

## Получение и измерение вакуума

### 2.3.1

#### Цель работы:

- Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки
- Определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

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

#### Теория

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса:

- низковакуумные — до  $[10^{-2}; 10^{-3}]$  торр
- высоковакуумные —  $[10^{-4}; 10^{-7}]$  торр
- установки сверхвысокого вакуума —  $[10^{-8}; 10^{-11}]$  торр

С физической точки зрения низкий вакуум переходит в высокий, когда длина свободного пробега молекул газа оказывается сравнима с размерами установки (а течение газа становится сугубо молекулярным). Сверхвысокий вакуум характерен крайней важностью процессов адсорбции и десорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

Формула диффузии:

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{dn}{dx} S$$

$$D = \frac{\lambda \bar{v}}{3}, \lambda = 2r \Rightarrow D = 2r\bar{v}/3 \quad (\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}) \quad \frac{dn}{dx} = \frac{n_1 - n_2}{L}$$

Формула Кнудсена:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \frac{n_1 - n_2}{L}$$

Итоговая формула скорости убывания массы:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{4}{3} \boxed{r^3} \sqrt{\frac{2\pi \mu}{RT}} \frac{P_1 - P_2}{l}$$

Формула Пуазейля для сплошной среды:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{3\pi}{32} \frac{\boxed{r^4}}{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi m}{kT}} \frac{P_1 - P_2}{L}$$

Основное отличие формул для расхода газа, имеющего свойства сплошной среды, и в случае очень разреженного газа в том, что расход сплошной среды пропорционален  $r^4$ , а разреженной — только  $r^3$

На границе раздела фаз силы межмолекулярного взаимодействия не скомпенсированы из-за разной плотности вещества, и поэтому пограничный слой обладает избытком энергии. Поглощение какого-либо вещества из газообразной среды или раствора поверхностным слоем жидкости или твёрдого тела называется **адсорбцией**.

Измеряем пройденное расстояние линейкой, а время – секундомером, находим  $v_{\text{уст}}$ . Радиус шарика измеряем горизонтальным компаратором/микроскопом (для каждого шарика измеряем несколько диаметров и

