

Лабораторная работа 2.3.1. Получение и измерение вакуума.

Калинин Даниил, Б01-110

1 мая 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.

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, 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.

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов по-

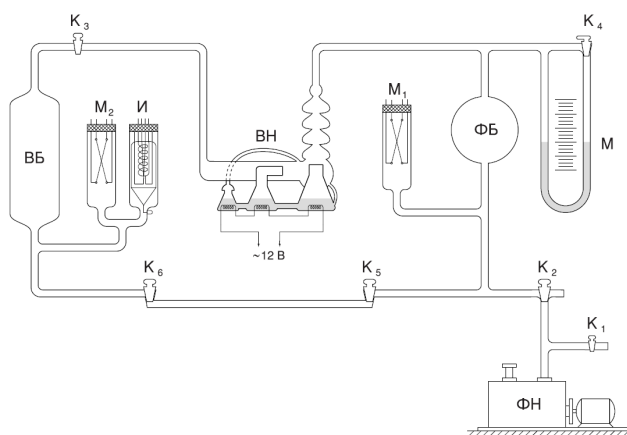


Рис. 1. Схема установки

лые 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. Устройство и принцип

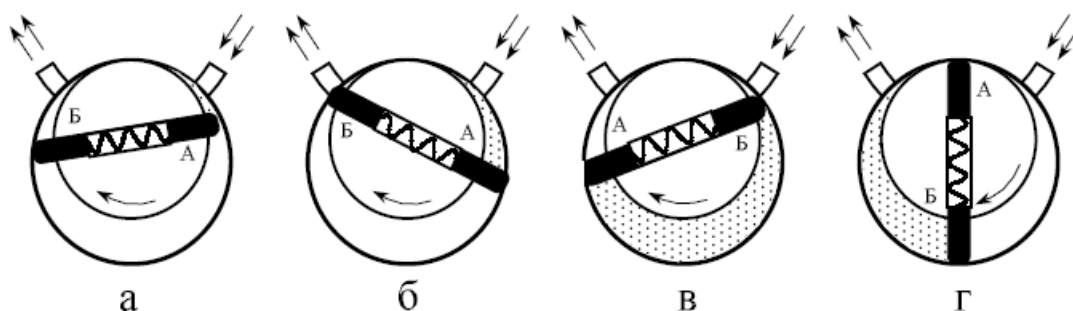


Рис. 2. Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

действия *диффузионного насоса* схематически изображены на рис 2. 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.

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 уста-

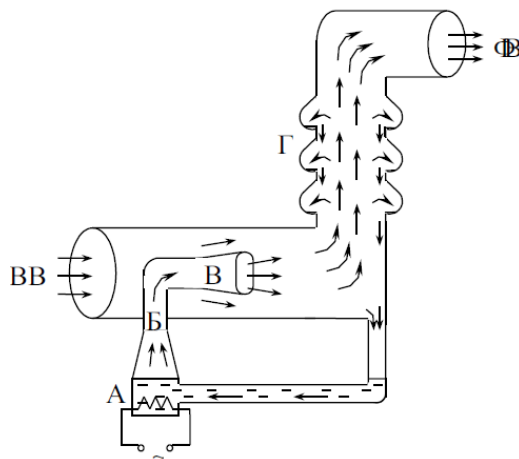


Рис. 3. Схема работы диффузионного насоса

новке (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.

Теоритическая справка:

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/μ) 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 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:

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

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

Ход работы:

1. Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверяем, что K_4 открыт, впускаем в установку атмосферный воздух через краны K_1 и K_2 . «Запираем» в капилляре атмосферный воздух кранами K_5 и K_6 . Объем капилляра в используемой установке:

$$V_k = 50 \text{ см}^3.$$

2. Закрываем K_1 и K_2 , включаем форвакуумный насос и даём ему откачать себя. Подключаем установку к насосу краном K_2 . Откачиваем установку до 10^{-2} торр. Отсоединяем установку краном K_2 , и оставляем насос работать «на себя». Перекрываем K_3 , отделяя высоковакуумную часть установки. Закрываем K_4 , чтобы привести в готовность масляный манометр.
3. Открываем K_5 , чтобы «запертый» ранее воздух заполнил форвакуумную часть установки, снимаем давление с помощью вакуумного манометра, измерив разность высот столбиков масла (приводим результаты и повторного измерения):

$$\Delta h_1 = (15.1 \pm 0.1) \text{ мм}; \quad \Delta h_2(15.2 \pm 0.1) \text{ мм}$$

Погрешность измерения величин определяется ценой деления шкалы манометра и способностью разглядеть показания.

4. Имея в виду, что плотность масла в манометре равна 885 г/л, и считая, что установившееся давление много больше форвакуумного, получаем:

$$P_1 = (1.31 \pm 0.01) \text{ Па}; \quad P_2 = (1.32 \pm 0.01) \text{ Па}$$

Пользуясь законом Бойля-Мариотта (т.к. расширение газа изотермическое), используя среднее значение измеренного давления, получаем

$$V_{\text{ФВ}} = (3750 \pm 20) \text{ см}^3$$

5. Аналогично, открыв кран K_3 , получив значения разности высот на манометре

$$\Delta h_1 = (10.3 \pm 0.1) \text{ мм}; \quad \Delta h_2(10.3 \pm 0.1) \text{ мм},$$

Получаем объем высоковакуумной части установки, вычтя из полученного законом Бойля-Мариотта объёма двух частей установки объем измеренной ранее части (погрешности складываются):

$$V_{\text{ВВ}} = (1760 \pm 60) \text{ см}^3$$

6. Открываем кран K_4 .

