

Получение и измерение вакуума (2.3.1)

Павлушкин Вячеслав

4 марта 2022 г.

1 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.

В работе используются: вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

2 Экспериментальная установка

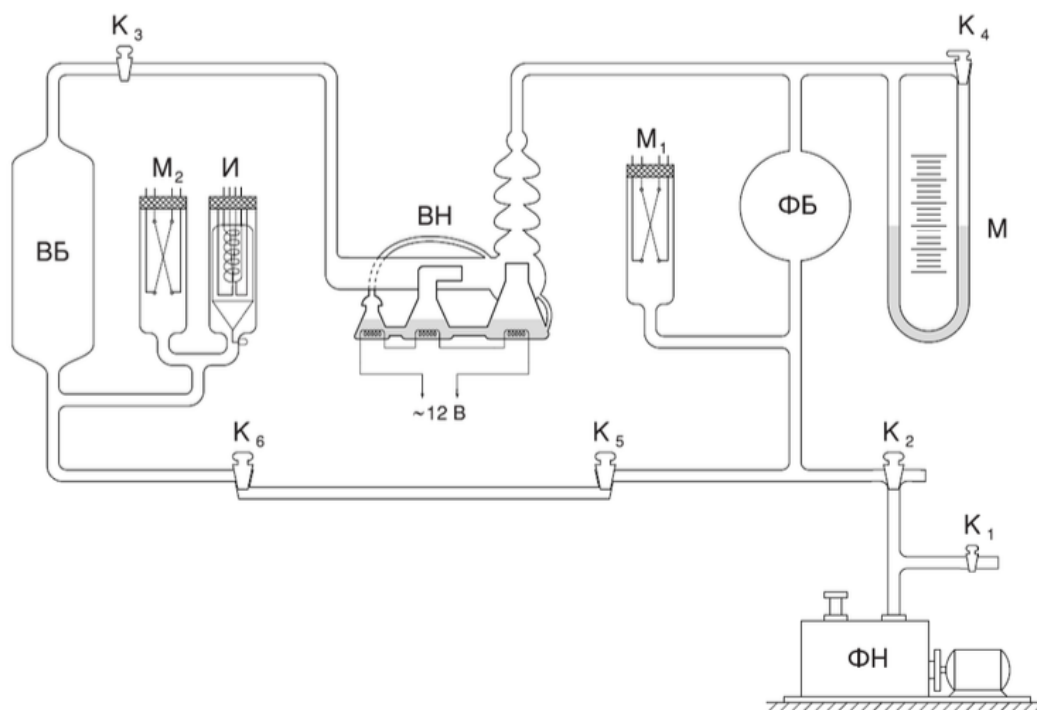


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термомпарных манометров (M_1 и M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов ($K_1, K_2, \dots K_6$) (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

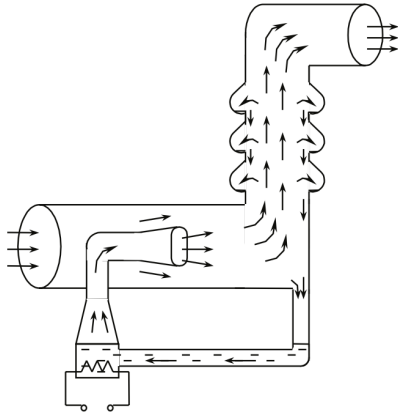


Рис. 2: Схема работы высоковакуумного насоса

Устройство масляного диффузионного насоса схематически показано на Рис. 2 (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. Далее смесь попадает в вертикальную трубу. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников после чего стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом.

3 Теоретические сведения

3.1 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

имеем:

$$-VdP = \left(PW - \sum Q_i \right) dt$$

При достижении предельного вакуума устанавливается $P_{\text{пр}}$, и $dP = 0$. В таком случае:

$$W = \left(\sum Q_i \right) / P_{\text{пр}}$$

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:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp \left(-\frac{W}{V} t \right) \quad (1)$$

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.

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

3.2 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 переходе к высокому вакууму столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками.