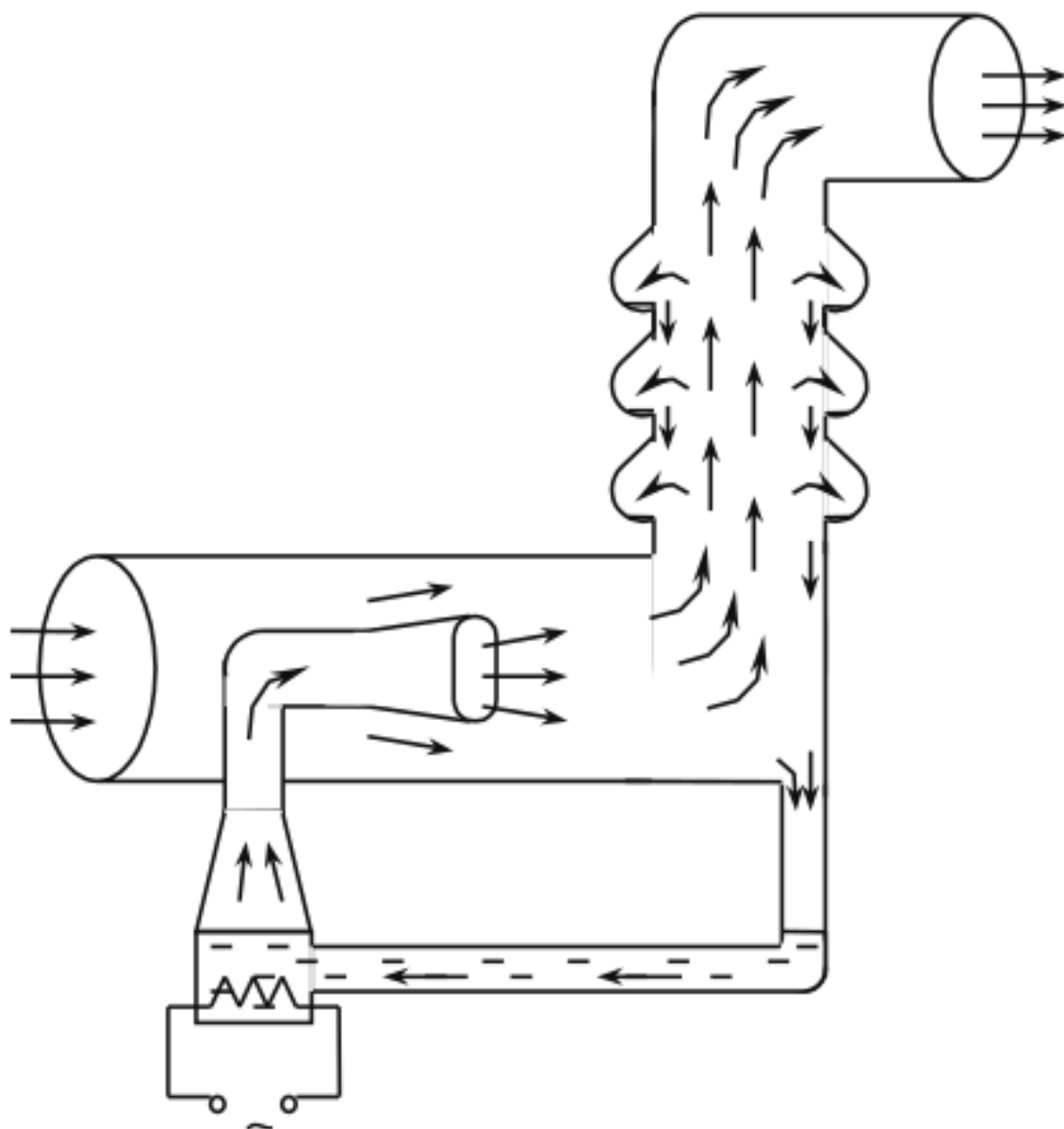


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

берём среднее). Плотность шариков и жидкости – табличные значения.

Опыты проводятся при нескольких температурах в интервале от комнатной до 320 – 330 К.

Для каждой температуры проводим измерения с разными диаметрами шариков.

Построим график в координатах  $\ln \eta (T^{-1})$ .

Если во всем диапазоне встречающихся в работе скоростей и времён релаксации вычисленные по нашей формуле значения  $\eta$  оказываются одинаковыми, то формула Стокса правильно передаёт зависимость сил от радиуса шарика. Если всё-таки наблюдается корреляция  $\eta$  и  $r$ , то нужно использовать формулу:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_{ж}}{v_{уст}} \cdot \frac{1}{1 + 2.4(r/R)}$$

где  $R$  – радиус сосуда.

## Ход работы

### Определение объёма форвакуумной и высоковакуумной частей установки

0. Проверим, что все краны в правильном положении.

1. Откроем кран, подождём несколько минут пока воздух заполнит установку

- Откачаем форвакуумным насосом воздух до давления порядка  $10^{-2}$  торр.
- Впустим воздух в форвакуумную часть установки и измерим давление.
- Отсоединим установку от форвакуумного насоса, откроем на всю форвакуумную часть в краны и капилляры.
- Зафиксируем давление. Высота масла в манометре:

$$h_1 = (38.4 \pm 0.2)\text{см}, h_2 = (11.6 \pm 0.2)\text{см} \Rightarrow \Delta h_{\text{фв}} = (26.8 \pm 0.3)\text{см}$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} \approx 0.3\text{см} \Rightarrow \varepsilon_{\Delta h} = 1 \%$$

- $V_{\text{закртой}} = 50\text{см}^3$ , используем  $\Delta P V_{\text{закртой}} = P_2 V_2$  вычислим объем форвакуумной части установки. При этом давление  $P_1 = P_{\text{атм}} = 100\text{кПа}$ , а относительная погрешность полученного значения равна относительной погрешности величины  $\Delta h_{\text{фв}}$ :

$$\Delta P = \rho_{\text{масл}} g \Delta h_{\text{фв}} = 2.33 \text{ кПа}, \quad \rho_{\text{масл}} = 885 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$V_{\text{фв}} = \frac{P_1 V_{\text{закртой}}}{P_2} - V_{\text{закртой}} = 2.1 \text{ л}$$

