

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Салтыкова Дарья

Б04-105

Долгопрудный 2022

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.

Оборудование: вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

2 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, термопарных 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.

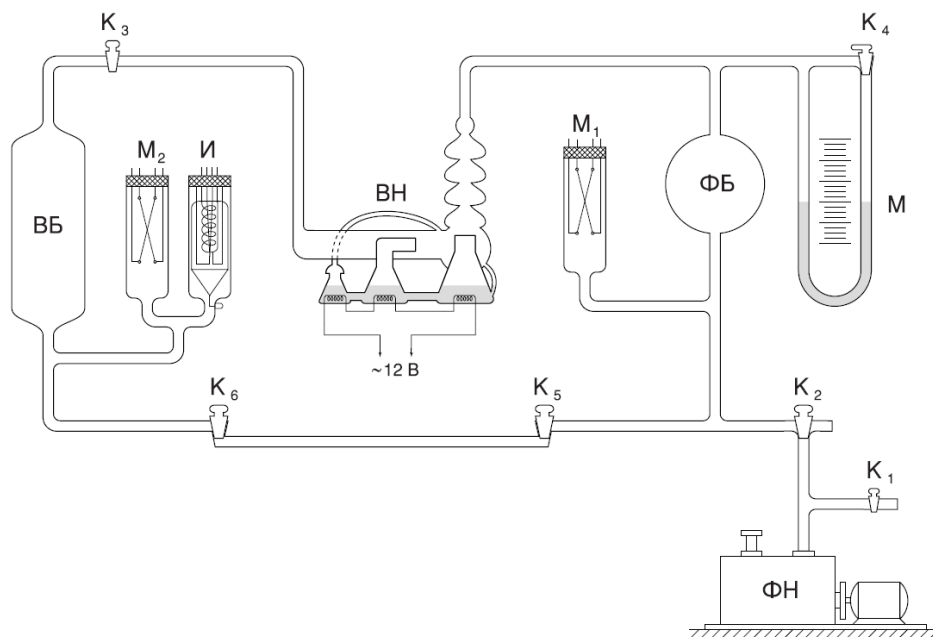


Рис. 1: Схема установки

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов полые 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 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

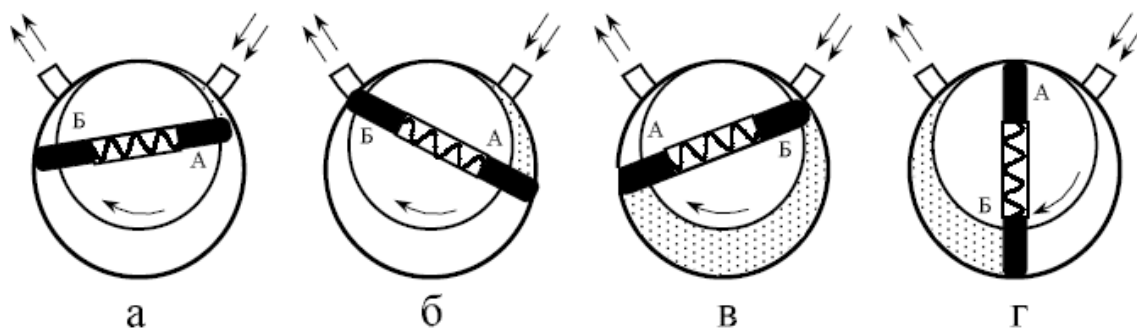


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

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.

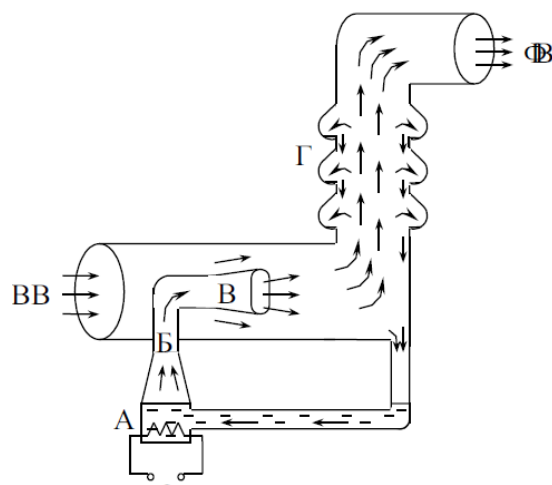


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

Диффузионный насос, используемый в нашей установке (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.

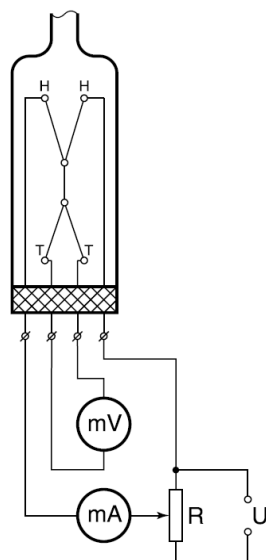


Рис. 4: Схема термодатчика с лампой ЛТ-2

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.

