right)$$

Полная скорость откачки  $W$ , собственная скорость откачки насоса  $W_{\text{н}}$  и проводимости элементов системы  $C_1, C_2, \dots$  соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

## Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном и форвакуумном давлениях длина свободного пробега меньше диаметра трубок, и течение газа определяется его вязкостью, т.е. взаимодействием молекул. При высоком вакууме течение существенно определяется взаимодействием со стенками

Для количества газа, протекающего через трубу длины  $l$  и радиуса  $r$  в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{l}$$

Если труба соединяет насос установку, то давлением  $P_1$  у насоса можно пренебречь. Давление в сосудах  $P = P_2$ . Тогда имеем:

$$C_{\text{тр}} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$$

## Экспериментальная установка

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термopарных манометров ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов ( $1, 2, \dots, 6$ ) (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

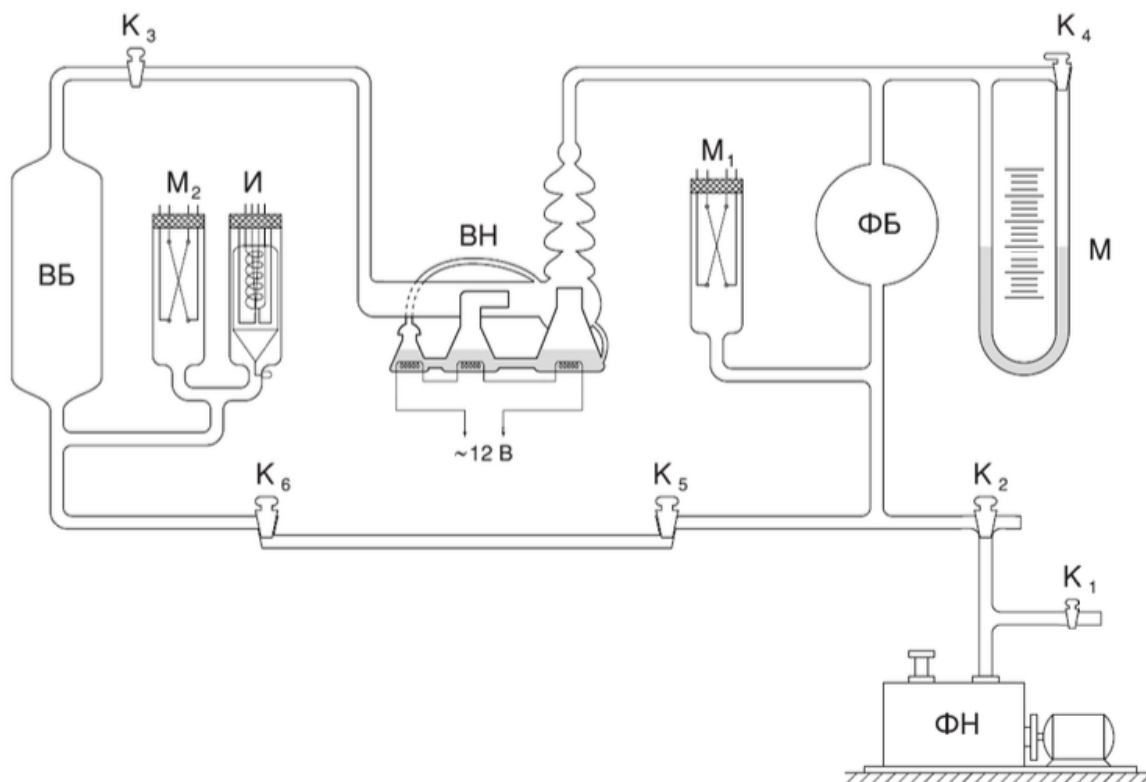


Рис. 1: Схема установки

Кран  $1$  используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Во время работы установки он должен быть закрыт. Трёхходовой кран  $2$  служит для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран  $3$  отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран  $4$  соединяет между собой колена масляного манометра. Он должен быть открыт во все время работы установки и закрывается лишь при измерении давления в форвакуумной части. Краны  $5$  и  $6$  стоят по концам капилляра и соединяют его с форвакуумной и высоковакуумной частями установки.