- Аналогично с диффузионным насосом, но нужно будет вычесть объем форвакуумной части.

$$h_3 = (33.5 \pm 0.2)\text{см}, h_4 = (16.6 \pm 0.2)\text{см} \Rightarrow \Delta h = (16.9 \pm 0.3)\text{см}.$$

Аналогично погрешности высот:

$$V_{\text{полн}} = \frac{P_1}{\rho g \Delta h_{\text{полн}}} V \approx 3.4\text{л}, \quad \varepsilon V = \varepsilon_{\Delta h} \approx 2 \%.$$

Тогда объём высоковакуумной части:

$$V_{\text{вв}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{фв}} = 1.3\text{л}, \sigma_{V_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{V_{\text{полн}}}^2 + \sigma_{V_{\text{фв}}}^2} = 0.07 \approx 0.1\text{л},$$

- Не выключая форвакуумного насоса убедимся в том, что в установке не осталось запертых объемов.
- Откачав установку до давления порядка  $10^{-2}$ , приступим к откачке ВВ с помощью диффузионного насоса.
- С помощью термодарного манометра наблюдаем за тем, как идет откачка ВВ. Мы должны продолжать процесс откачки до тех пор, пока там не установится давление порядка  $10^{-4}$  торр.
- С помощью ионизационного манометра измерим значение предельного давления в системе со стороны высоковакуумной части:

$$P_{\text{пр}} = (6.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр}.$$

- 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 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  $W = k V_{\text{вв}}$ . Построим эти графики:

- 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. Примем погрешность показаний термодарного манометра за 2% в среднем. Поскольку  $V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) dt$  получим  $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = \alpha V_{\text{вв}}$ . По графикам получаем: Используя формулу  $Q_H = P_{\text{пр}} W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$ , а значит  $\sigma_{Q_H} = \sqrt{\sigma_{P_{\text{пр}} W}^2 + \sigma^2} \approx 1.1 \cdot 10^{-6}$  получим, что:  $Q_H = (3.6 \pm 1.1) \cdot 10^{-6} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$ .