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

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

Если труба соединяет установку с насосом, то давлением P_1 у его конца можно пренебречь. Давление в сосуде $P = P_2$. Тогда пропускная способность трубы:

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

4 Ход работы

4.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Перед началом работы проверим, что все краны приведены в правильное положение.
2. Запустим воздух в систему (для этого нужно открыть кран K_2 и подождать пару минут пока воздух заполнит установку).
3. Запустим форвакуумный насос, чтобы он откачал воздух из установки.
Пронаблюдаем за тем, как давление в установке уменьшается и продолжим откачку до момента, пока давление не будет порядка 10^{-2} торр.
4. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объем, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части, откроем на всю форвакуумную часть. Тогда давление изменится
5. Запишем показания масляного манометра, а именно высоту масла в обоих коленах:

$$h_1 = (34.9 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$h_2 = (6.2 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} \approx 1.6 \%$$

$$\Delta h_{\text{фв}} = (28.7 \pm 0.5) \text{ см}.$$

6. Зная объем "запертой" части установки $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$ и используя соотношение $P_A V_{\text{кап}} = P_2 V_2$ вычислим объем форвакуумной части установки. При этом давление $P_1 = P_{\text{атм}} = (98.4 \pm 0.1) \text{ кПа}$ $P_2 = \rho_{\text{масл}} g \Delta h_{\text{фв}}$, а относительная погрешность полученного значения равна относительной погрешности величины $\Delta h_{\text{фв}}$:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{P_1} \approx 1.6 \%.$$

и в результате имеем:

$$V_{\text{фв}} = (1.97 \pm 0.03) \text{ л}$$

7. Проведем те же самые измерения с диффузионным насосом и получим объем установки, из которой вычитанием объема форвакуумной части получается объем высоковакуумной части.

$$h_3 = (29.8 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$h_4 = (11.6 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = (18.2 \pm 0.2) \text{ см}.$$

Погрешности высот определяются аналогично предыдущему пункту. Как и формула для полного объема установки, тогда:

$$V_{\text{полн}} = \frac{P_A}{\rho g \Delta h_{\text{полн}}} V_{\text{кап}} \approx 3.11 \text{ л},$$

$$\varepsilon_{V_{\text{полн}}} = \varepsilon_{\Delta h} \approx 1 \%.$$

В результате искомая величина равна:

$$V_{\text{вв}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{фв}} = 1.14 \text{ л},$$

$$\sigma_{V_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{V_{\text{полн}}}^2 + \sigma_{V_{\text{фв}}}^2} \approx 0.04 \text{ л},$$

$$V_{\text{вв}} = (1.14 \pm 0.04) \text{ л}.$$

4.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

8. Не выключая форвакуумного насоса убедимся в том, что в установке не осталось запертых объемов.
9. Откачав установку до давления порядка 10^{-2} торр, приступим к откачке ВБ с помощью диффузионного насоса.
10. С помощью термопарного манометра наблюдаем за тем, как идет откачка ВБ. Мы должны продолжать процесс откачки до тех пор, пока там не установится давление порядка $3 \cdot 10^{-4}$ торр. При приближении давления к этой величине масло в диффузионном насосе закипит, поэтому подсчитаем количество капель, стекающих из сопла второй ступени диффузионного насоса:

$$N = 10 \text{ капель.}$$

11. С помощью ионизационного манометра измерим значение предельного давления в системе со стороны высоковакуумной части:

$$P_{\text{пр}} = (8.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр.}$$

12. Найдем скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума, для этого открывая и закрывая кран K_3 будем то подключать насос к объему, то отключать его, при этом на видео зафиксируем показания манометра от времени и построим графики необходимых зависимостей (каких именно подробнее описано в соответствующих пунктах ниже), для которых определим коэффициенты наклона прямых и их погрешности (с помощью МНК).

