

Отчет о выполнении лабораторной работы 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Дудаков Семён

7 марта 2024 г.

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, термopарным и ионизационным.

1 Теоретическая справка

Экспериментальная установка

В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10^{-2} торр и диффузионным масляным насосом до давления 10^{-4} торр.

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 (K_1, K_2, \dots, K_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.

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов по-

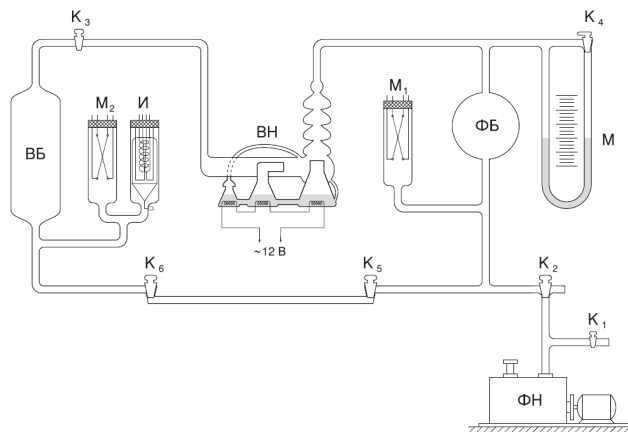


Рис. 1: Схема установки

лые и составляют одно целое с рукоятками. Пробки кранов притерты к корпусам. Для

герметизации используется вакуумная смазка.

Устройство и принцип действия *форвакуумного насоса* схематически, но довольно ясно изображены на рис 2. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями. Устройство и принцип

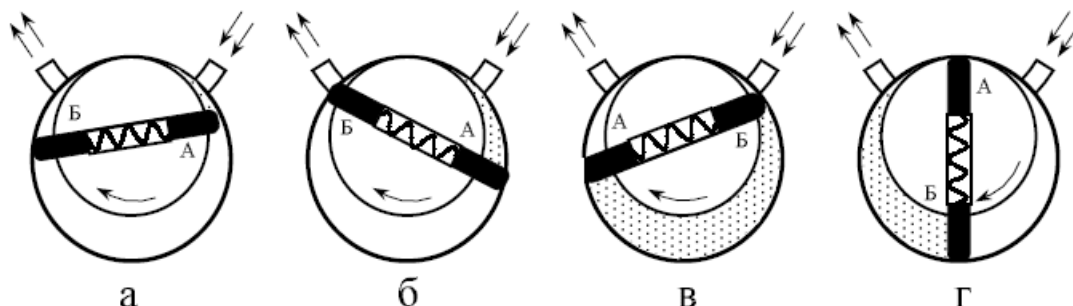


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

действия *диффузионного насоса* схематически изображены на рис 2. Такой насос работает в тысячи раз быстрее форвакуумного. Его действие основано на диффузии. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубке Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. В трубке Г мало осаждается и стекает вниз. Оставшийся газ, выходя в трубку ФВ, откачивается форвакуумным насосом.

Диффузионный насос работает наиболее эффективно, когда длина свободного пробега молекул примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубки ВВ. Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше $5 \cdot 10^{-2}$ торр, поэтому пары масла создают плотную струю, увлекающую с собой молекулы газа. Диффузионный насос, используемый в нашей уста-

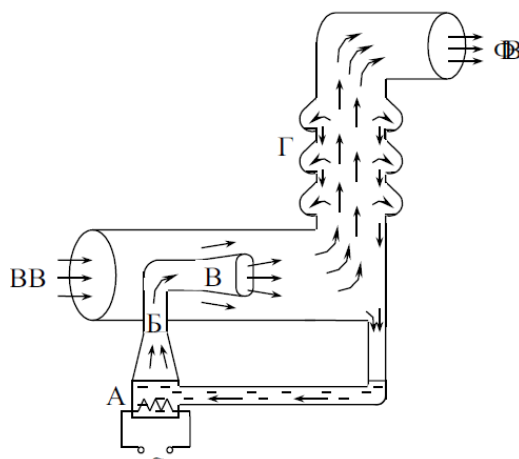


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

новке (см. рис 1) имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется ещё одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая её. По этой причине плотность струи первой ступени выше, и эта ступень начинает откачивать при

более высоком давлении в форвакуумной части. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями масла. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров. Соответственно, в откачиваемый объем поступает меньше паров масла, и его удаётся откачать до более высокого вакуума.

Термопарный манометр. Чувствительным элементом манометра является платиново-родиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключённая в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R, расположенный на передней панели вакуумметра. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство.

Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы, и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях, не меньших 1 торр, теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает.

