

Лабораторная работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

И. Артёмов, Д. Лежнев

27 марта 2023 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.

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

2. 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 ($K_1, K_2, \dots K_6$) (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного 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. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников после чего стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом.

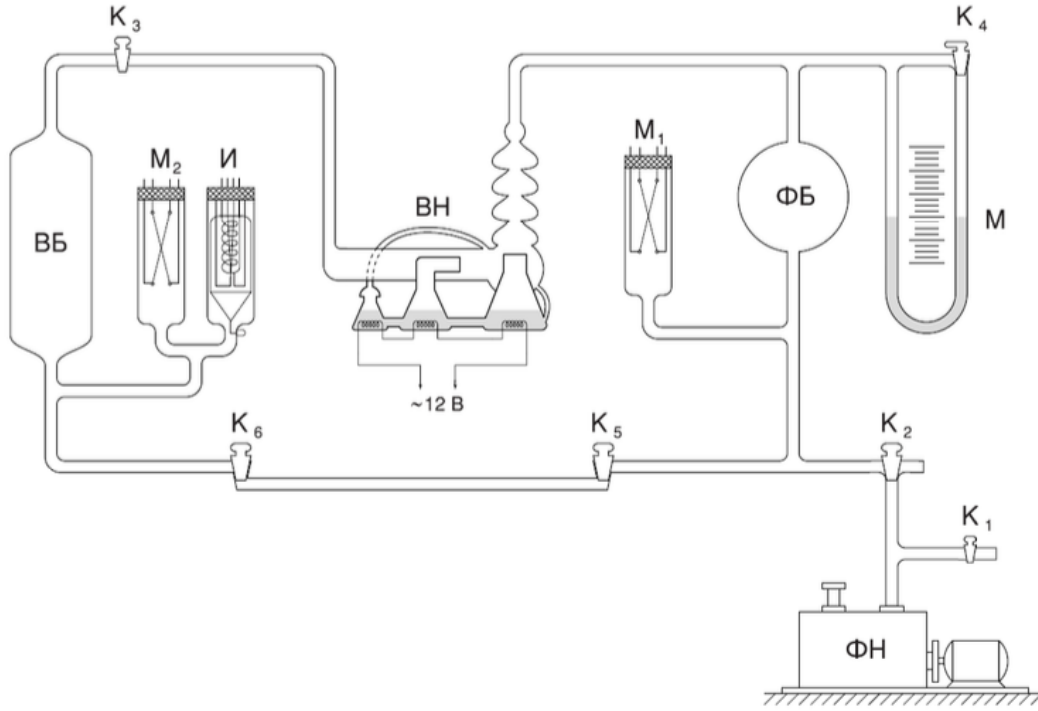


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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:

$$-VdP = \left(PW - \sum Q_i \right) dt \quad (1)$$

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

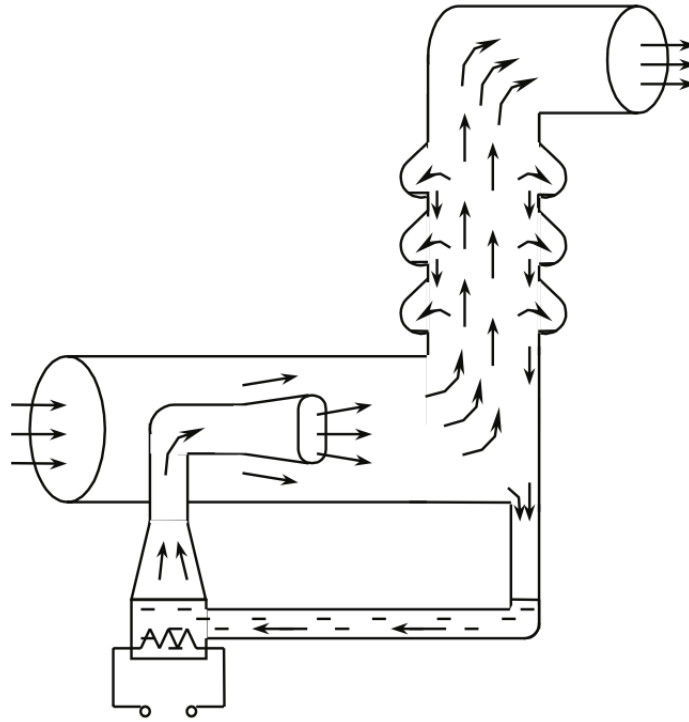
$$W = \left(\sum Q_i \right) / P_{\text{пр}} \quad (2)$$