2. Получение высокого вакуума

1. Откачиваем установку ФВ насосом.
2. Включаем термопарные манометры и определяем давление в установке по градуировочной кривой.
3. По достижении форвакуума закрываем K_5 и начинаем откачку высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса.

4. Включаем ионизационную лампу.
5. Измеряем давление с помощью микроамперметра.

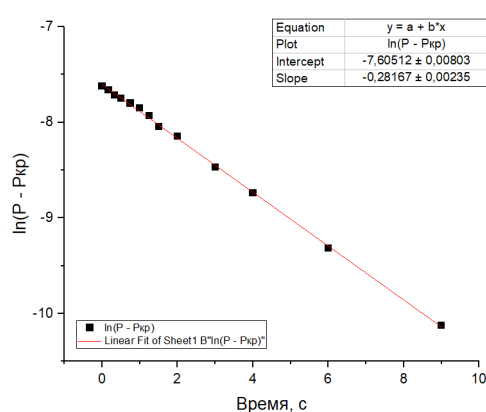
$$P_{np} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

3. Измерение скорости по ухудшению и улучшению вакуума

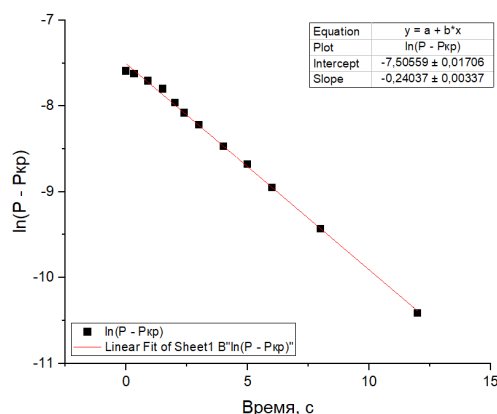
1. Закрываем кран K_3 , отключая тем самым откачку вакуума и записываем изменения показаний микроамперметра, пока вакуум не ухудшится до $6 \cdot 10^{-4}$ торр. Затем открываем K_3 и так же записываем улучшение вакуума. Приводим результаты повторных измерений в таблице 1 и на графиках (рис. 7 и 8).

Улучшение, 1		Улучшение, 2		Ухудшение, 1		Ухудшение, 2		Ухудшение, 3	
t, с	p, торр	t, с	p, торр	t, с	p, торр	t, с	p, торр	t, с	p, торр
0	0,0006	0	0,000615	0	0,00009	0	0,00008	0	0,0001
0,167	0,00058	0,33	0,0006	5,5	0,00012	4	0,00012	5	0,00015
0,33	0,000555	0,9	0,00056	10	0,00016	12	0,00018	12	0,0002
0,5	0,00054	1,5	0,00052	16	0,0002	20	0,00024	18	0,00025
0,75	0,00052	2	0,00046	21	0,00024	26	0,00028	25	0,0003
1	0,0005	2,4	0,00042	26	0,00028	31	0,00032	32	0,00035
1,25	0,00047	3	0,00038	32	0,00032	37	0,00036	39	0,0004
1,5	0,00043	4	0,00032	40	0,00038	43	0,0004	46	0,00045
2	0,0004	5	0,00028	47	0,00042	49	0,00044	52	0,0005
3	0,00032	6	0,00024	52	0,00046	54	0,00048	60	0,00055
4	0,00027	8	0,00019	57	0,0005	60	0,00052	68	0,0006
6	0,0002	12	0,00014	66	0,00055	68	0,00056		
9	0,00015			74	0,0006	74	0,0006		

Таблица 1. Зависимости давления от времени



(а) Измерение 1



(б) Измерение 2

Рис. 4. Зависимость давления от времени по улучшении 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

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

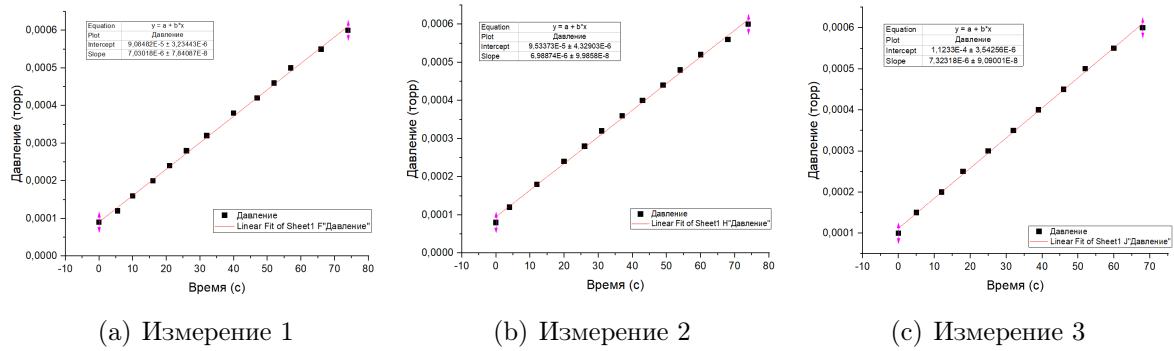


Рис. 5. Зависимость давления от времени по улучшению вакуума

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

$$W = (0,461 \pm 0,016) \text{ л/с}$$

3. Имея в виду соотношения (1) для случая ухудшения вакуума (без откачки), оценим Q_n 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:

$$Q_n + Q_d = (1,26 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с} (\varepsilon = 0,03)$$

,

Заключение:

1. В ходе данной работы было проверено несколько методик по измерению производительности высоковакуумного насоса.
2. Измерено значение производительности насоса с точностью