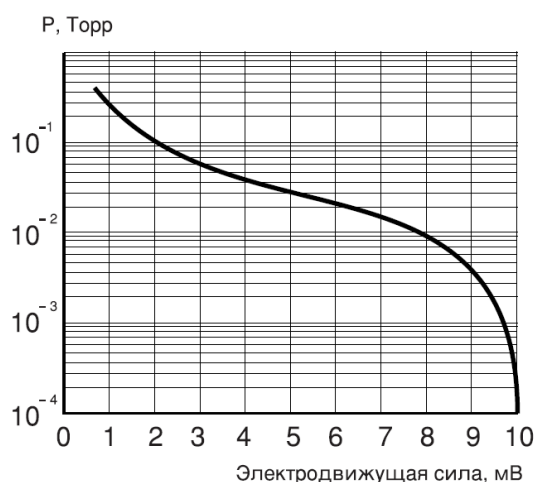


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

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.

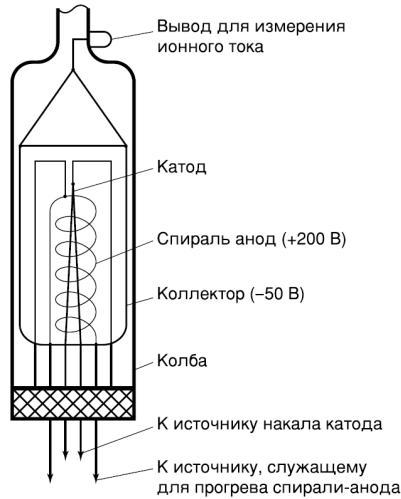


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛТ-2

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

3 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 при токи газа в сосуд (в единицах PV), такие как течи извне Q_n , десорбция с поверхностей внутри сосуда Q_d , обратный ток через насос Q_n . Тогда, приравнявая убыль газа из сосуда (с точностью до RT/μ) в единицу времени $-VdP$ и сумму перечисленных токов имеем:

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

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

$$W = (\sum_i Q_i)/P_{пр}$$

Поскольку обычно Q_n постоянно, а Q_n и Q_d слабо зависят от времени, также считая постоянной W , можем проинтегрировать (1) и получить:

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

Полная скорость откачки W , собственная скорость откачки насоса W_n и проводимости элементов системы C_1, C_2, \dots соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

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 сосуде $P = P_2$. Тогда имеем:

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

Для пропускной способности отверстий имеется формула

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

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

4 Ход работы

Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверим, что K_4 открыт, впусим в установку атмосферный воздух через краны K_1 и K_2 . «Запрём» в капилляре атмосферный воздух кранами K_5 и K_6 . Объем капилляра в используемой установке:

$$V_{\text{к}} = 50 \text{ см}^3.$$

2. Закроем K_1 и K_2 , включим форвакуумный насос и дадим ему откачать себя. Подключим установку к насосу краном K_2 . Откачаем установку до $P = 1,7 \cdot 10^{-2}$ торр. Отсоединим установку краном K_2 , и оставим насос работать «на себя». Перекроем K_3 , отделяя высоковакуумную часть установки. Закроем K_4 для подготовки масляного манометра к измерениям.

3. Откроем K_5 , чтобы «запертый» ранее воздух заполнил форвакуумную часть установки, снимем давление с помощью вакуумного манометра, измерив разность высот столбиков масла:

$$h_1 = (12.8 \pm 0.1) \text{ см}; \quad h_2 = (39.2 \pm 0.1) \text{ см}$$

$$\Delta h_{\text{фв}} = (26.9 \pm 0.1) \text{ см}$$

4. Имея в виду, что плотность масла в манометре равна $\rho = 885 \text{ г/л}$, а $P_{\text{атм}} = 101.3 \text{ кПа}$, и пользуясь законом Бойля-Мариотта, получим:

$$V_{\text{фв}} = V_{\text{к}} \frac{P_{\text{атм}}}{\Delta h_{\text{фв}} \rho g} = (2.13 \pm 0.01) \text{ л}$$

5. Аналогично, открыв кран K_3 , получим значения разности высот на манометре

$$h_3 = (18.0 \pm 0.1) \text{ см}; \quad h_4 = (39.7 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = (17.2 \pm 0.1) \text{ см}$$

Получим полный объем и объем высоковакуумной части установки:

$$V_{\text{полн}} = V_{\text{к}} \frac{P_{\text{атм}}}{\Delta h_{\text{полн}} \rho g} = (3.33 \pm 0.01) \text{ л}$$

$$V_{\text{вв}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{фв}} = (1.20 \pm 0.02) \text{ л}$$

6. Откроем кран K_4 , чтобы уравновесить масло в манометре во избежание его переброса в установку.