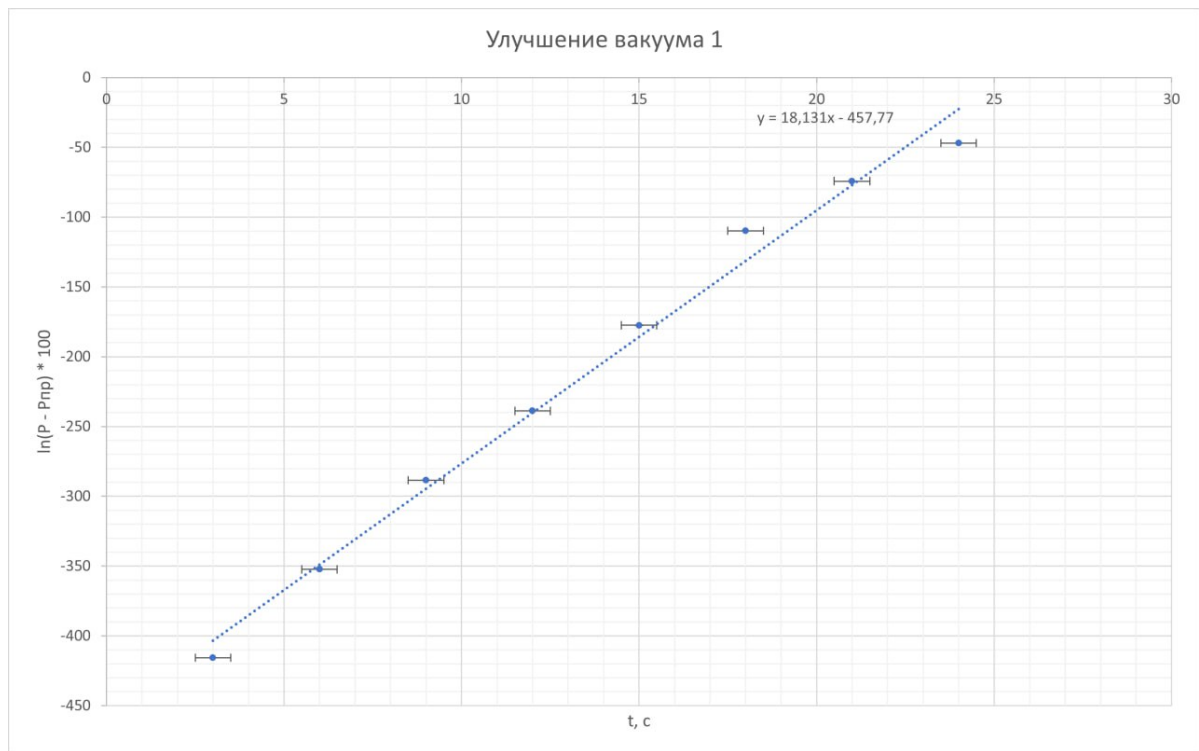


Рис. 4: Улучшение вакуума 1

$k \cdot 10^{-1}, \frac{1}{c}$	$\sigma_k \cdot 10^{-1}, \frac{1}{c}$	$W \cdot 10^{-1}, \frac{1}{c}$	$\varepsilon_W$	$\sigma_W \cdot 10^{-1}, \frac{1}{c}$
1.81	0.07	2.4	7 %	0.2
1.82	0.03	2.4	6 %	0.1

Таблица 1: Коэффициенты наклона при улучшении вакуума

$\alpha \cdot 10^{-6}, \frac{1}{c}$	$\sigma_\alpha \cdot 10^{-6}, \frac{1}{c}$	$\varepsilon_\alpha$	$\sigma_\alpha \cdot 10^{-6}, \frac{1}{c}$	$Q + Q, \frac{1}{c}$	$\sigma_{Q+Q}, \frac{1}{c}$
8.9	0.05	2.1 %	0.2	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$0.07 \cdot 10^{-5}$
8.1	0.04	2.1	0.2	$1.05 \cdot 10^{-5}$	$0.06 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2: Коэффициенты наклона при ухудшении вакуума

7. Параметры трубки:

$$L = 10.8 \text{ см}, d = 0.8 \text{ мм},$$

8. Введем в систему искусственную течь и запишем значение установившегося при этом давления и давления  $P$ :

$$P_{\text{уст}} = (9.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр.}$$

$$P = (1.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.}$$

9. Поскольку

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

то с учетом , получаем:

$$W = \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \approx 0.167 \cdot 10^{-2} \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

10. Следуя указаниям в методичке выключаем установку.