При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает, и температура спая возрастает. При вакууме порядка 10^{-3} торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими потерями тепла, и температура становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопары приведена на рис. 5.

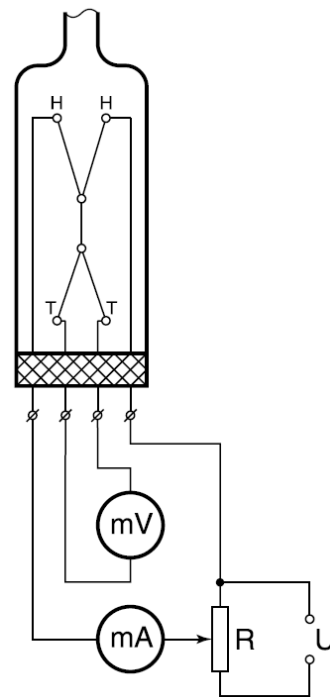


Рис. 4: Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

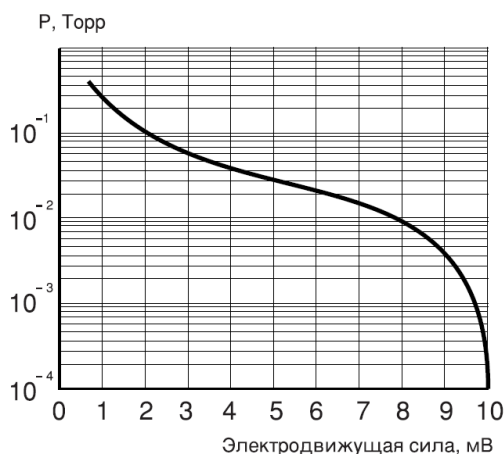


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

Ионизационный манометр. Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются раскалённым катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за её витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своём пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток.

Накалённый катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает 10^{-3} торр, поэтому перед его включением необходимо проверить давление термопарным манометром.

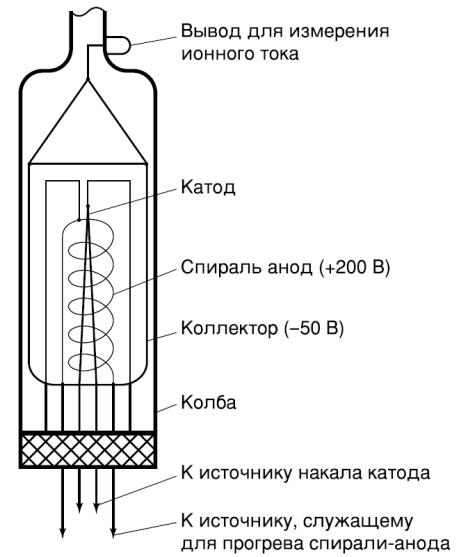


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛТ-2

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/μ) в единицу времени $-VdP$ и сумму перечисленных токов? имеем:

$$-VdP = (PW - \sum_i Q_i)dt \quad (1)$$

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

$$W = (\sum_i Q_i)/P_{\text{пр}} \quad (2)$$

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:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (3)$$

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.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (4)$$

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:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{l} \quad (5)$$

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

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (6)$$

Для пропускной способности отверстий имеется формула

$$C_{\text{отв}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (7)$$

Для воздуха при комнатной температуре $\bar{v}/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$.

2 Ход работы

Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Открываем все краны и запускаем в систему воздух из атмосферы ($P_{\text{атм}} = 99.67 \cdot 10^3 \text{Па}$). Подождать 1-2 минуты, пока воздух заполнит установку.
2. Закрываем краны K_5 и K_6 , тем самым заперев в кранах и в капилляре воздух объёмом $V = 50 \text{см}^3$
3. Закрываем K_2 , включаем форвакуумный насос и даём ему откачать себя в течение двух минут.
4. Подключаем установку к насосу краном K_2 . Откачиваем установку до 10^{-2} торр.
5. Отсоединяем установку краном K_2 , и оставляем насос работать «на себя».
6. Перекрываем K_3 , отделяя высоковакуумную часть установки.
7. Закрываем K_4 , чтобы привести в готовность масляный манометр.
8. Открываем K_5 , чтобы «запертый» ранее воздух заполнил форвакуумную часть установки, снимаем давление с помощью вакуумного манометра, измерив разность высот столбиков масла (приводим результаты и повторного измерения):

$$\Delta h_1 = (26.9 \pm 0.2) \text{ см}; \quad \Delta h_2 = (26.7 \pm 0.2) \text{ см}$$

Погрешность измерения величин определяется ценой деления шкалы манометра и способностью разглядеть показания.