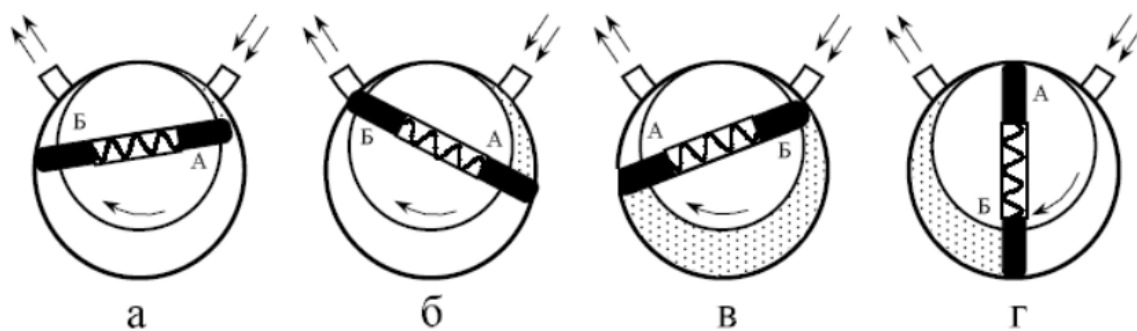


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

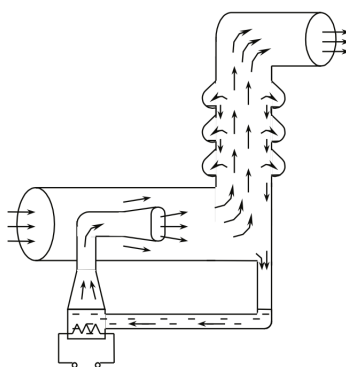


Рис. 3: Схема работы одной ступени диффузионного насоса

Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на Рис. 3 (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе и вырываются из сопла. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу. Здесь масло осаждается на стенках трубы и масло-сборников и стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом.

## Погрешности

- $\sigma_{\text{лин}} = 0,05 \text{ см}$ ,  $\sigma_{\Delta h} = 0,01 \text{ см}$ ,  $\sigma_{\rho} = 0,001 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  $\sigma_{V_{\text{зап}}} = 1 \text{ см}^3$ ,  $\sigma_g = 0,01 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
- $\sigma_V = \sqrt{(\frac{\sigma_{\rho}}{\rho})^2 + (\frac{\sigma_{\Delta h}}{\Delta h})^2 + (\frac{\sigma_g}{g})^2 + (\frac{\sigma_{V_{\text{зап}}}}{V_{\text{зап}}})^2}$

## Ход работы

### Входные данные

- $P_{\text{атм}} = (100140 \pm 400) \text{ Па}$ ,  $t_{\text{к}} = (22,9 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{\text{м}} = (0,885 \pm 0,001) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  $V_{\text{зап}} = (50 \pm 1) \text{ см}^3$
- $L = 10,8 \text{ см}$ ,  $d = 0,8 \text{ мм}$

Открываем все краны и запускаем в систему воздух из атмосферы ( $P_{\text{атм}}$ ). Закрываем краны 5 и 6, тем самым заперев в кранах и в капилляре воздух объемом ( $V_{\text{зап}}$ ). Откачиваем воздух из системы при помощи форвакуумного насоса. После откачки до давления  $\sim 10^{-2}$  запираем кран 2 и изолируем систему от атмосферы. Закрывая кран у масляного манометра приводим его в рабочее состояние. Отсакаем высоковакуумную часть закрытием крана 3 и впускаем запертый в кране 5 воздух в форвакуумную часть установки. при этом, давление в форвакуумной части возрастает, о чем свидетельствует масляный манометр. Измеряем давление при помощи последнего и следующим шагом открываем кран 3, соединяя высоковакуумную часть с остальной. При этом давление падает. По этим данным считаем объем высоковакуумной части пользуясь законом Бойля-Мариотта. Заметим, что здесь мы пренебрегли начальным давлением (порядка  $\sim 10^{-2}$ ) т.к. оно в  $\sim 1000$  раз меньше других давлений.

