

Лабораторная работа 2.3.1  
Получение и измерение вакуума

Трунов Владимир Б01-103

16 февраля 2022 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.

В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления  $10^{-2}$  торр и диффузионным масляным насосом до давления  $10^{-5}$  торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

**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: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

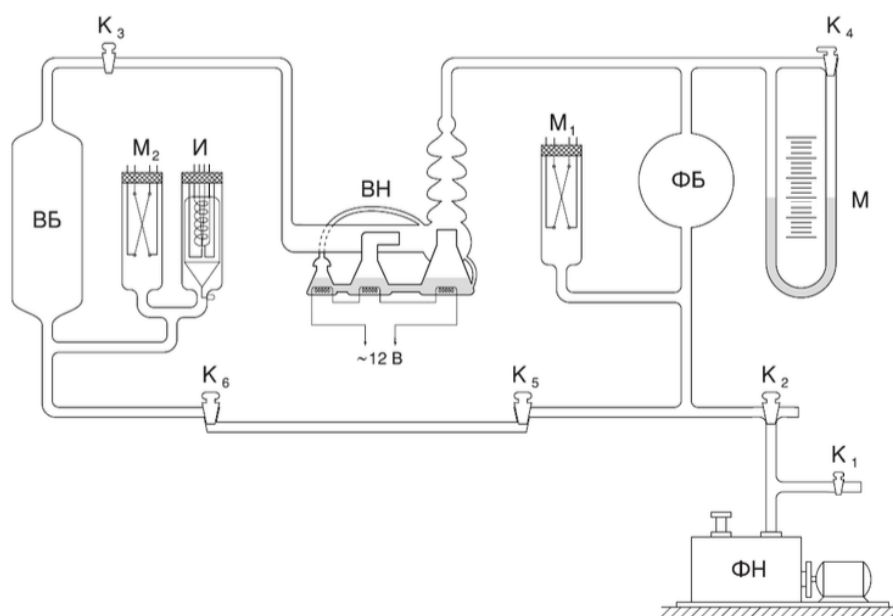


Рис. 1: Схема установки

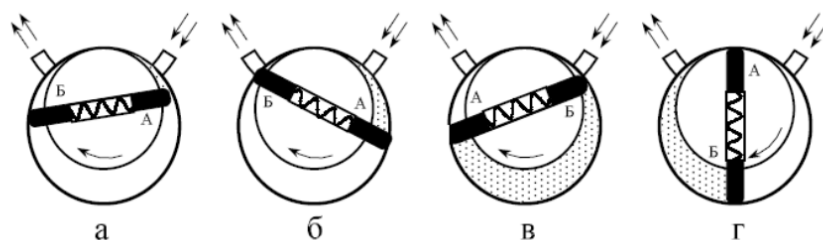


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

Кран  $K_1$  используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Во время работы установки он должен быть закрыт. Трёхходовой кран  $K_2$  служит для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран  $K_3$  отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран  $K_4$  соединяет между собой колена масляного манометра. Он должен быть открыт во все время работы установки и закрывается лишь при измерении давления в форвакуумной части. Краны  $K_5$  и  $K_6$  стоят по концам капилляра и соединяют его с форвакуумной и высоковакуумной частями установки.

Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на Рис. 3 (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 и стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом.

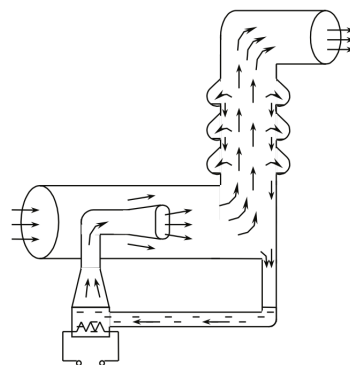


Рис. 3: Схема работы одной ступени диффузионного насоса

## 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  $Q_{\text{н}}$ , десорбция с поверхностей внутри сосуда  $Q_{\text{д}}$ , обратный ток через насос  $Q_{\text{н}}$ . Тогда, приравнявая убыль газа из сосуда (с точностью до  $RT/\mu$ ) 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  $Q_{\text{н}}$  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 давлении 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:

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

## Ход работы

**Определение объёмов 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  $10^{-2}$  мм рт. ст.. Запишем итоговое значение:

$$P_0 = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$$

4. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объём, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части, откроем на всю форвакуумную часть. Тогда давление изменится