Для случая улучшения вакуума воспользуемся формулой (1) и построим график зависимости $(\ln(P - P_{\text{пр}}))$ от t . При построении такого графика из МНК получим коэффициент наклона — k , с помощью которого можно найти $W = -kV_{\text{вв}}$. Построим эти графики (Рис. 3, 5, 6):

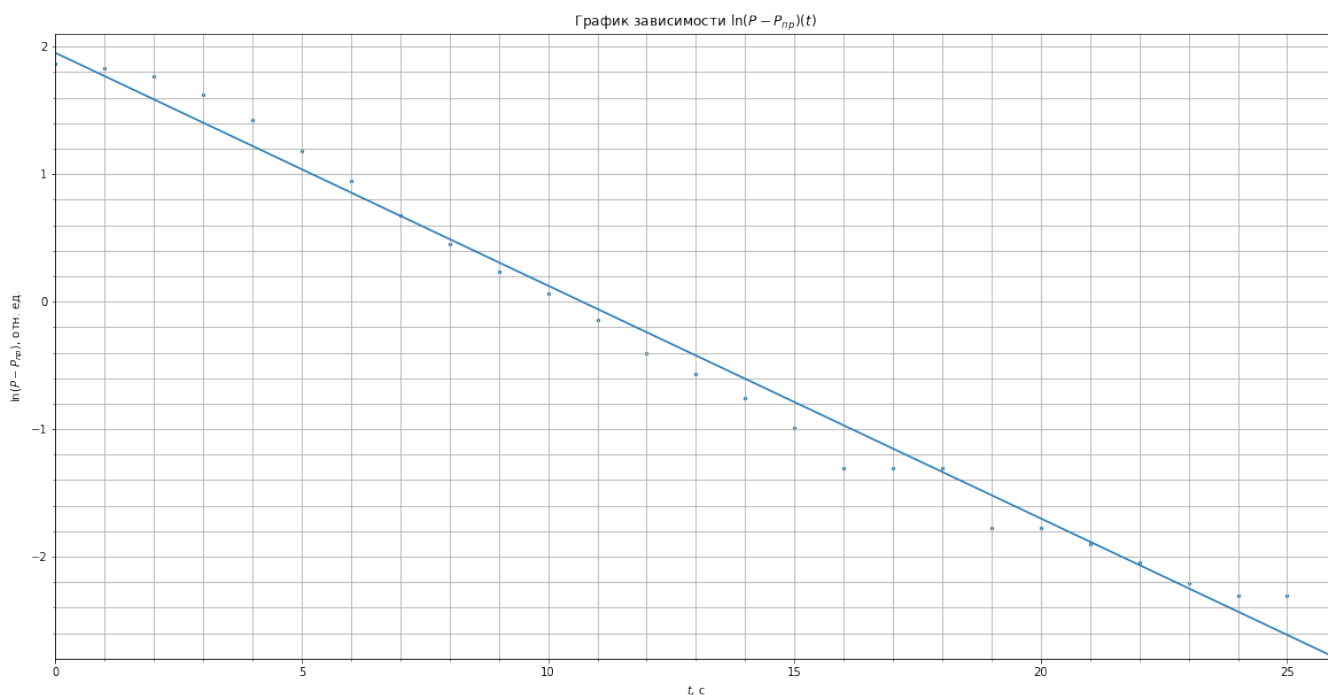


Рис. 3: Улучшение вакуума 1

$k, \frac{1}{c}$	$\sigma_k^{сл}, \frac{1}{c}$	$\sigma_k, \frac{1}{c}$	$k_{ср}, \frac{1}{c}$	$W, \frac{л}{c}$	$\sigma_W, \frac{л}{c}$
-0.183	0.004	0.02	-0.176	0.20	0.02
-0.173	0.004	0.02			
-0.173	0.004	0.02			

Таблица 1: Коэффициенты наклона при улучшении вакуума

13. Оценим величину потока газа Q_H . Для этого воспользуемся данными, полученными при ухудшении вакуума. А именно построим графики зависимости $P(t)$ и определим для них коэффициенты угла наклона прямой. Поскольку $V_{вв}dP = (Q_d + Q_{и})dt$ получим $(Q_d + Q_{и}) = kV_{вв}$. По графикам получаем: Используя формулу $Q_H = P_{пр}W - (Q_d + Q_{и})$, а значит $\varepsilon_{Q_H} = \sqrt{\varepsilon_{P_{пр}W}^2 + \varepsilon^2} \approx 10.4\%$