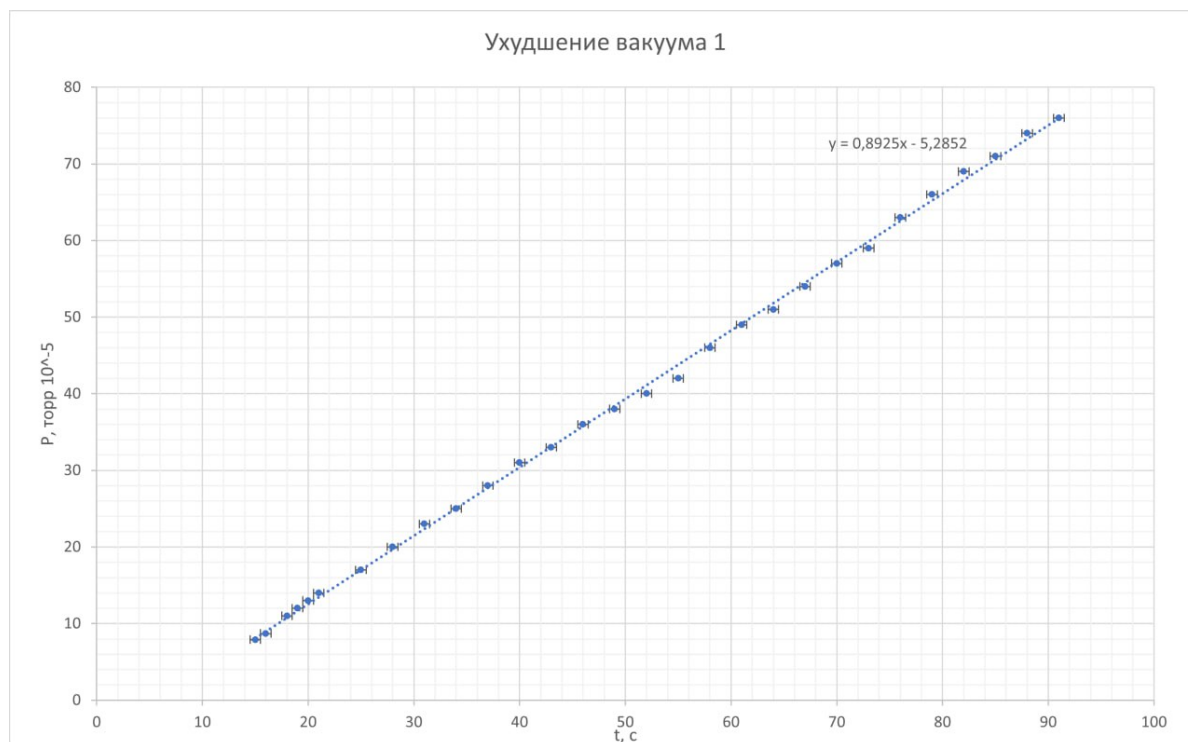


Рис. 5: Ухудшение вакуума 1

## Вывод

- о Измерили объемы форвакуумной, высоковакуумной части установки, так же как и объем всей установки.
  - о 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.
- о Оценили поток газа, поступающего из насоса в откачиваемую систему.