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.

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



1

Рис. 2. Схема работы высоковакуумного насоса

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:

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

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:

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

4. Ход работы

1. 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. Будем продолжать процесс откачки, пока давление не будет порядка 10^{-2} торр.
4. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объём, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части (между кранами K_6 и K_5), откроем на всю форвакуумную часть.

Запишем при этом показания масляного манометра - высоту масла в обоих коленях:

$$h_1 = (39.6 \pm 0.1) \text{ см} ; \quad h_2 = (13.2 \pm 0.1) \text{ см} ; \quad \Delta h = h_1 - h_2 = (26.4 \pm 0.1) \text{ см}$$

Зная объём "запертой" части установки $V = 50 \text{ см}^3$ и его начальное ($P_1 = P_{atm} = 747.6 \text{ торр} = 99.678 \text{ кПа}$) и конечное ($P_2 = \rho g \Delta h = (2292 \pm 9) \text{ Па}$) давление, определим объём форвакуумной части установки из закона Бойля-Мариотта:

$$V_{fv} = \frac{P_1 V}{P_2} \approx (2.174 \pm 0.009) \text{ л}$$

5. Откроем теперь кран, разделявший высоковакуумную и форвакуумную части установки. Показания масляного манометра:

$$h_3 = (35.3 \pm 0.1) \text{ см} ; \quad h_4 = (18.8 \pm 0.1) \text{ см} ; \quad \Delta h' = h_3 - h_4 = (16.5 \pm 0.1) \text{ см}$$

Суммарный объём высоковакуумной и форвакуумной частей:

$$V_{fv} + V_{vv} = \frac{P_1 V}{\rho g \Delta h'} = (3.4791 \pm 0.0002) \text{ л}$$

$$V_{vv} = (1.305 \pm 0.009) \text{ л}$$

Плотность масла была указана на установке:

$$\rho = 0.885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

6. Не выключая форвакуумного насоса, убедимся в том, что в установке не осталось запертых объёмов.
7. Откачаем установку до давления $\sim 10^{-2}$ торр и приступим к откачке высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса.

Будем наблюдать за процессом при помощи термопарного манометра. Необходимо продолжать процесс откачки, пока давление не составит $\sim 10^{-4}$ торр. При приближении давления к этой величине масло в диффузионном насосе закипит, поэтому посчитаем количество капель, стекающих из сопла второй ступени диффузионного насоса:

$$N \sim 10 \text{ капель}$$

8. Включим ионизационный манометр. С его помощью измерим предельное давление в системе:

$$P_{пр} = (6.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр}$$

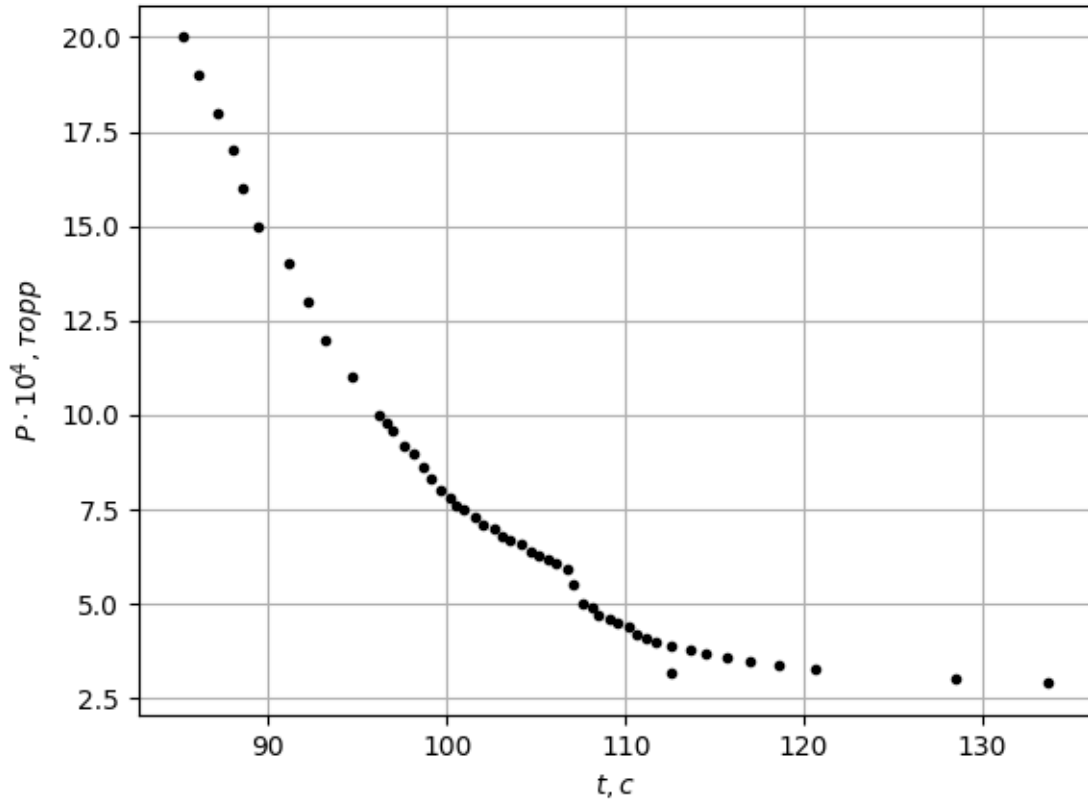


Рис. 3. График улучшения вакуума.

9. 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 определения скорости W откачки воспользуемся формулой (3). Из неё видно, что зависимость $\ln(P - P)(t)$ линейна, а её коэффициент наклона $k = -W/V_{vv}$, поэтому:

$$W = -kV_{vv}$$

Линеаризацию проведём для всего графика улучшения, для низких давлений и для высоких давлений. Получим:

$$k_1 = -(0.052 \pm 0.002) \frac{1}{c} ; k_2 = (-0.0606 \pm 0.0008) \frac{1}{c} ; k_3 = -(0.015 \pm 0.003) \frac{1}{c}$$

$$W_1 = (0.068 \pm 0.003) \frac{\text{л}}{c} ; W_2 = (0.0791 \pm 0.0012) \frac{\text{л}}{c}$$