9. Имея в виду, что плотность масла в манометре равна 885 г/л , и считая, что установившееся давление много больше форвакуумного, по формуле

$$P = \rho g \Delta h$$

получаем:

$$P_1 = (2335 \pm 17) \text{ Па}; \quad P_2 = (2318 \pm 17) \text{ Па}$$

Пользуясь законом Бойля-Мариотта (т.к. расширение газа изотермическое), используя среднее значение измеренного давления, получаем

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_{\text{ср}} V_{\text{фв}}$$

$$V_{\text{фв}} = (2142 \pm 16) \text{ см}^3$$

10. Аналогично, открыв кран K_3 , получив значения разности высот на манометре

$$\Delta h_1 = (17.3 \pm 0.2) \text{ см}; \quad \Delta h_2 = (17.2 \pm 0.2) \text{ см},$$

Значения давления:

$$P_1 = (1502 \pm 17) \text{ Па}; \quad P_2 = (1493 \pm 17) \text{ Па}$$

Получаем объём высоковакуумной части установки из закона Бойля-Мариотта:

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

$$V_{\text{вв}} = (1185 \pm 41) \text{ см}^3$$

11. По окончании измерений манометром сразу открыть кран K_4

Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

12. Установим ток в лампе $I_0 = 0,6$ А.
13. После того, как давление упало ниже $1 \cdot 10^{-2}$ торр, закроем К6 и установим ток $I_{\max} = 1,27$ А для нагревания масла.
14. Когда давление достигнет $3 \cdot 10^{-4}$ торр, включим ионизационный манометр.
15. По достижении $1 \cdot 10^{-4}$ торр начнем дегазацию.
16. Получаем предельное давление $P_{\text{пр}} = 7,4 \cdot 10^{-5}$ торр.
17. Остановим откачку и откроем кран К3. Снимем зависимость $P(t)$ в процессе ухудшения, а затем в процессе улучшения вакуума.
18. Все результаты представим на графиках:
19. По графикам 2 и 4: $W = -\bar{k}V_{\text{вв}} = (213 \pm 14)$ см³/с.
20. Поскольку $V_{\text{вв}}dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})dt$ получим $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = kV_{\text{вв}}$. По графикам 1 и 3 получаем, используя формулу $Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}}W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$ получим: $Q_{\text{н}} = (15,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ торр \cdot м³/с
21. Теперь попробуем получить тот же результат для W методом создания искусственной течи. Для этого откроем кран К6 и подождем, пока давление установится. Используя формулу для расчета скорости истечения газа, получаем:

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

22. В результате создания искусственной течи получим $P_{\text{уст}} = (7,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$ торр, откуда $W = (132 \pm 19)$ см³/с.

3 Вывод

В ходе проделанной работы мы измерили: объемы насосов, производительность насоса W , обратный ток газа через насос $Q_{\text{н}}$. Объемы насосов и обратный ток газа получилось измерить с довольно высокой точностью: 0,7% – 3% и 0,6% относительной погрешности соответственно. Однако полученные значения для производительности насоса различаются почти в два раза. Это связано с тем, что после создания течи, пропускная способность системы ухудшается (при уменьшении давления в высоковакуумном насосе, его производительность начинает падать).

