

# Работа 2.3.1

## Поучение и измерение вакуума

Гаврилин Илья Дмитриевич  
Б01-101

22 марта 2022 г.

### 1 Аннотация

В ходе этой работы происходит обучение работы с форвакуумным и диффузионным насосом, для получения вакуума различной глубины. Находится максимальная глубина вакуума, достижимая на конкретной установке, измеряются объемы форвакуумного и высоковакуумного баллона. Изучается процесс создания искусственной течи между частями установки, определяется скорость откачки системы в стационарном режиме, а также ухудшение и улучшение вакуума.

### 2 Теоретические сведения

#### 2.1 Схема работы экспериментальной установки

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

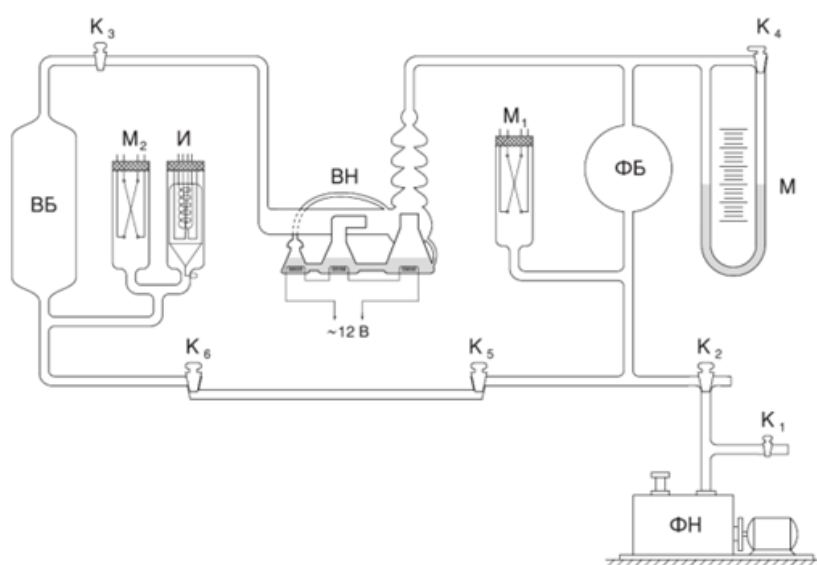


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Следует учитывать что некоторые части установки, такие как диффузионный насос и ионизационный манометр имеют ограничения по рабочему давлению, следует проверять по термодинамическим манометрам допустимые границы включения оборудования, написанные в характеристиках каждой установки. (В среднем  $10^{-2} - 10^{-4}$  мм.рт.ст.)

## 2.2 Откачка воздуха

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  $RT/\mu$ ) 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  $Q_{\text{и}}$  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.

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

## 2.3 Течение газа по трубкам

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 существеннее 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:

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

## 3 Ход работы

### 3.1 Измерение параметров установки

Проверим правильность расположения кранов на установке, запишем важные параметры, связанные с установкой.

$$\rho_{\text{масла}} = 0.885 \text{ г/см}^3, V_{\text{зап}} = 50 \text{ см}^3, d_{\text{кап}} = 0.8 \text{ мм.}$$

Также, стоит замерить атмосферное давление:  $P_{\text{атм}} = 99.7$  кПа

### 3.2 Замер объемов баллонов

Откачаем из установки воздух, предварительно создав "запертый" объем. Запишем значение давления, полученное по термодинамическому манометру:  $P_{\text{ост}} = (2.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-2}$  мм. рт. ст.

$$h_1 = (13.4 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, \quad h_2 = (39.3 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.},$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{\Delta h1}^2 + \sigma_{\Delta h2}^2} \approx 0.2 \text{ см. масл. ст.} \quad \Delta h_{\text{фв}} = (25.9 \pm 0.2) \text{ см масл. ст.}$$

Зная объём "запертой" части установки  $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$  и используя соотношение  $P_1/P_2 = V_2/V_1$  (считаем температуру постоянной) вычислим объём форвакуумной части установки. При этом давление  $P_1 = P_{\text{атм}} = (99.7 \pm 0.05) \text{ кПа}$   $P_2 = \Delta h_{\text{фв}} \rho_{\text{масл}} g + P_{\text{ост}}$ , а относительная погрешность полученного значения равна относительной погрешности величины  $\Delta h_{\text{фв}}$ :

$$V_{\text{фв}} = (2214 \pm 17) \text{ см}^3$$

Проведем аналогичные замеры только для случая, когда к системе добавляется высоковакуумный баллон.

$$h_3 = (18.4 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, \quad h_4 = (35.2 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.},$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{\Delta h1}^2 + \sigma_{\Delta h2}^2} \approx 0.15 \text{ см. масл. ст.} \quad \Delta h_{\text{фв}} = (16.80 \pm 0.15) \text{ см масл. ст.}$$

При расчете давления по формуле использованной в первом случае, учтем, что:  $V_{\text{вв}} = V_2 - V_{\text{фв}}$

$$V_{\text{вв}} = (1199 \pm 10) \text{ см}^3$$

### 3.3 Получение высокого вакуума, измерение скорости откачки

При достаточно низком давлении запустим диффузионный насос, ионизационный манометр (проведем процедуры по накалу и дегазации). Подождя 10-15 минут, замерим предельное возможное для конкретной установки давление:  $P_{\text{пр}} = 4.1 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст.