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_1 V_{\text{фв}} = P_2 (V_{\text{фв}} + V_{\text{вв}})$$

Измеренные давления:

$$\Delta h_1 = (26,3 \pm 0,1) \text{ см}$$

$$\Delta h_2 = (17,1 \pm 0,1) \text{ см}$$

Подставляя получаем:

$$V_{\text{фв}} = (2192 \pm 45) \text{ см}^3, \varepsilon_{\text{фв}} = 2 \%$$

$$V_{\text{вв}} = (1180 \pm 35) \text{ см}^3, \varepsilon_{\text{вв}} = 3 \%$$

### Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

Открываем все краны и проводим первоначальную выкачку воздуха форвакуумным насосом. После приближения к предельному давлению ( $\sim 10^{-2}$ ), закрываем кран 6 и включаем диффузионный насос. Ждем пока масло закипит и начнется дальнейшая выкачка уже диффузионным насосом. По достижению давления порядка  $\sim 10^{-3}$  включаем ионизационный манометр, которым и будем измерять давление в дальнейшем.

Чтобы измерить скорость откачки  $W$  замерим как изменяется давление в высоковакуумной части от времени. Согласно теории давление должно падать по правилу, где у нас  $P_{\text{пр}} = 5,5 \cdot 10^{-5}$  торр

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp \left( -\frac{W}{V_{\text{вв}}} t \right)$$

Логарифмируя, получаем:

$$\ln(P - P_{\text{пр}}) = -\frac{W}{V_{\text{вв}}} t + c$$

Аппроксимируя наши данные согласно формуле (??) получим значение для  $W$ . Измерение проведем 2 раза. Результаты изображены на графиках ?? (данные предоставлены в таблице ??). Учитывая что погрешности логарифмов растут со временем, и зависимость теряет характерный линейный вид, линейная аппроксимация была сделана только для оранжевых точек. Пользуясь объемом высоковакуумной части из формулы (7) и данными аппроксимации получаем следующие значения для скорости откачки:

$$W_1 = (248 \pm 11) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}, \quad W_2 = (262 \pm 8) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

Как видим, значения лежат в пределах погрешности, чего и следовало ожидать.

Теперь определим величину потока  $Q_{\text{н}}$ . Для общего потока имеем формулу

$$P_{\text{пр}} W = (Q' + Q_{\text{н}}) RT$$

где  $Q' = Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}}$ . Теперь, если по достижению предельного давления закрыть кран 3, то насос будет отсоилен от высоковакуумной части, и уравнение описывающее давление от времени примет вид

$$V_{\text{вв}} dP = Q RT dt$$

интегрируя которую получим

$$P = \frac{Q RT}{V_{\text{вв}}} t + c$$

Измерив зависимость давления от времени и аппроксимируя данные прямой можно получить  $Q$ . Графики приведены на рисунке ??. Отсюда получаем

$$Q_1 RT = (65 \pm 6) \cdot 10^{-4} \text{ торр} \cdot \text{см}^3 \text{с}^{-1}, \quad Q_2 RT = (60 \pm 5) \cdot 10^{-4} \text{ торр} \cdot \text{см}^3 \text{с}^{-1}$$

Опять же, значения совпадают в пределах погрешности, как и ожидалось. Теперь, используя значения  $W_1, W_2, Q_1, Q_2$  по формуле (??) считаем значение  $Q$

$$Q_{\text{н}} = (0,72 \pm 0,08) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Для  $W$  получаем:

$$W = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu} \frac{P_{\text{фв}} - P_{\text{уст}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}}} = (290 \pm 10) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

$$P_{\text{пр}} = (5,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ торр}$$

$$P_{\text{уст}} = (1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

$$P_{\text{фв}} = (3,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ торр}$$

## Обсуждение результатов

Итак, в ходе данной лабораторной работы нам удалось получить высокий вакуум ( $P = 5,5 \cdot 10^{-5}$  торр) с помощью диффузионного и форвакуумного насосов. Рассчитали скорость откачки насоса двумя независимыми способами: по улучшению вакуума и по скорости течения газа через трубу в условиях высокого вакуума. Результаты отличаются менее чем на 5%, поэтому можно утверждать, что они совпадают в пределах погрешности.