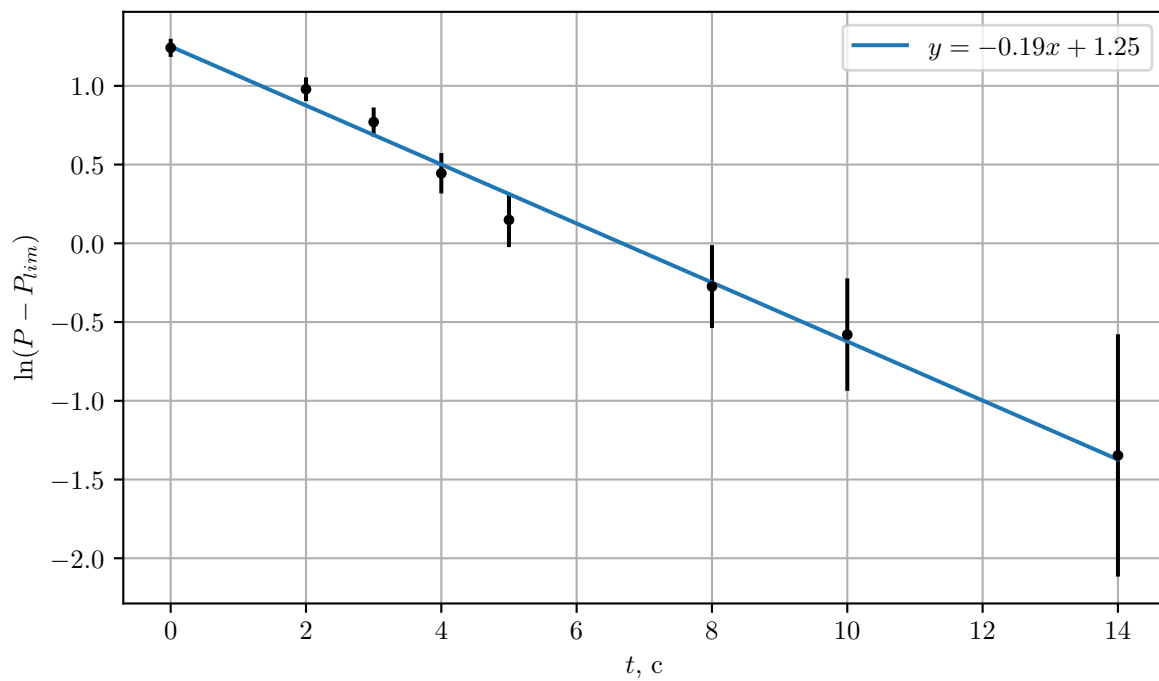


Рис. 7: Улучшение вакуума 1

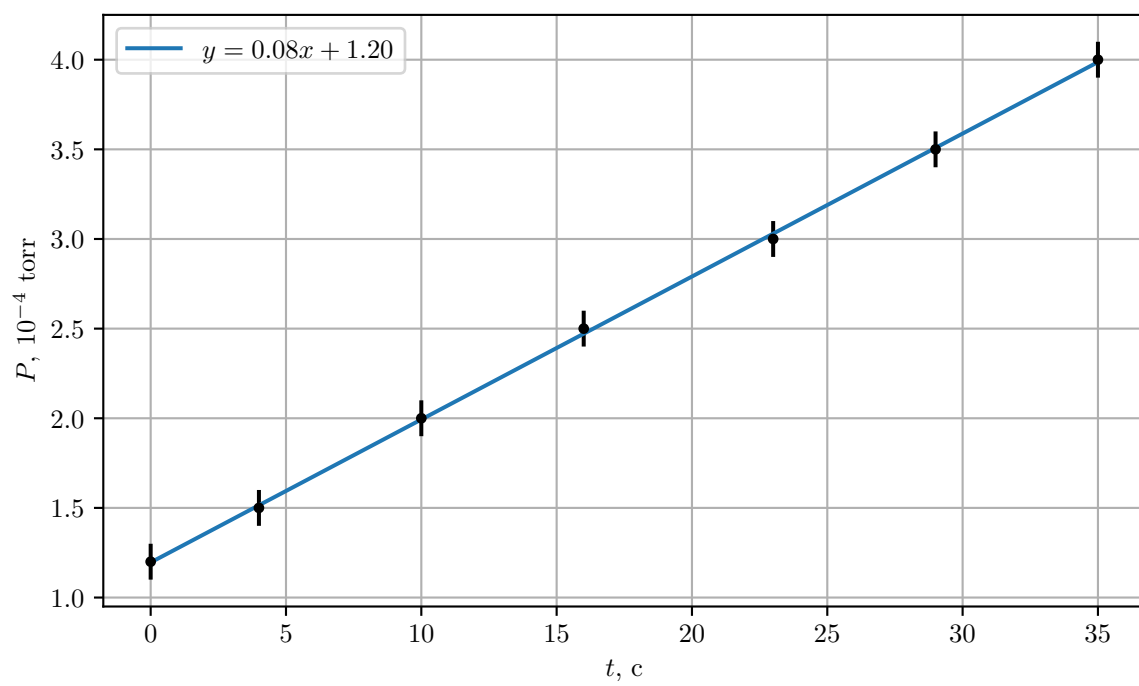


Рис. 8: Ухудшение вакуума 1

