

# Отчет о выполнении лабораторной работы 2.3.1

## Получение и измерение вакуума

Матренин Василий, Б01-006

31 марта 2021 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, термопарным и ионизационным.

## 1 Теоретическая часть

### 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.

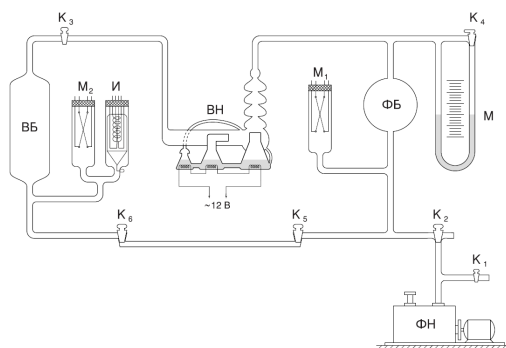


Рис. 1: Схема установки

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.

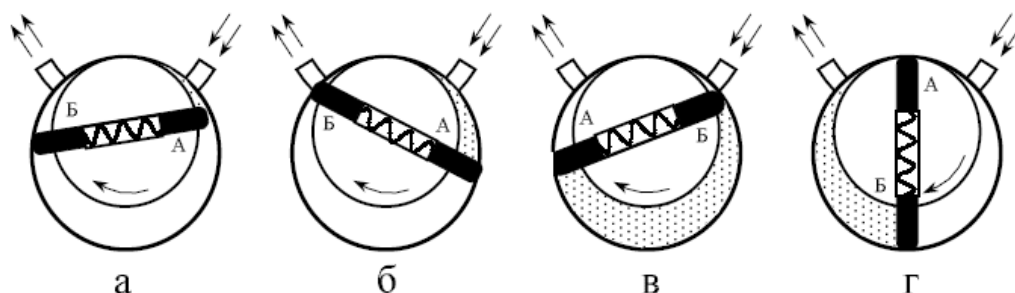


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

Устройство и принцип действия *диффузионного насоса* схематически изображены на рис 3. Такой насос работает в тысячи раз быстрее форвакуумного. Его действие основано на диффузии. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются 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.

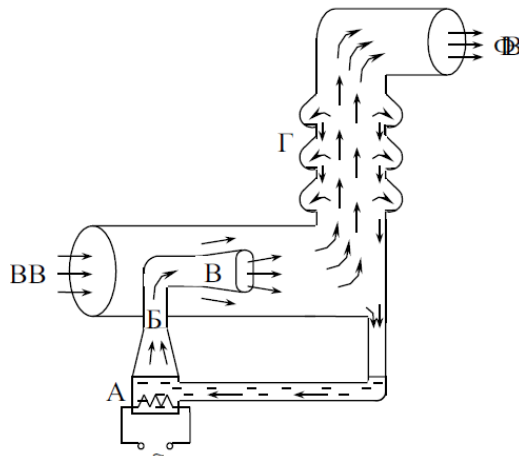


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

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.

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. 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.

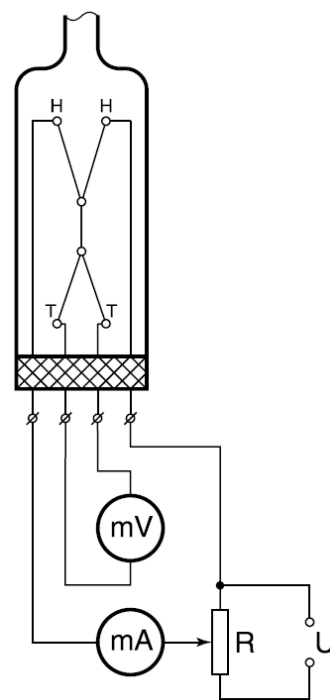


Рис. 4: Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

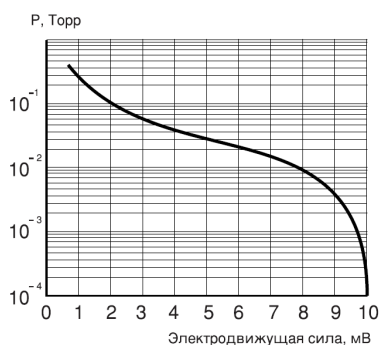


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

**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.

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

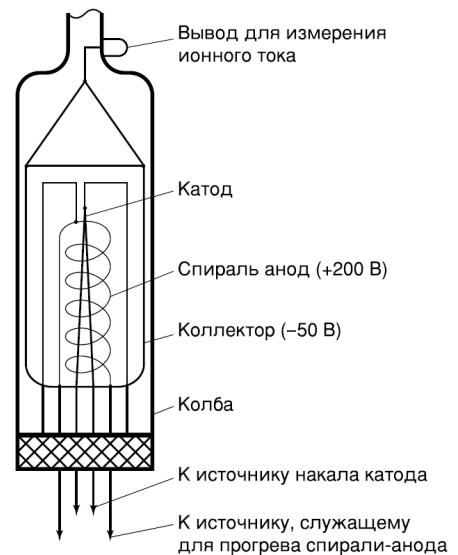


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛТ-2

## 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  $Q_{\text{д}}$  и  $Q_{\text{н}}$  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 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:

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

Если труба соединяет насос установку, то давлением  $P_1$  у насоса можно пренебречь. Давление в сосуде  $P = P_2$ . Тогда имеем:

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

Для пропускной способности отверстий имеется формула

$$C_{\text{отв}} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (7)$$

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

## 2 Ход работы

### Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверил, что  $K_4$  открыт, впустил в установку атмосферный воздух через краны  $K_1$  и  $K_2$ . «Запер» в капилляре атмосферный воздух кранами  $K_5$  и  $K_6$ . Объем капилляра в используемой установке -  $V_k = 50 \text{ см}^3$ .
2. Закрыл  $K_1$  и  $K_2$ , включил форвакуумный насос и дал ему откачать себя. Подключил установку к насосу краном  $K_2$ . Откачал установку до  $10^{-2}$  торр. Отсоединил установку краном  $K_2$ , и оставил насос работать «на себя». Перекрыл  $K_3$ , отделяя высоковакуумную часть установки. Закрыл  $K_4$ , чтобы привести в готовность масляный манометр.
3. Открыл  $K_5$ , чтобы «запертый» ранее воздух заполнил форвакуумную часть установки, снял давление с помощью вакуумного манометра, измерив разность высот столбиков масла:

$$\Delta h = (29.0 \pm 0.1) \text{ см}$$

4. Из того, что плотность масла в манометре равна  $885 \text{ г/л}$ , и считая, что установившееся давление много больше форвакуумного, получил:

$$P = (2518 \pm 18) \text{ Па}$$

Из уравнения состояния (изотерма) :

$$V_{\text{ФВ}} = (1950 \pm 15) \text{ см}^3$$

5. Открыв кран  $K_3$ , получил значение разности высот на манометре (аналогично) :

$$\Delta h = (18.7 \pm 0.1) \text{ см}$$

Получил объем высоковакуумной части установки (погрешности сложились):

$$V_{\text{ВВ}} = (1100 \pm 30) \text{ см}^3$$

6. Открыл кран  $K_4$ .

## Получение высокого вакуума

1. Откачал установку ФВ насосом.
2. Включил термopарные манометры, установил их токи согласно паспортам. Переключил прибор в режим измерения ЭДС и определил давление в установке по градуировочной кривой (рис. 5)
3. По достижении форвакуума закрываем  $K_6$  и начинаем откачку высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса
4. Включив ионизационную лампу, производим обезгаживание и записываем минимальное установившееся давление:

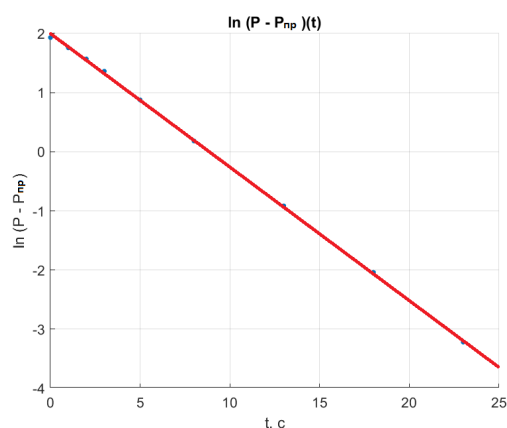
$$P_{\text{пр}} = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$$

## Измерение скорости по ухудшению и улучшению вакуума

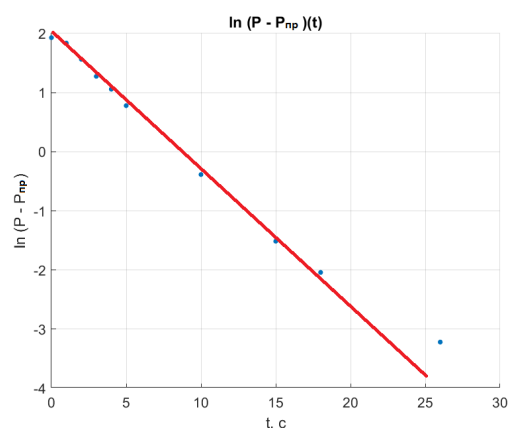
1. Закрываем кран  $K_3$ , отключая тем самым откачку вакуума и записываем на видео изменения показаний микроамперметра, пока вакуум не ухудшится до  $7,6 \cdot 10^{-4}$  торр. Затем открываем  $K_3$  и так же записываем улучшение вакуума. Приводим результаты повторных измерений в таблице 1 и на графиках (рис. 7 и 8).