$$W_3 = (0.020 \pm 0.004) \frac{\text{л}}{c}$$

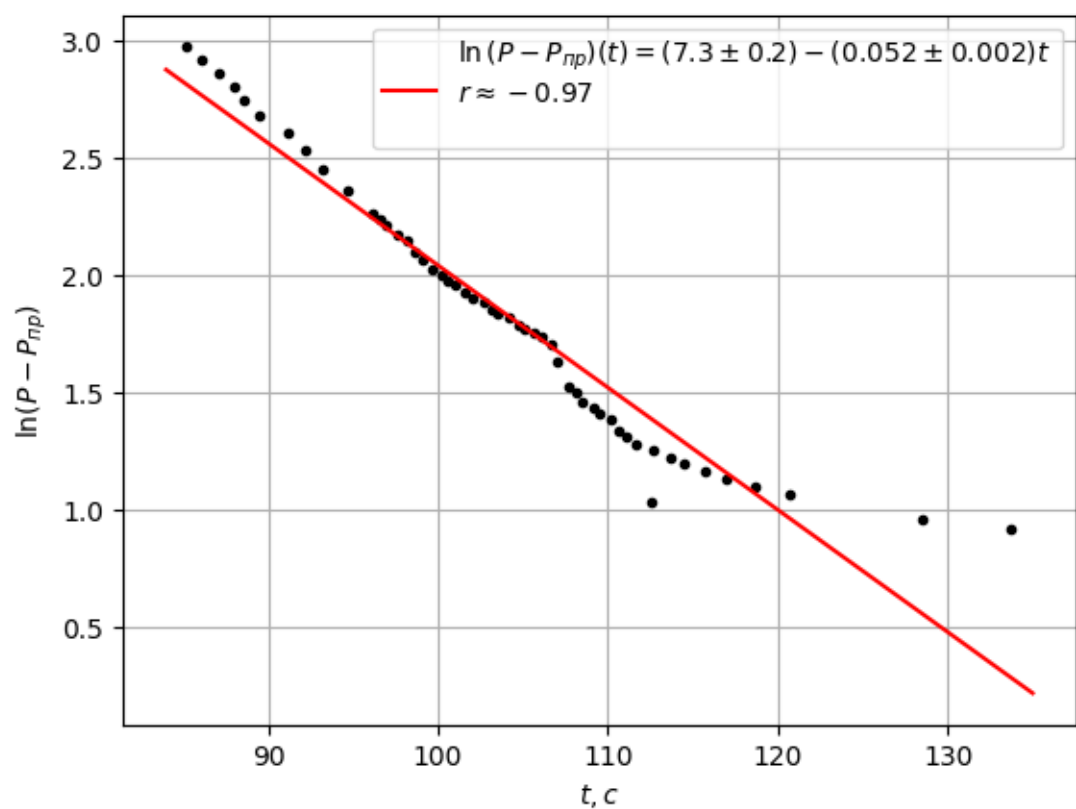


Рис. 4. Линеаризация графика улучшения вакуума.