$k \cdot 10^{-6}, \frac{\text{торр}}{c}$	$\sigma_k^{сл} \cdot 10^{-6}, \frac{\text{торр}}{c}$	$\sigma_k \cdot 10^{-6}, \frac{\text{торр}}{c}$	$k_{ср} \cdot 10^{-6}, \frac{\text{торр}}{c}$	$Q_d + Q_{и}, \text{торр} \cdot \frac{л}{c}$	$\sigma_{Q_d+Q_{и}}, \text{торр} \cdot \frac{л}{c}$
9.8	0.1	0.15	9.8	$1.12 \cdot 10^{-5}$	$0.04 \cdot 10^{-5}$
10.0	0.1	0.15			
10.0	0.1	0.15			
9.5	0.1	0.14			

Таблица 2: Коэффициенты наклона при ухудшении вакуума

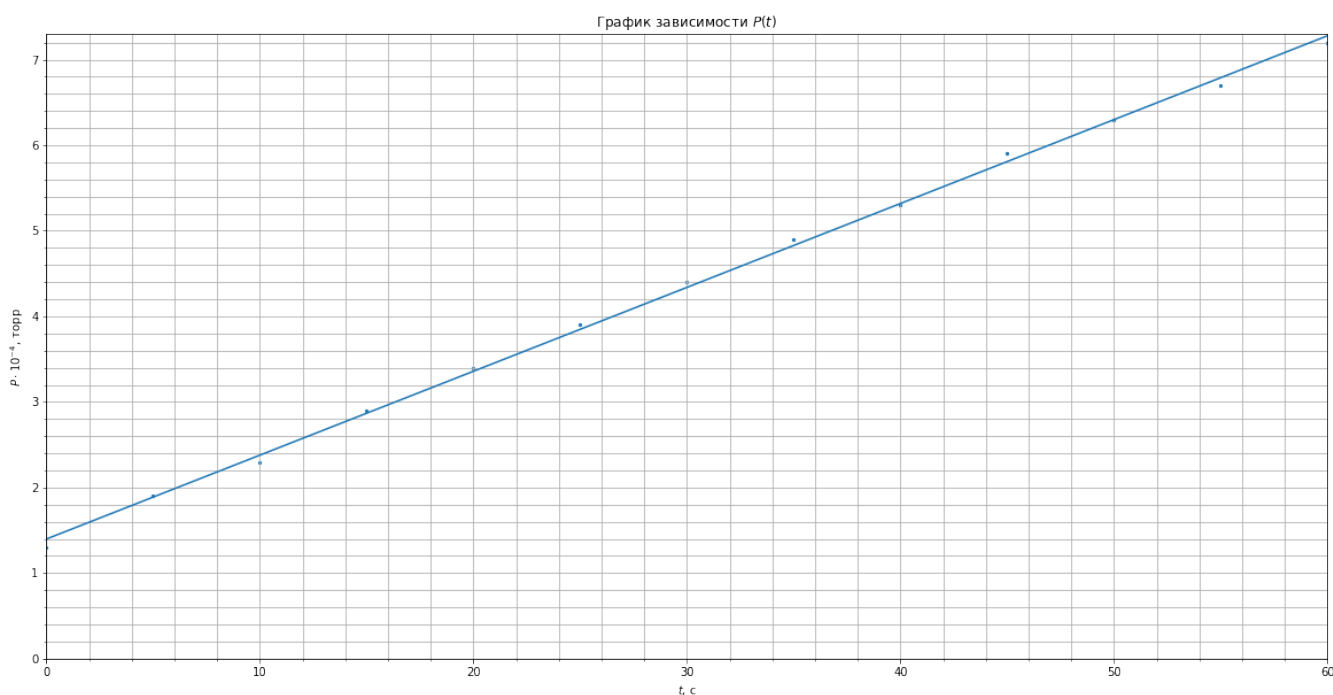


Рис. 4: Ухудшение вакуума 1

получим, что: $Q_H = (5.4 \pm 0.08) \cdot 10^{-6} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$.

14. Оценим пропускную способность трубки по формуле (6):

$$L = (10 \pm 1) \text{ см};$$

$$d = (0.8 \pm 0.1) \text{ мм},$$

$$C_{\text{тр}} = (2.1 \pm 0.1) \text{ л/с.}$$

Погрешность $C_{\text{тр}}$ оценена как корень из суммы квадратов погрешностей длинны и диаметра (которые явным образом не указаны на установке, оценка довольно грубая).