Создадим искусственную течь, соединив капилляром форвакуумную и высоковакуумную часть установки, при этом у нас получится установившееся давление, когда скорость откачки насоса уравновесит поток из искусственной течи:  $P_{\text{уст}} = 1.1 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.

Открыв капилляр замерим ухудшение вакуума, после закрытия капилляра измерим улучшение вакуума, представим данные в виде таблицы и графика (табл. 1, 2).

t, сек	P, $\cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.	t, сек	P, $\cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.
0	3.9	55	31.0
5	4.8	60	34.0
10	5.0	65	37.0
15	5.5	70	40.0
20	8.6	75	43.0
25	12.0	80	46.0
30	16.0	85	49.0
35	19.0	90	52.0
40	22.0	95	55.0
45	25.0	100	57.0
50	28.0	105	60.0

Таблица 1: ухудшение вакуума при образовании течи

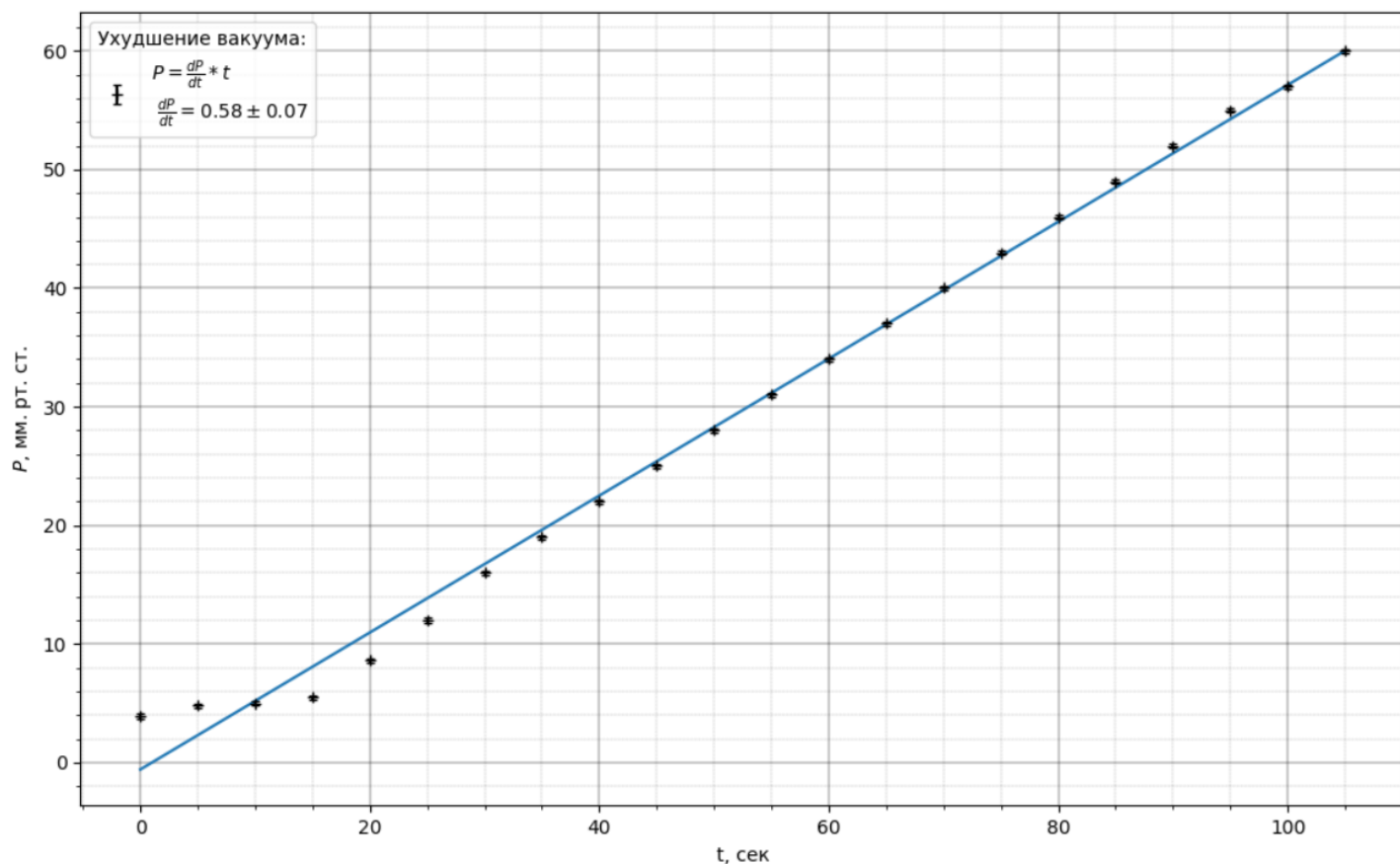
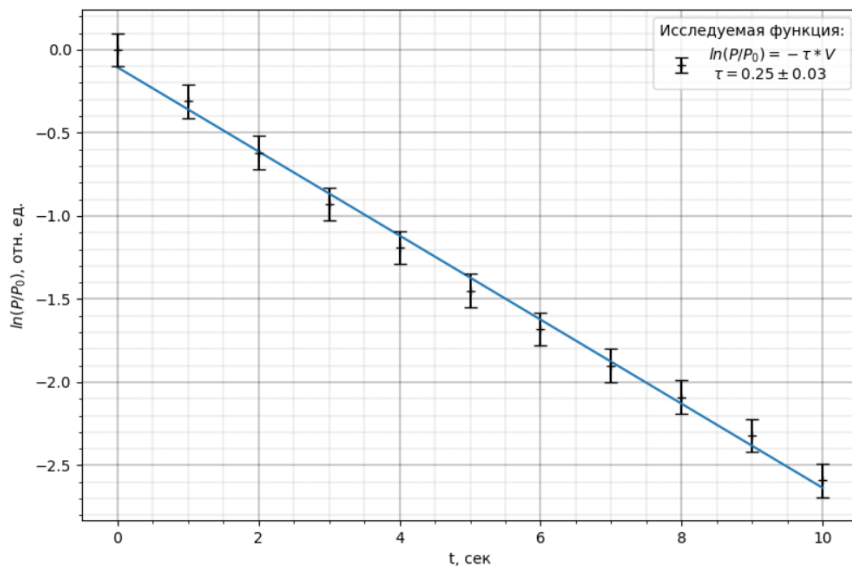