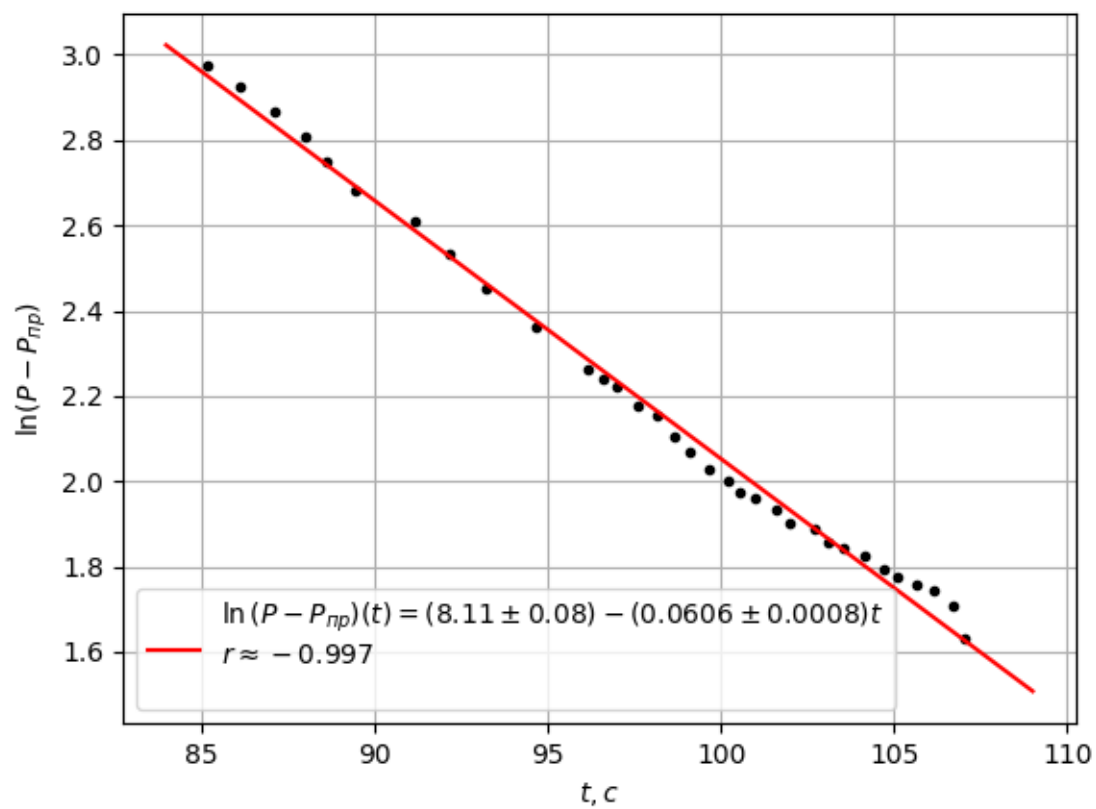


Рис. 5. Линеаризация графика улучшения вакуума (высокие давления).

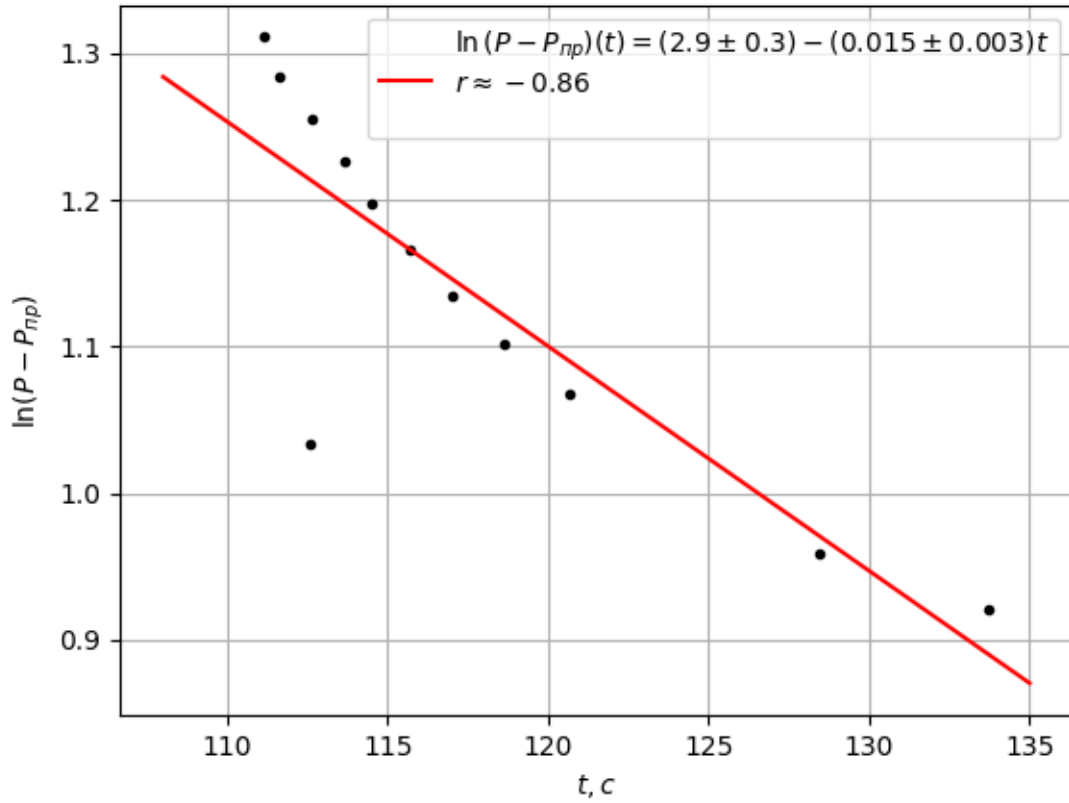


Рис. 6. Линеаризация графика улучшения вакуума (низкие давления)