Скорость откачки по порядку сходится с пропускной способностью трубки, что означает – эксперимент достаточно успешен.

15. Введем в систему искусственную течь и запишем значение установившегося при этом давления и давления $P_{\text{фв}}$:

$$P_{\text{уст}} = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.} \quad P_{\text{фв}} = (1.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ торр.}$$

16. Поскольку

$$P_{\text{пр}}W = Q_1, \quad P_{\text{уст}}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt},$$

то с учетом (2), получаем:

$$W = \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \approx 0.046 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

(Поскольку давления померены с точностью не менее 10%, то можно учитывать погрешность, вносимую величиной $\frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}$ относительная погрешность которой равна относительной погрешности $C_{\text{тр}}$, то есть составляет 5%)

17. Следуя указаниям в методичке выключаем установку.

5 Вывод

- Измерили объемы форвакуумной, высоковакуумной части установки, так же как и объем всей установки.
- Определили скорость откачки двумя способами.

Возможными причинами расхождения полученных результатов на один порядок могло послужить изменение температуры, созданное нагреваемым масляным высоковакуумным насосом. Также возможна разница из-за принципа работы высоковакуумного насоса – при уменьшении давления в нем, производительность начинает падать.

- Оценили поток газа, поступающего из насоса в откачиваемую систему.