Вакуум необходим для получения тонких магнитных пленок. Важнейшей областью применения магнитных пленок является их использование для записи и хранения информации в запоминающих устройствах. Для увеличения плотности записи в магнитных пленках намагниченность ориентируют перпендикулярно плоскости пленок. Перпендикулярная ориентация намагниченности в тонких пленках энергетически невыгодна. Сильная перпендикулярная анизотропия в магнитных пленках возможна только при определенных условиях: толщина магнитного материала должна быть не выше критической и магнитный материал должен быть ограничен слоями некоторых тяжелых металлов (Pd, Pt, Ru). Именно граничные слои наводят перпендикулярную анизотропию во всей магнитной пленке. Напыление магнитного материала и тяжелых металлов, например, кобальта (Co) и (Pd) на кремниевую подложку ( $SiO_2$ ) возможно только в сверхвысоком вакууме.

## Выводы

В ходе работы было измерено скорость откачки диффузионного насоса двумя способами

$$W_1 = (248 \pm 11) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}, W_2 = (262 \pm 8) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}, W = (290 \pm 10) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

Значения совпадают в пределах погрешности. Погрешность значения измеренной методом создания искусственной течи большая в связи с наличием разности двух близких величин в формуле подсчета( $P - P$ ).

Во время работы так же было проверено справедливость отношения

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

при откачке воздуха и отношения

$$P = \frac{QRT}{V} t + c$$

описывающее рост давления при отключении насоса от системы.