Значение W_3 сильно отличается от остальных, поэтому не будем его учитывать. Тогда, усредняя, получим:

$$W = (0.0735 \pm 0.0016) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

10. Оценим величину потока газа $Q_{\text{н}}$, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Из формулы (2) и условия, что при ухудшении вакуума $dP/dt = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})/V_{vv}$, получим:

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}}W - \alpha V_{vv},$$

где $\alpha = dP/dt$ определяется из анализа зависимости $P(t)$ при ухудшении вакуума по МНК. Получим:

$$\alpha = (2.81 \pm 0.05) \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр}}{\text{с}}$$

$$Q_{\text{н}} = (1.18 \pm 0.12) \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

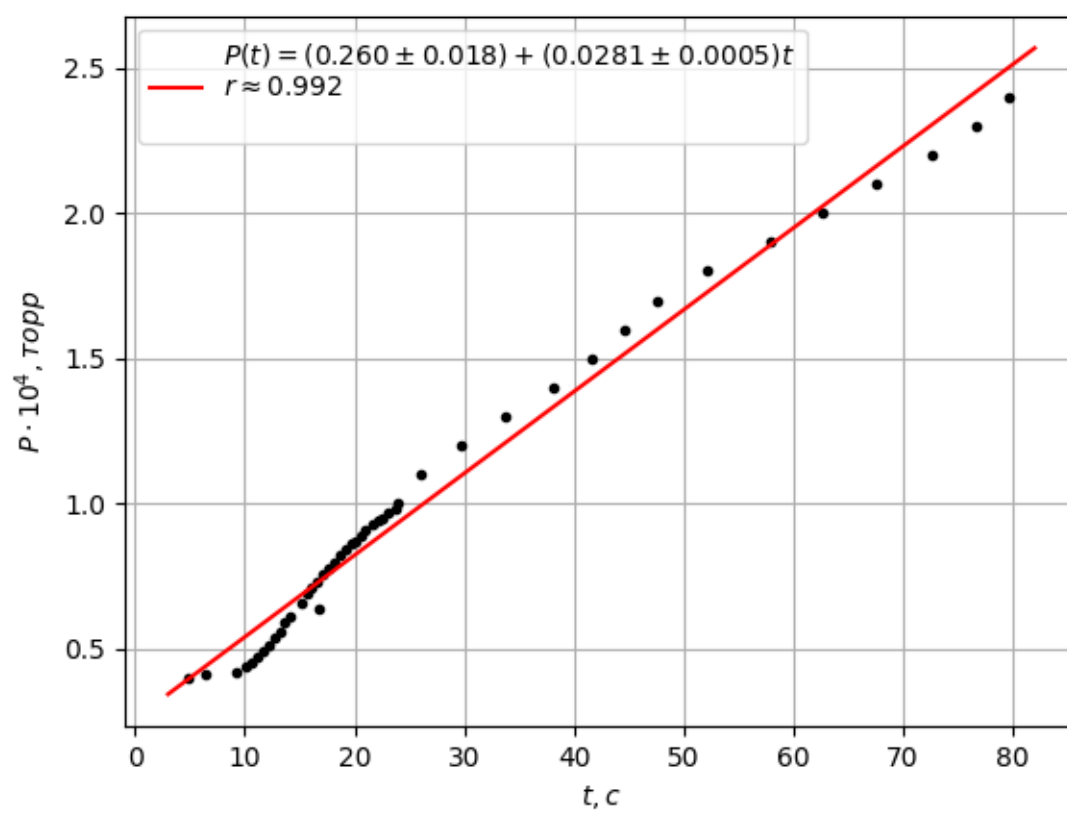


Рис. 7. График ухудшения вакуума