5. Запишем показания маслянного манометра, а именно высоту масла в обоих коленах:

$$h_1 = (34.5 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, \quad h_2 = (5.7 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.},$$

$$\varepsilon_{\Delta h} = \sqrt{\varepsilon_{\Delta h1}^2 + \varepsilon_{\Delta h2}^2} \approx 2.5\%$$

$$\Delta h_{\text{фв}} = (28.8 \pm 0.7) \text{ см масл. ст.}$$

6. Зная объём "запертой" части установки  $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$  (он указан на установке) и используя соотношение  $P_1/P_2 = V_2/V_1$  вычислим объём форвакуумной части установки. При этом давление  $P_1 = P_{\text{атм}} = (101.4 \pm 0.05) \text{ кПа}$   $P_2 = \Delta h_{\text{фв}} \rho_{\text{масл}} g$ , а относительная погрешность полученного значения равна относительной погрешности величины  $\Delta h_{\text{фв}}$   $\varepsilon_V = \varepsilon_{P_1} \approx 2.5\%$  (пренебрегаем погрешностью измерения атмосферного давления  $\varepsilon_{P_{\text{атм}}} \approx 0.05\%$ ) и в результате имеем:

$$V_{\text{фв}} = (1.96 \pm 0.06) \text{ л}$$

7. Проведём те же самые измерения с диффузионным насосом и получим объём установки, из которой вычитанием объёма форвакуумной части получается объём высоковакуумной части.

$$h_1 = (29.5 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, \quad h_2 = (11.5 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.},$$

$$\Delta h_{\text{вв}} = (18 \pm 0.5) \text{ см масл. ст.},$$

Погрешности высот определяются аналогично предыдущему пункту.

$\varepsilon_V = \varepsilon_{P_2}$  (пренебрегаем погрешностью измерения атмосферного давления  $\varepsilon_{P_{\text{атм}}} \approx 0.05\%$ )

$$V = V_0 \frac{P_1}{P_2} \approx (3.04 \pm 0.10) \text{ л},$$

$$\sigma_{V_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{V_{\text{фв}}}^2 + \sigma_V^2} \approx 0.11 \text{ л},$$

В результате искомая величина равна:

$$V_{\text{вв}} = (1.08 \pm 0.11) \text{ л}.$$

### Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки.

8. Не выключая форвакуумного насоса убедимся в том, что в установке не осталось запертых объёмов.

9. Откачав установку до давления порядка  $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ , приступим к откачке ВВ с помощью диффузионного насоса.

**10.** С помощью термопарного манометра наблюдаем за тем, как идёт откачка ВБ. Мы должны продолжать процесс откачки до тех пор, пока там не установится давление порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. При приближении давления к этой величине масло в диффузионном насосе закипит, поэтому подсчитаем количество капель, стекающих из сопла второй ступени диффузионного насоса:

$$N = 16 \text{ капель.}$$

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

$$P_{\text{пр}} = (7.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$$

**12.** Найдём скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума, для этого открывая и закрывая кран  $K_3$  будем то подключать насос к объёму, то отключать его, при этом на видео зафиксируем показания манометра от времени и занесём полученные результаты в Таблицу 1 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), полученные результаты также зафиксируем в Таблице 1. Так же запишем итоговое значение для коэффициента наклона прямых, которое является средним из двух полученных, а его погрешность вычисляется по формуле  $\sigma_k = \sqrt{\sigma_{k_1}^2 + \sigma_{k_2}^2}$  или же полуразность  $k_1$  и  $k_2$ , если вдруг эти значения не будут совпадать в пределах погрешности  $k_1$  и  $k_2$ .

Таблица 1: Результаты измерений

Улучшение				Ухудшение			
$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, c$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, c$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, c$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, c$
72	0	72	0	7.6	0	8.5	0
68	1	69	1	10	7	14	7
57	2	58	2	19	14	22	14
43	3	40	3	26	21	28	21
32	4	32	4	33	28	37	28
24	5	25	5	35	35	44	35
19	6	21	6	38	42	51	42
17	7	17	7	44	49	55	49
14	8	15	8	51	56	58	56
12	9	14	9	58	63	65	63
11	10	12	10	65	70	72	70
10	11	10	11	71	77		
9.8	12	9.8	12				
9.5	13	9.5	13				
9.3	14	9.1	14				
$k_1 = -(0.298 \pm 0.002) \text{ c}^{-1}$ $k_2 = -(0.285 \pm 0.003) \text{ c}^{-1}$ $k_{cp} = -(0.291 \pm 0.006) \text{ c}^{-1}$				$k_1 = (0.812 \pm 0.005) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{c}^{-1}$ $k_2 = (0.830 \pm 0.005) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{c}^{-1}$ $k_{cp} = (0.821 \pm 0.07) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{c}^{-1}$			

Сначала проведём вычисления для коэффициента  $k$ , полученного при улучшении вакуума (для этого мы строили графики зависимости  $\ln(P - P_{np})$  от  $t$ ). Поскольку  $W = -kV_{vv}$ , то  $\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{vv}}^2} \approx 4\%$ , в результате имеем:

$$W = (0.31 \pm 0.01) \text{ л/с.}$$

**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  $V_{vv}dP = (Q_d + Q_H)dt$  получим  $(Q_d + Q_H) = kV_{vv} = (0.88 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$  (Погрешность рассчитывается по формуле  $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{vv}}^2} \approx 10\%$ ).