Получение высокого вакуума

1. Продолжим откачивать установку форвакуумным насосом. Включим термопарный вакуумметр ВИТ-2 и по градуировочной кривой проверим ЭДС. После того, как давление упадет примерно до $2 \cdot 10^{-2}$ торр, закроем краны K_5 и K_6 и приступим к откачке высоковакуумной части насоса с помощью диффузионного насоса. По вакуумметру ВИТ-2 наблюдаем за процессом откачки высоковакуумного баллона, необходимо достигнуть давления порядка 10^{-4} торр, что соответствует ЭДС 10 mV. Когда стрелка прибора достигнет этого значения, закроем кран K_6 .

2. При выключенной ионизационной лампе, вставив предохранитель, ставим переключатель «Род работы» в положение «Обезгаживание» на 10 минут.

3. Включим ионизационную лампу.

4. Измерим предельное давление:

$$P_{\text{пр}} = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$$

Измерение скорости по ухудшению и улучшению вакуума

1. Закроем K_3 и запишем на видео ухудшение и улучшение вакуума со времени по изменению показаний ионизационного манометра (Таблица 1). Полученные результаты изобразим на графиках (Рис. 7 и 8).

Рассчитав коэффициенты наклона графиков и зная объем высоковакуумной части установки, получим скорость откачки W диффузионного насоса. Считаем

$$W = -\bar{k} \cdot V_{\text{вв}}, \quad \varepsilon_W^2 = \varepsilon_{\bar{k}}^2 + \varepsilon_{V_{\text{вв}}}^2,$$

где \bar{k} — среднее коэффициентов наклона).

По ухудшению:

$$W = (0,44 \pm 0,03) \text{ л/с}$$

По улучшению:

$$W = (0,25 \pm 0,02) \text{ л/с}$$

2. Оценим пропускную способность трубки от высоковакуумного баллона до насоса.

Для случая ухудшения вакуума оценим Q_n с помощью полученных зависимостей $P(t)$. Считаем

$$\frac{dP}{dt} = \bar{k}$$

где \bar{k} — среднее коэффициентов наклона из зависимостей $P(t)$. Имеем:

$$Q_n + Q_d = (1,26 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

Таким образом,

$$Q_n + Q_d \approx 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

Оценим пропускную способность

$$d \sim 10^{-2} \text{ м}, \quad L \sim 1 \text{ м}, \quad \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \sim 500 \text{ м/с},$$

Имеем:

$$C_{\text{тр}} \sim 1 \text{ л/с},$$

3. Рассчитаем производительность насоса ещё одним способом: создав искусственную течь. Откроем кран K_6 при включённом насосе и измерим давление, установившееся при течи.

$$P_{\text{уст}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ торр.}$$

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

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

где d и L — диаметр и длина капилляра

$$d = 0,8 \text{ мм}, \quad L = 10,8 \text{ см}$$

$$P_{\text{фв}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ торр}$$

Таким образом,

$$W \approx 0,56 \text{ л/с.}$$

5 Вывод

В ходе работы:

1. Были определены объёмы форвакуумной и высоковакуумной частей установки.

Объём форвакуумной части $V_{\text{фв}} = (2,13 \pm 0,01) \text{ л}$

Объём высоковакуумной части $V_{\text{вв}} = (1,20 \pm 0,02) \text{ л}$

Объём всей установки $V_{\text{полн}} = (3,33 \pm 0,01) \text{ л}$

2. Был получен высокий вакуум: $P = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ торр.}$

3. Определена скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума.

По ухудшению:

$$W = (0,44 \pm 0,03) \text{ л/с}$$

По улучшению:

$$W = (0,25 \pm 0,02) \text{ л/с}$$

4. Определена скорость откачки с помощью искусственно созданной течи.

$$W \approx 0,56 \text{ л/с.}$$

Таблицы и графики

Таблица 1

Ухудшение						Улучшение			
t, с	P, ·10 ⁻⁴ торр	t, с	P, ·10 ⁻⁴ торр	t, с	P, ·10 ⁻⁴ торр	t, с	P, ·10 ⁻⁴ торр	t, с	P, ·10 ⁻⁴ торр
27	1,6	39	1,3	33	2,0	22	0,78	21	0,8
29	1,7	44	1,8	41	2,8	27	0,74	24	0,77
30	1,8	48	2,3	48	3,5	32	0,73	26	0,76
31	1,9	53	2,7	54	4,2	35	0,73	30	0,75
34	2,2	58	3,2	61	4,8	37	0,72	33	0,74
36	2,3	64	3,7	68	5,5	45	0,71	36	0,73
39	2,6	69	4,3	76	6,2	51	0,70	39	0,72
42	2,9	75	4,8			54	0,70	42	0,72
44	3,0	82	5,5			58	0,69	46	0,73
49	3,5	87	6,0			61	0,695		
54	3,9								
59	4,4								
64	4,8								
69	5,2								
74	5,7								
80	6,2								
93	7,4								