6 Приложение

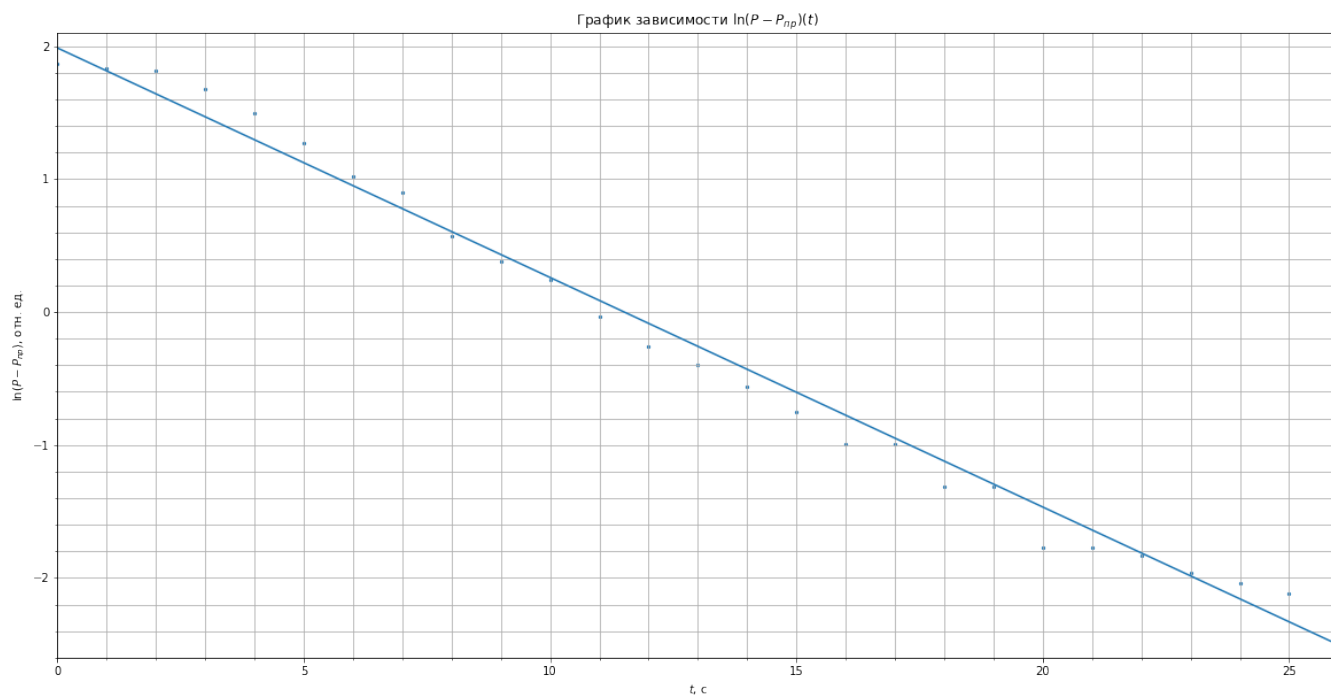


Рис. 5: Улучшение вакуума 2

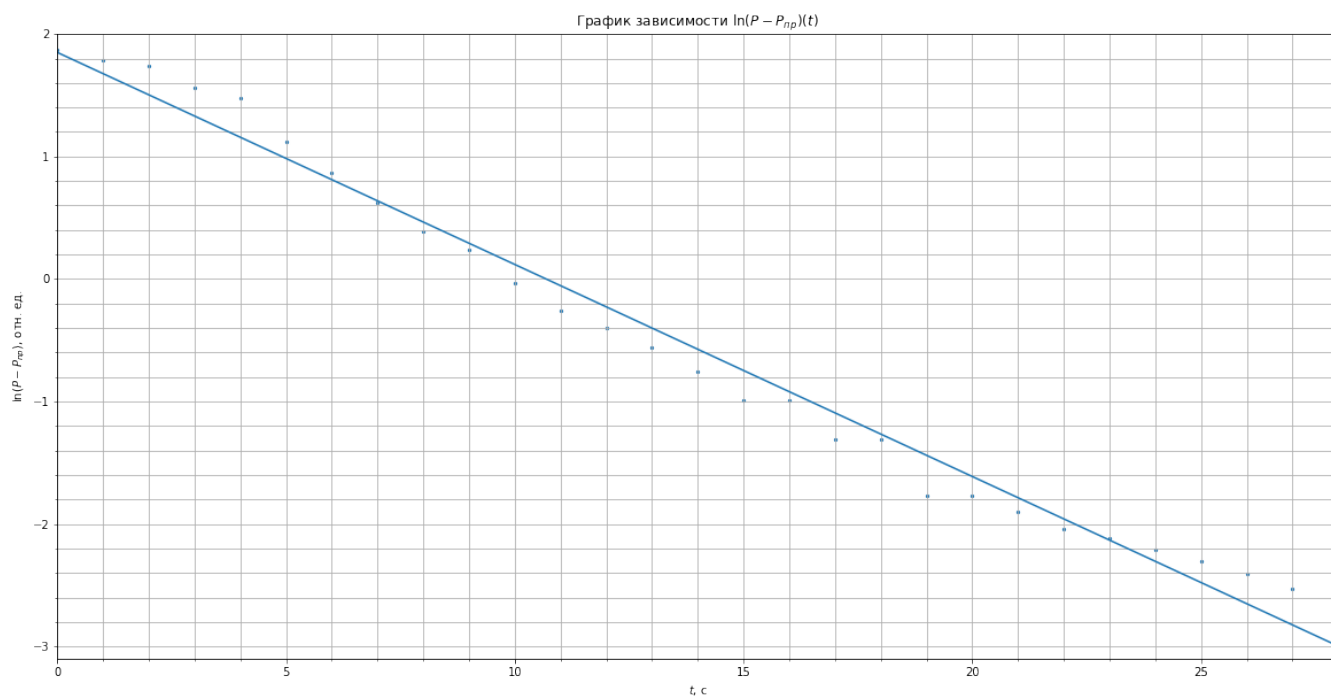