Рис. 2: зависимость давления от времени при ухудшении вакуума

t, сек	P, $\cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.	$\ln(P/P_0)$
0	56	0.00
1	41	-0.31
2	30	-0.62
3	22	-0.93
4	17	-1.19
5	13.2	-1.45
6	10.4	-1.68
7	8.4	-1.90
8	6.9	-2.09
9	5.5	-2.32
10	4.2	-2.59



(а) Таблица 2: улучшение вакуума при устранении течи

(б) Рис: зависимость логарифма частного давлений от времени

Рис. 3: Улучшение вакуума

На рис. 2 можем заметить, что первые 6-7 точек плохо ложатся на интерполяционную кривую, вероятнее всего это связано с процессом изменения конфигурации крапов и не ламинарным течением газа в капиллярах.

### 3.4 Расчет производительности насоса и пропускной способности капилляра

Сначала проведём вычисления для коэффициента  $\tau$ , полученного при улучшении вакуума (для этого мы строили графики зависимости  $\ln(P/P_0)$  от  $t$ ). Поскольку  $W = -\tau V_{\text{вв}}$ , то  $\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{\text{вв}}}^2} \approx 4\%$ , в результате имеем:

$$W = (0.299 \pm 0.011) \text{ л/с.}$$

Оценим величину потока газа  $Q_{\text{н}}$ . Для этого воспользуемся данными, полученными при ухудшении вакуума. А именно построим графики зависимости  $P(t)$  и определим для них коэффициенты угла наклона прямой. Поскольку  $V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) dt$  получим  $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = \frac{dP}{dt} V_{\text{вв}} = (0.69 \pm 0.04) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$  (Погрешность рассчитывается по формуле  $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{\text{вв}}}^2} \approx 6\%$ ). Используя формулу  $Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}} W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$ , а значит  $\varepsilon_{Q_{\text{н}}} = \sqrt{\varepsilon_{P_{\text{пр}} W}^2 + \varepsilon^2} \approx 9\%$  получим, что:

$$Q_{\text{н}} = (0.54 \pm 0.05) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с.}$$

**Оценим пропускную способность трубки по ф-ле (6):**

$$L = (10.8 \pm 0.1) \text{ см}; \quad d = (0.8 \pm 0.1) \text{ мм.}$$

$$C_{\text{тр}} = (5.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{ л/с.}$$

Погрешность  $C_{\text{тр}}$  оценена как корень из суммы квадратов погрешностей длины и диаметра (которые явным образом не указаны на установке, поэтому считаем что замер длины проведен линейкой, а замер диаметра штангенциркулем, погрешность может оказаться завышенной).

**При установлении течи мы замерили установившееся давление в двух баллонах:**

$$P_{\text{уст}} = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.}; P_{\text{фв}} = (3.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ торр.}$$

**С помощью полученных данных можем посчитать  $W$  другим способом:**

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

то

$$W = C_{\text{тр}} \cdot \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = 0.28 \pm 0.05 \text{ л/с};$$

(Поскольку давления измерены 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%)

## 4 Вывод

В ходе работы была изучена работа установки по получению среднего и высокого вакуума. Приобретены навыки работы с вакуумными установками. Проведена работа по имитации течи из высоковакуумного баллона, за счет этого измерена производительность насоса двумя методами:

- 1) Уравновешивание поступающего и откачиваемого из баллона воздуха.  $W = 0.28 \pm 0.05 \text{ л/с}$
- 2) Расчет по ухудшению и улучшению вакуума.  $W = 0.299 \pm 0.011 \text{ л/с}$

В ходе опыта доказана справедливость обоих методов подсчета.