# Графики

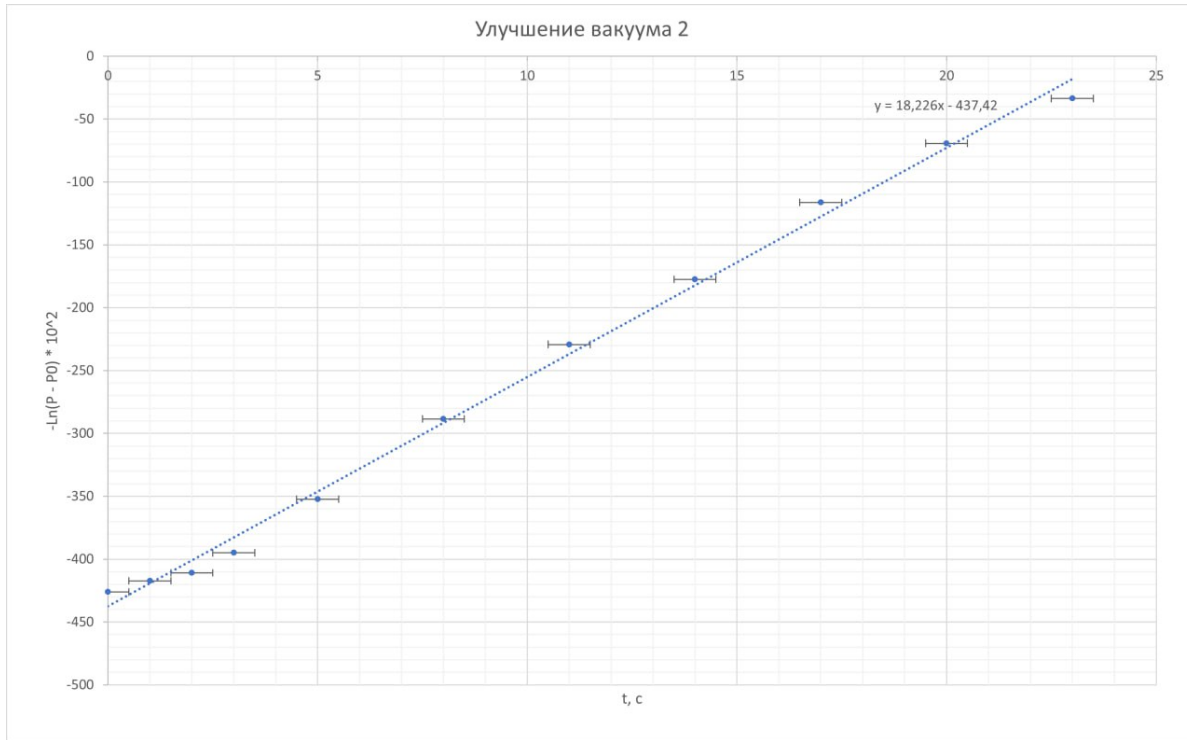


Рис. 6: Улучшение вакуума 2

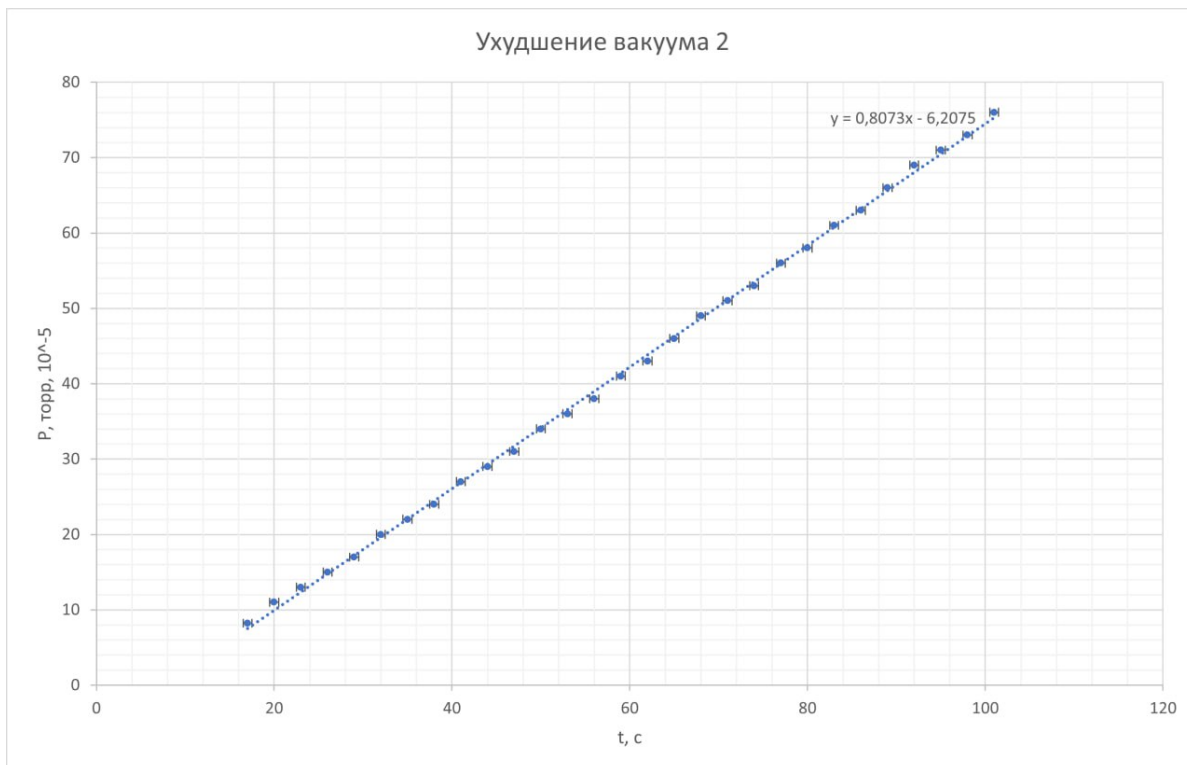


Рис. 7: Ухудшение вакуума 2