Рис. 6: Улучшение вакуума 3

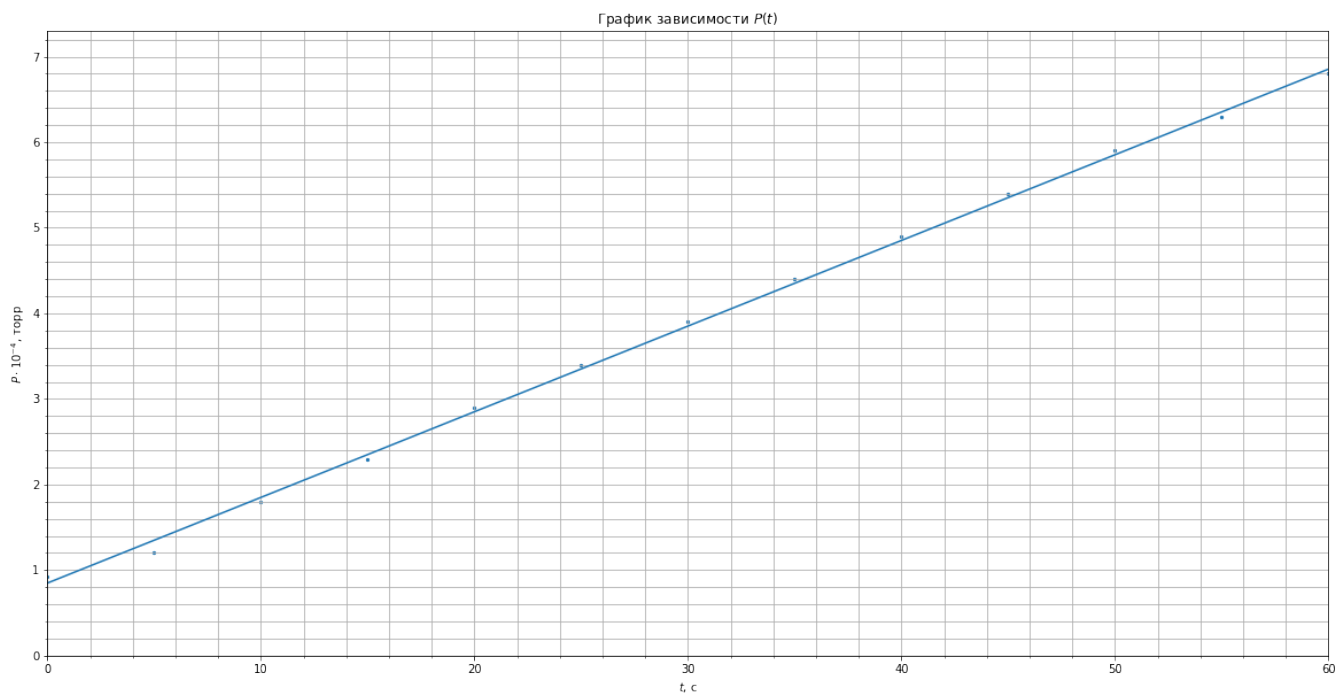


Рис. 7: Ухудшение вакуума 2