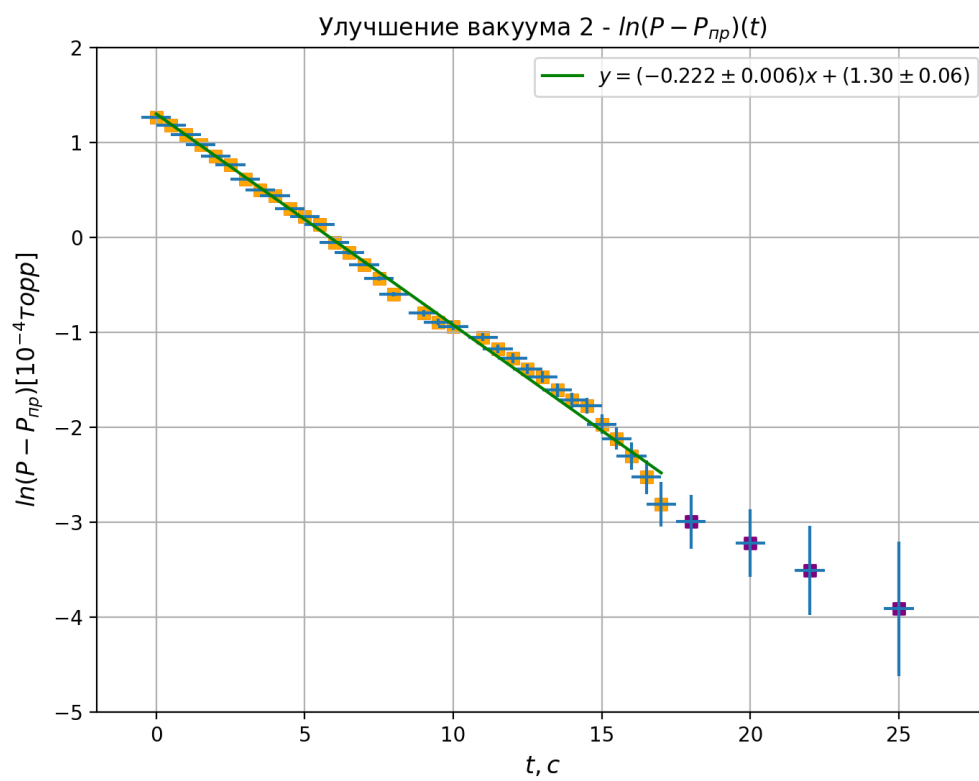
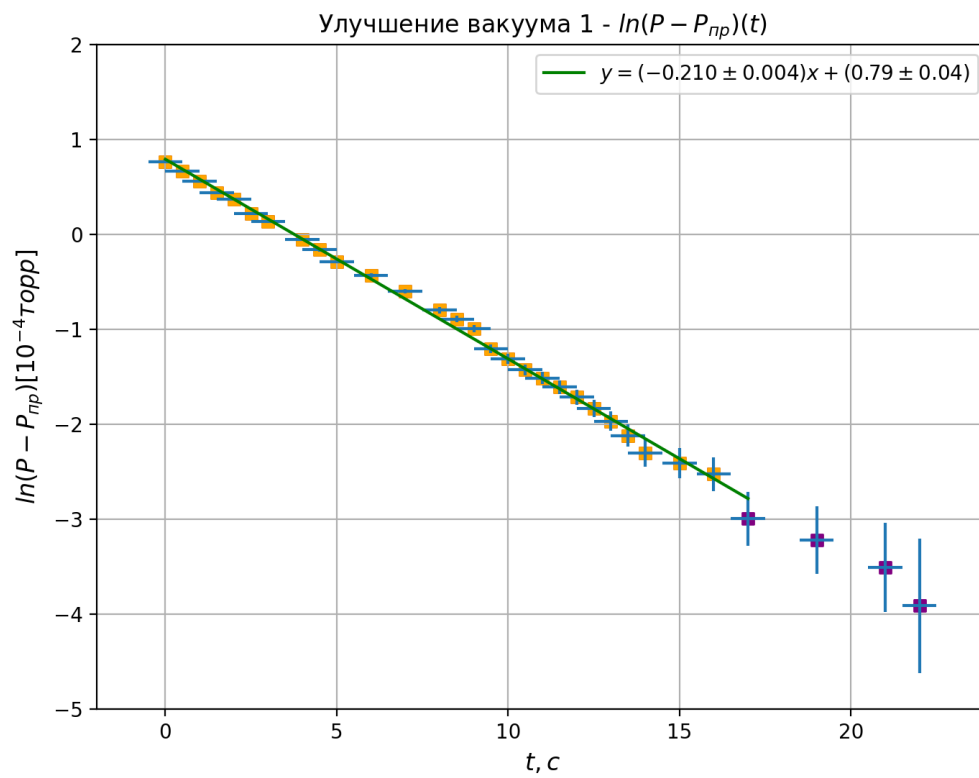


Рис. 4: Линеаризованные графики улучшения вакуума.