Используя формулу  $Q_H = P_{np}W - (Q_d + Q_H)$ , а значит  $\varepsilon_{Q_H} = \sqrt{\varepsilon_{P_{np}W}^2 + \varepsilon^2} \approx 11\%$  получим, что:

$$Q_H = (1.45 \pm 0.16) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с.}$$



Рис. 4: Улучшение вакуума 1

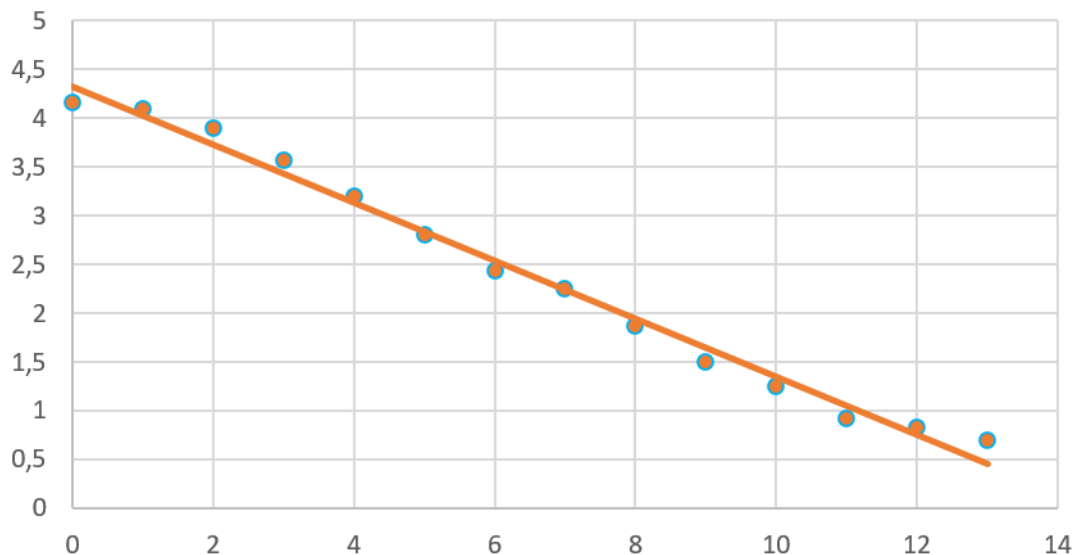
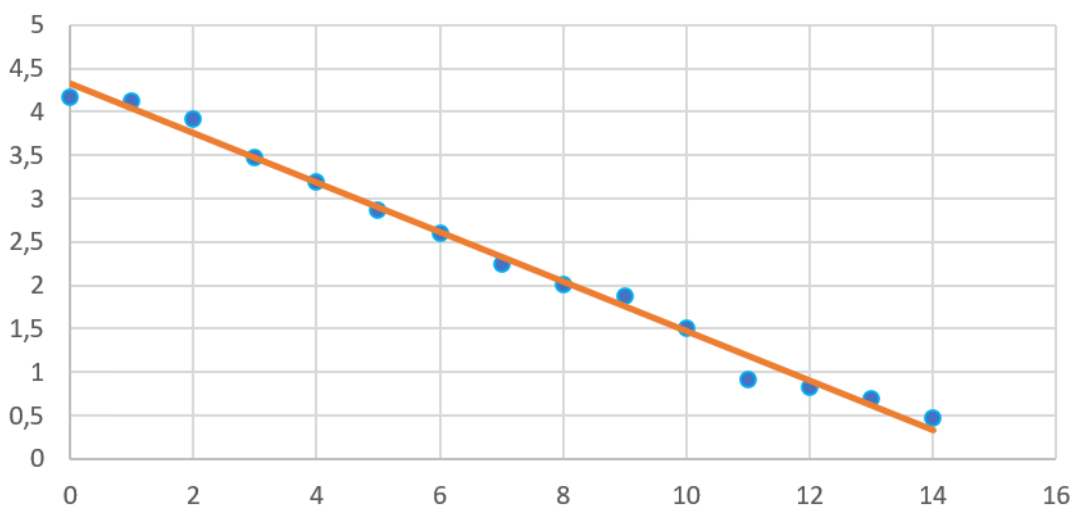


Рис. 5: Улучшение вакуума 2



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

$$L = (10 \pm 1) \text{ см}; \quad d = (0.8 \pm 0.1) \text{ мм.}$$

$$C_{\text{тр}} = (1.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-8} \text{ торр} \cdot \text{л/с.}$$