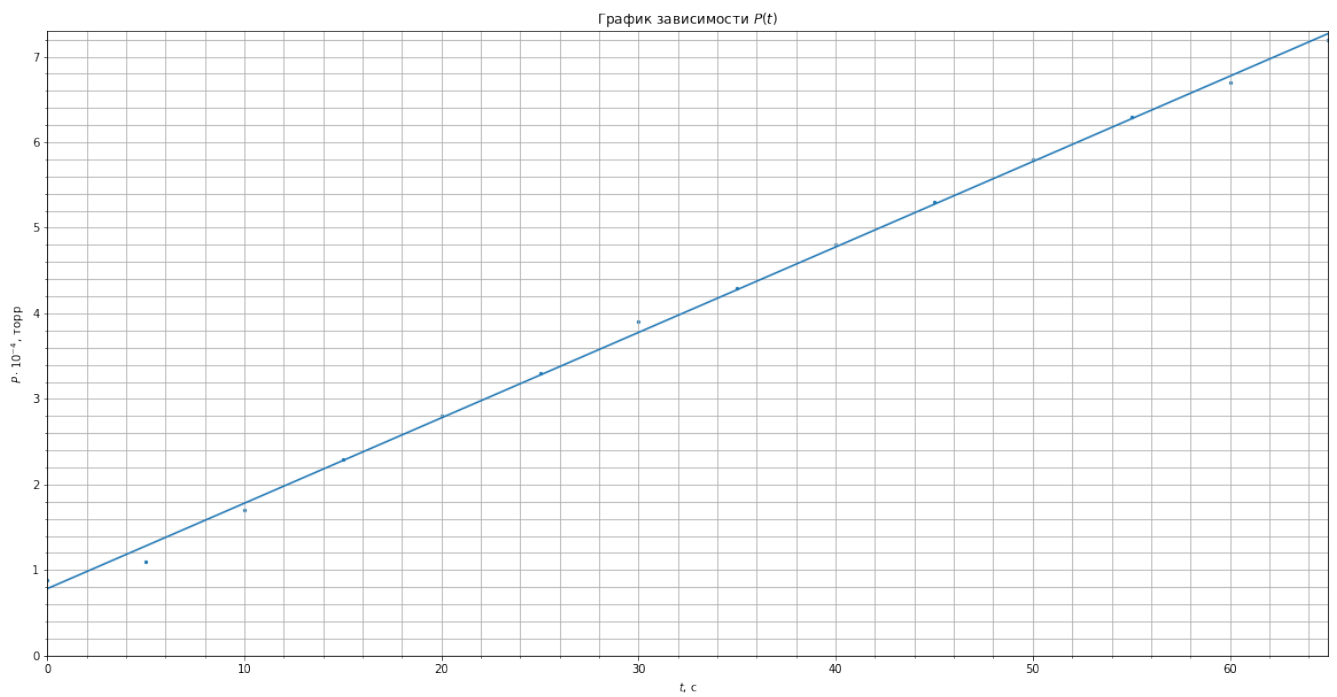


Рис. 8: Ухудшение вакуума 3

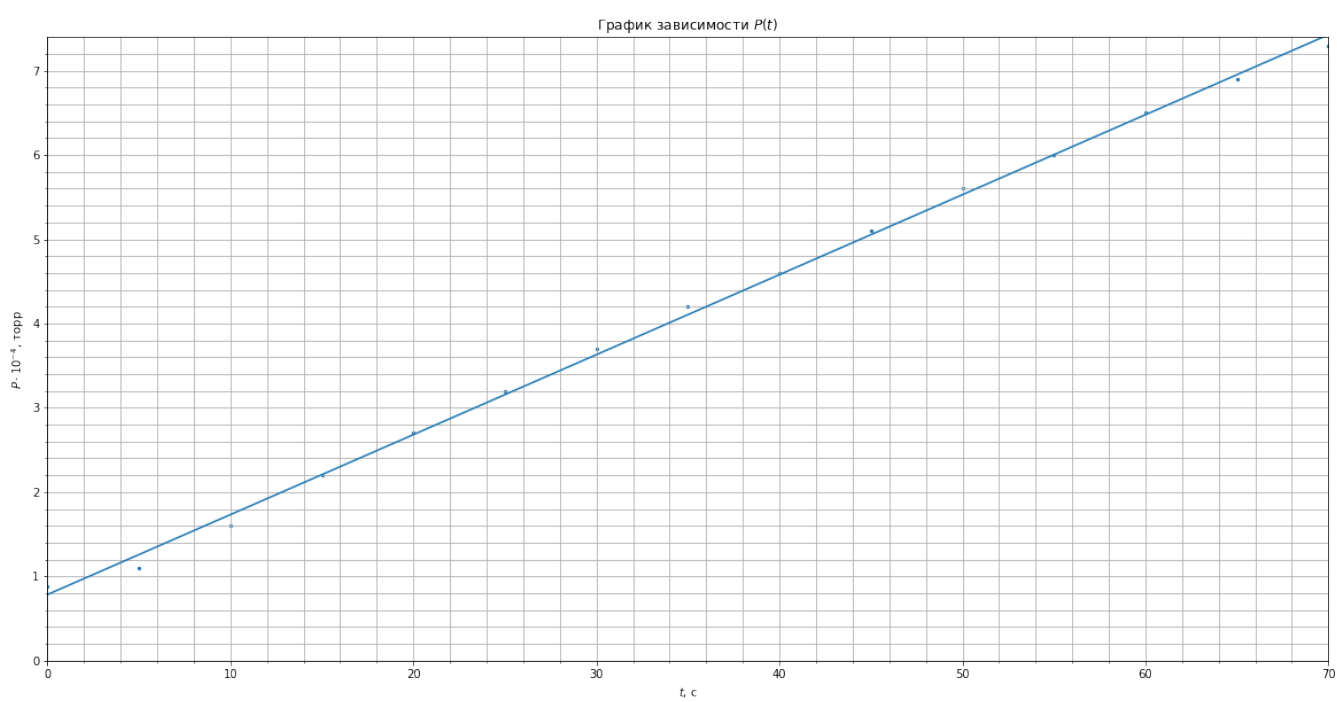


Рис. 9: Ухудшение вакуума 4