Улучшение, 1		Улучшение, 2		Ухудшение, 1		Ухудшение, 2		Ухудшение, 3	
t, с	p, торр $\cdot 10^{-4}$	t, с	p, торр $\cdot 10^{-4}$	t, с	p, торр $\cdot 10^{-4}$	t, с	p, торр $\cdot 10^{-4}$	t, с	p, торр $\cdot 10^{-4}$
0	7.60	0	7.60	0	0.65	0	0.71	0	0.76
1	6.50	1	7.00	5	0.76	5	0.72	5	1.20
2	5.50	2	5.50	10	1.20	10	1.10	10	1.70
3	4.60	3	4.30	16	1.70	15	1.60	15	2.20
5	3.10	4	3.60	25	2.50	21	2.20	20	2.70
8	1.90	5	2.90	35	3.30	31	3.10	29	3.60
13	1.10	10	1.40	45	4.10	41	4.00	39	4.50
18	0.83	15	0.94	55	5.00	51	4.90	49	5.50
23	0.74	18	0.85	75	6.70	66	6.30	59	6.40
37	0.70	26	0.76	84	7.50	79	7.50	71	7.50

Таблица 1: Зависимости давления от времени

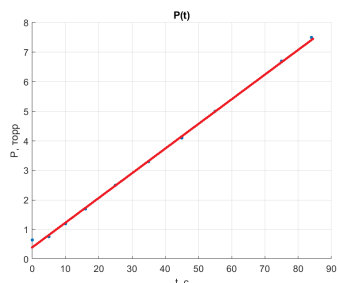


(а) Измерение 1

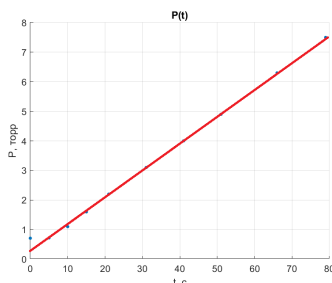


(б) Измерение 2

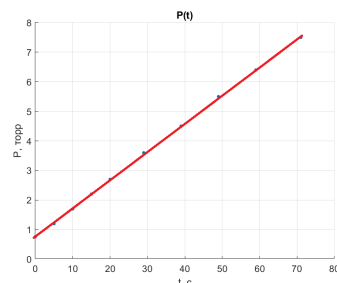
Рис. 7: Зависимость давления от времени по улучшении вакуума



(а) Измерение 1



(б) Измерение 2



(с) Измерение 3

Рис. 8: Зависимость давления от времени по ухудшению вакуума

2. Рассчитав коэффициенты наклона графиков 7(а) и 7(б) и зная объем высоковакуумной части установки, получим скорость откачки  $W$  диффузионного



насоса, сравнив графики с зависимостью (4). Считаем

$$W = -\bar{a} \cdot V, \quad \varepsilon_W^2 = \varepsilon_{\bar{a}}^2 + \varepsilon_V^2,$$

где  $\bar{a}$  — среднее коэффициентов наклона из зависимостей 7(а) и 7(б). Имеем:

$$W = (0,261 \pm 0,02) \text{ л/с}$$

3. Имея в виду соотношения (1) для случая ухудшения вакуума (без откачки), оценим  $Q_{\text{н}}$  с помощью полученных зависимостей 8(а, б, в). Считаем

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

где  $\bar{a}$  — среднее коэффициентов наклона из зависимостей 8(а), 8(б), 8(в). Имеем:

$$Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} = (1,21 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

$Q_{\text{д}}$  обычно порядка  $10^{-8}$ , поэтому можно считать  $Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} \approx Q_{\text{н}}$ . Таким образом,

$$Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} \approx 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

4. Оценим пропускную способность трубы от вакуумного баллона, имея в виду порядки её диаметра и длины и размерного множителя

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

используя формулу (6) имеем:

$$C_{\text{тр}} \sim 1 \text{ л/с},$$

### 3 Выводы

1. Проверены теоретические зависимости, связанные с течением газа (рис. 7 и 8)
2. Измерено значение производительности насоса с точностью  $\varepsilon = 8\%$