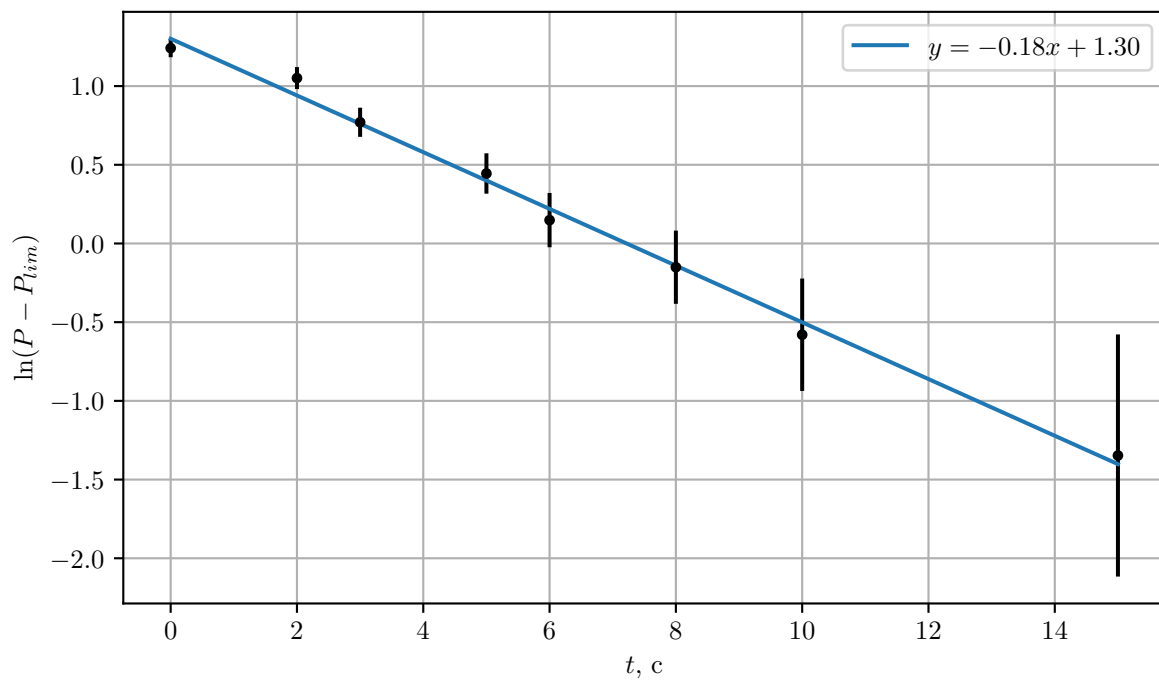


Рис. 9: Улучшение вакуума 2

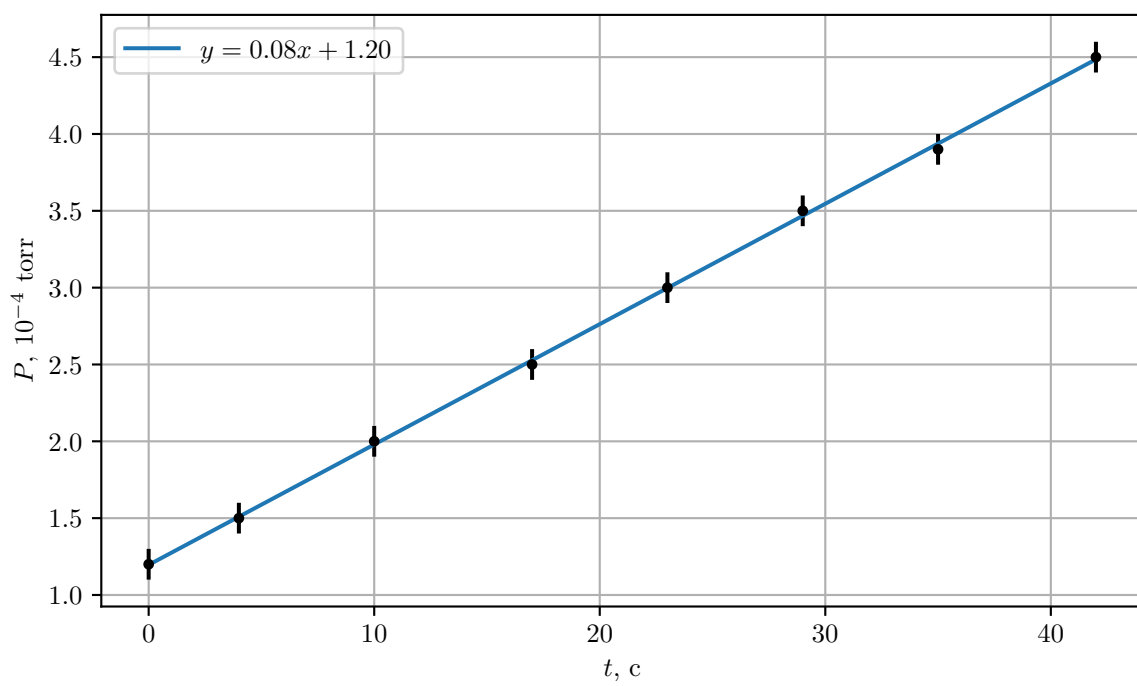


Рис. 10: Ухудшение вакуума 2