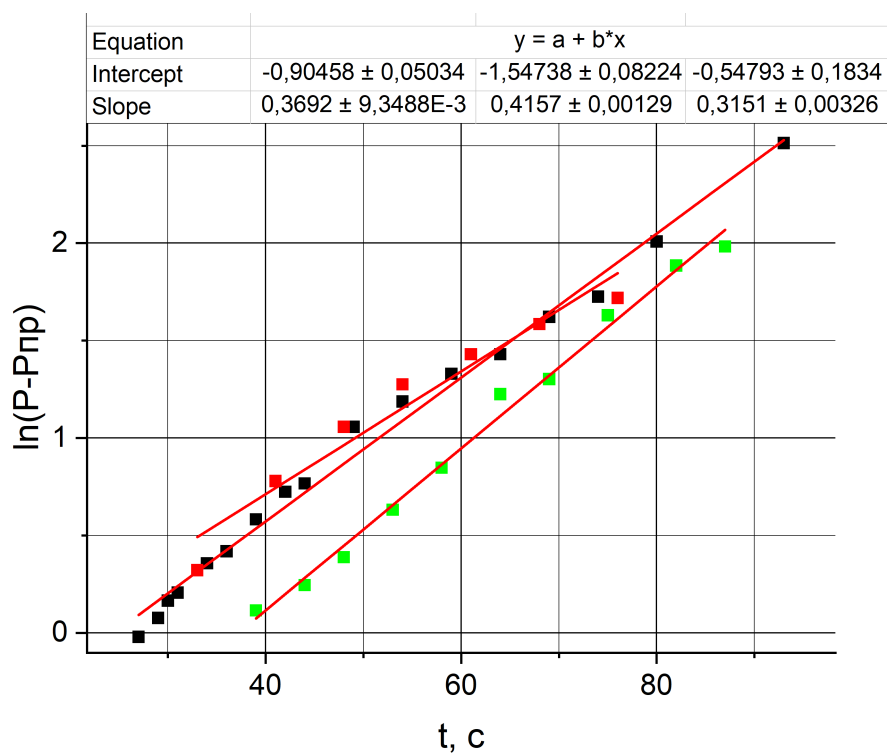


Рис. 7: Зависимость давления от времени при ухудшении вакуума

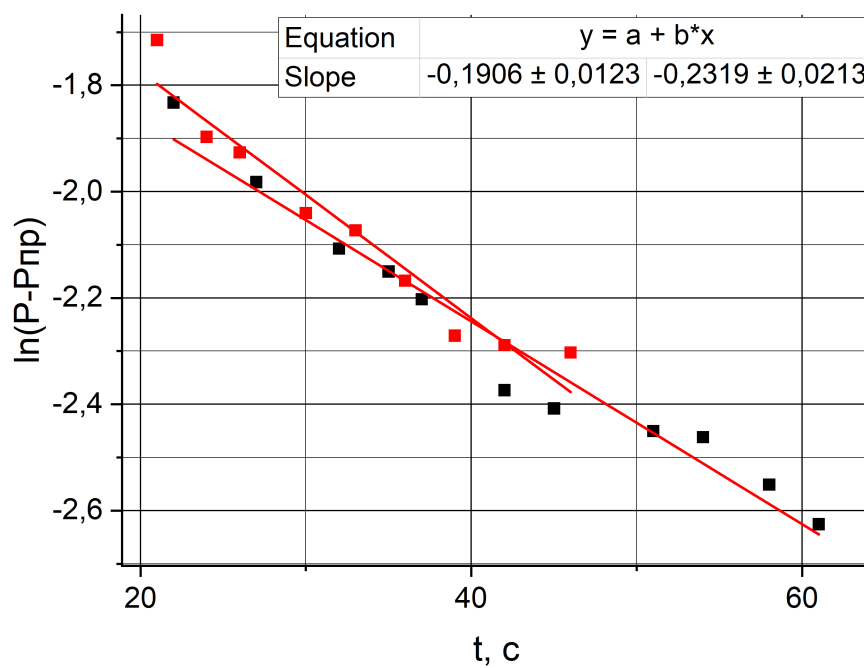


Рис. 8: Зависимость давления от времени при улучшении вакуума