Улучшение 1		Улучшение 2		Ухудшение 1		Ухудшение 2	
$t$ ,	$P, 10^{-4}$	$t$ ,	$P, 10^{-4}$	$t$ ,	$P, 10^{-4}$	$t$ ,	$P, 10^{-4}$
0.00	5.60	0.00	6.00	0	1.00	0	1.00
0.50	5.30	0.50	5.90	2	1.10	1	1.10
1.00	5.00	1.00	5.70	3	1.20	3	1.20
1.50	4.60	1.50	5.60	5	1.30	5	1.30
2.00	4.30	2.00	5.30	7	1.40	7	1.40
2.50	3.60	2.50	5.10	9	1.50	9	1.50
3.00	3.20	3.00	4.80	11	1.60	12	1.60
3.50	3.00	3.50	4.40	12	1.70	14	1.70
0.00	2.70	0.00	4.10	14	1.80	16	1.80
0.50	2.50	0.50	3.80	15	1.90	19	1.90
1.00	2.30	1.00	3.50	17	2.00	21	2.00
1.50	2.10	1.50	3.20	19	2.10	23	2.10
2.00	2.00	2.00	2.90	21	2.20	26	2.20
2.50	1.80	2.50	2.70	23	2.30	28	2.30
3.00	1.70	3.00	2.40	25	2.40	30	2.40
4.00	1.50	3.50	2.20	27	2.50	31	2.50
4.50	1.40	4.00	2.10	29	2.60	33	2.60
5.00	1.30	4.50	1.90	30	2.70	35	2.70
6.00	1.20	5.00	1.80	32	2.80	38	2.80
7.00	1.10	5.50	1.70	34	2.90	40	2.90
8.00	1.00	6.00	1.50	35	3.00	41	3.00
8.50	0.96	6.50	1.40	37	3.10	43	3.10
9.00	0.92	7.00	1.30	39	3.20	45	3.20
9.50	0.85	7.50	1.20	41	3.30	47	3.30
10.00	0.82	8.00	1.10	43	3.40	49	3.40
10.50	0.79	9.00	1.00	45	3.50	51	3.50
11.00	0.77	9.50	0.96	47	3.60	52	3.60
11.50	0.75	10.00	0.94	49	3.70	54	3.70
12.00	0.73	11.00	0.90	50	3.80	56	3.80
12.50	0.71	11.50	0.86	51	3.90	58	3.90
13.00	0.69	12.00	0.83	53	4.00	60	4.00
13.50	0.67	12.50	0.80	55	4.10	62	4.10
14.00	0.65	13.00	0.78	57	4.20	64	4.20
15.00	0.64	13.50	0.75	59	4.30	66	4.30
16.00	0.63	14.00	0.73	60	4.40	68	4.40
17.00	0.60	14.50	0.72	62	4.50	70	4.50
19.00	0.59	15.00	0.69	65	4.60	72	4.60
21.00	0.58	15.50	0.67	66	4.70	74	4.70
22.00	0.57	16.00	0.65	68	4.80	76	4.80
25.00	0.56	16.50	0.63	70	4.90	78	4.90