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

Рис. 6: Ухудшение вакуума 1

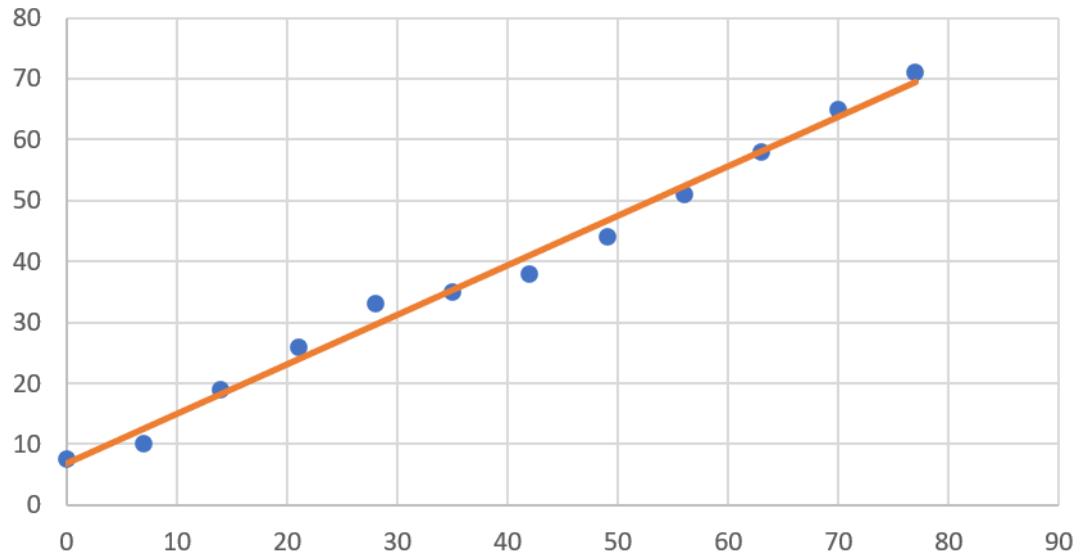
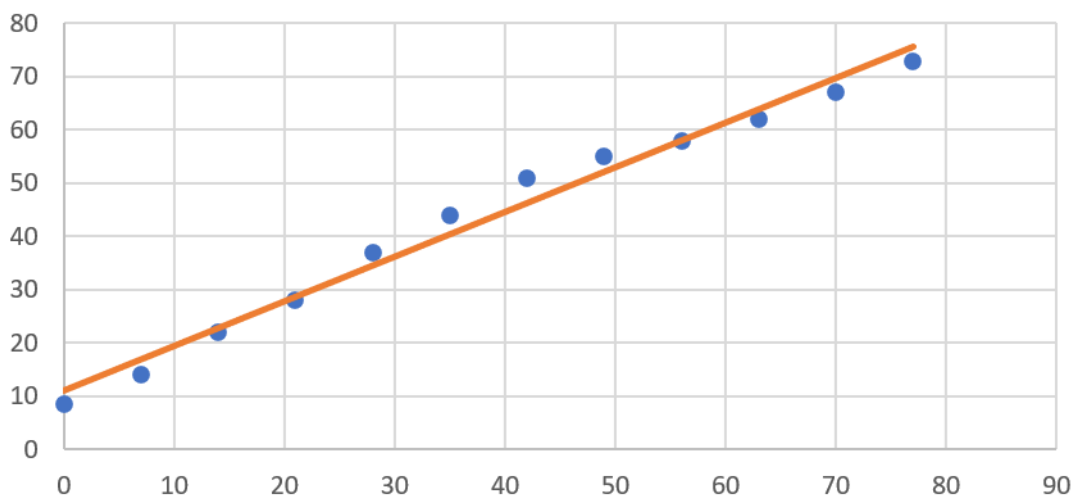


Рис. 7: Ухудшение вакуума 2



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

$$P_{\text{уст}} = (1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.}$$

$$P_{\text{фв}} = (2.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ торр.}$$

**16.** Поскольку

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

то

$$W = \frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt} \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = (0.20 \pm 0.05) \text{ см}^3 \cdot \text{с};$$

(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 20%)

**17.** Следуя указаниям в методичке выключаем установку.

## Вывод

В ходе данной работы было проверено несколько методик по измерению производительности высоковакуумного насоса. Удалось проверить законы, в соответствии с которыми вакуум в установке ухудшается и улучшается, в хорошем результате помогают убедиться графики, на которых прослеживается достаточно чёткая линейная зависимость (для улучшения вакуума – линейная зависимость  $\ln(P - P_{\text{пр}})$  от  $t$ , а для ухудшения –  $P(t)$ ).