Таблица 1: Данные для построения графиков



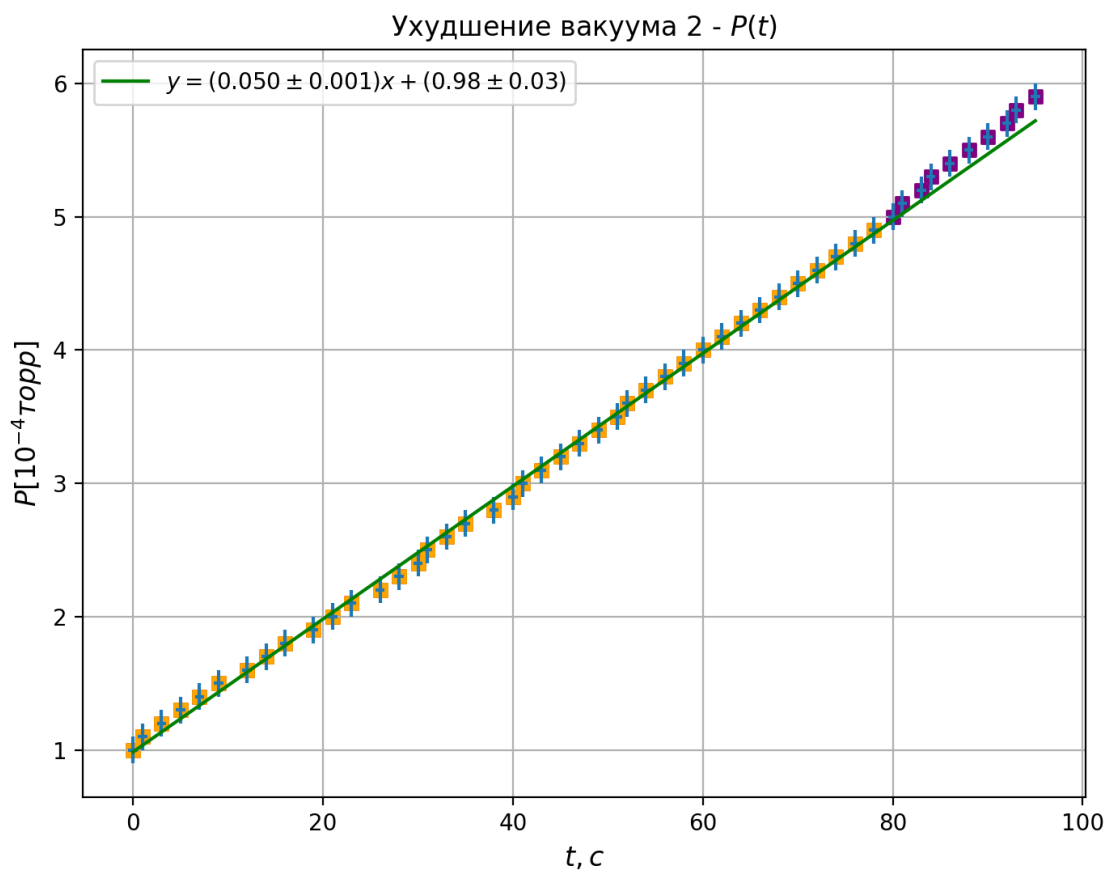
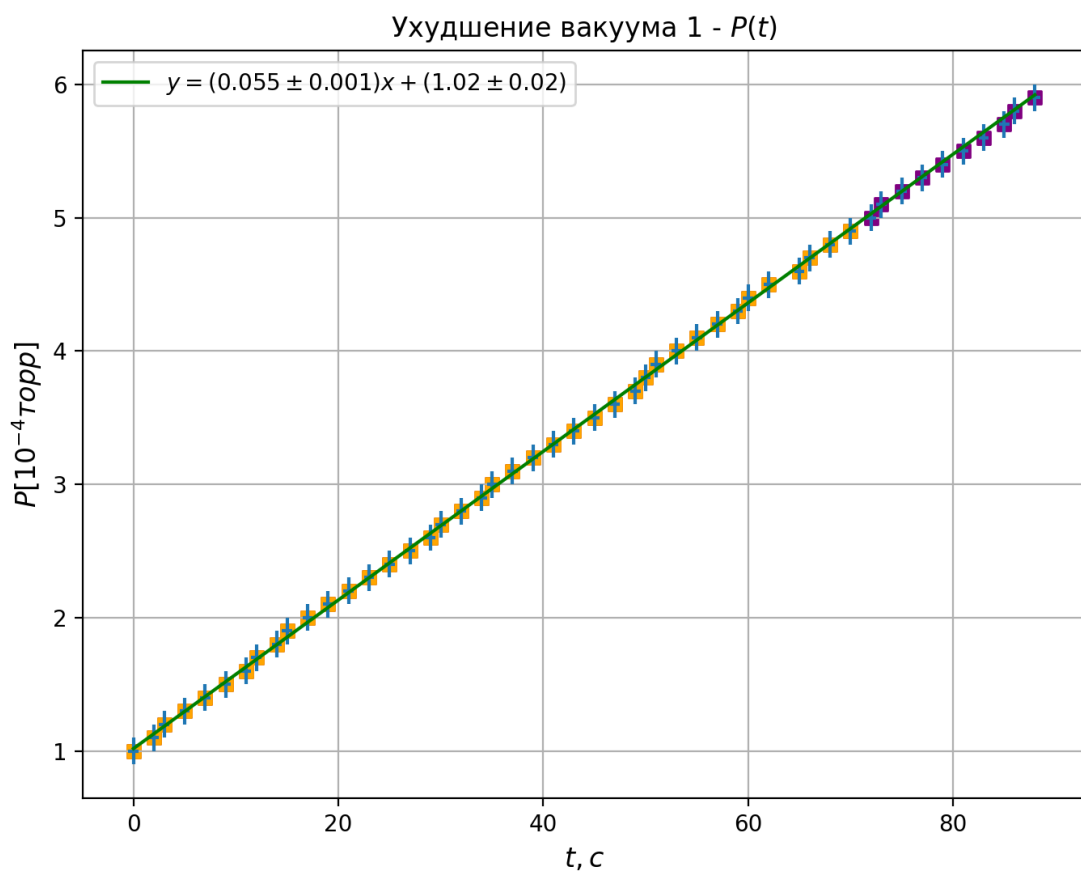


Рис. 5: Графики ухудшения вакуума.