

Отчет о выполнении работы №2.3.1
Получение и измерение вакуума

Воейко Андрей Александрович, Б01-109

Долгопрудный, 2022

1 Аннотация.

В работе измеряется объем форвакуумной и высоковакуумной частей установки, а также определяется скорость откачки системы в стационарном режиме.

2 Теоретические сведения и экспериментальная установка.

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса:

- Низковакуумные — до 10^{-2} – 10^{-3} торр.
- Высоковакуумные — до 10^{-2} – 10^{-3} торр.
- Сверхвысокого вакуума — до 10^{-2} – 10^{-3} торр.

В данной работе исследуются 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.

2.1 Экспериментальная установка.

Установка изготовлена из стекла и состоит из фовакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термпарных 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.

2.1.1 Краны.

Все краны вакуумной установки — стеклянные. Стенки кранов тонки, пробки кранов полые и составляют одно целое с рукоятками. Кран K_1 используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Во время работы установки он должен быть закрыт. Трехходовой кран K_2 служит для соединения форвакуумного насоса с установкой 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 во 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. Суммарный объем обоих кранов и капилляра $V_k = 50 \text{ см}^3$. Диаметр капилляра $d_k = 0,8 \text{ мм}$. Его длина $l_k = 108 \text{ мм}$.

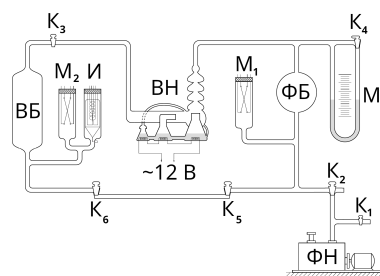


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

2.1.2 Форвакуумный насос.

Устройство и принцип действия ротационного форвакуумного насоса, используемого в данной работе, изображены на рис. 2.

Насос состоит из ротора, расположенного эксцентрично в цилиндре. В роторе есть прорезь, в которой располагаются способные передвигаться в нем пластины. В ходе вращения в цилиндре образуются две полости — увлекаемые пластинами «А» и «Б» соответственно. На первом и втором рисунках пластина «А» втягивает воздух из входной трубки в полость. На третьем полость отделяется от трубки пластиной «Б», а на четвертом пластина «Б» заталкивает воздух в выходную трубку.

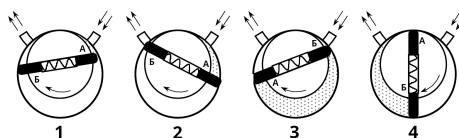


Рис. 2: Схема действия ротационного пластинчатого форвакуумного насоса.

2.1.3 Диффузионный насос.

Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. Устройство этого насоса изображено на рис. 3.

Масло нагревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе В и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через тру-

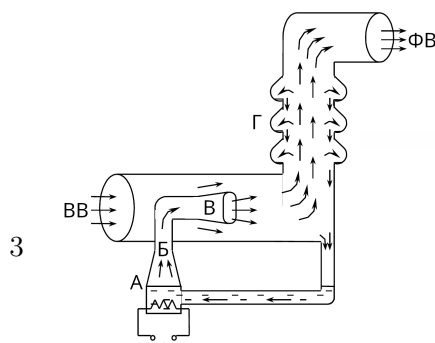


Рис. 3: Схема действия ротационного пластинчатого форвакуумного насоса.

бу ВВ. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубы ВВ. В этом случае пары масла увлекают молекулы воздуха из всего сечения зазора.

2.1.4 Процесс откачки.

Производительность насоса определяется скоростью откачки W (л/с): W — это объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздушозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Рассмотрим обычную схему откачки. Разделим вакуумную систему на две части: «откачиваемый объем» (в состав которого включим используемые для работы части установки) и «насос» к которому кроме самого насоса, отнесем трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объема. Обозначим через Q_d количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через Q_n — количество газа, проникающего в этот объем извне — через течи. Будем считать, что насос обладает скоростью откачки W и в то же время сам является источником газа; пусть Q_n — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Будем измерять количество газа Q_d , Q_n и Q_i в единицах PV (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя RT/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид:

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i). \quad (1)$$

Левая часть этого уравнения равна убыли газа в откачиваемом объеме V , а правая определяет количество газа, уносимого насосом, и количество газа, уносимого насосом, и количество прибывающего вследствие перечисленных выше причин за время dt . При достижения предельного вакуума (давление $P_{пр}$)

$$\frac{dP}{dt} = 0,$$

так что

$$P_{пр}W = Q_d + Q_n + Q_i. \quad (2)$$

Из этого уравнения найдем формулу, выражающую скорость откачки через предельный вакуум:

$$W = \left(\sum Q_i \right) / P_{\text{пр}}.$$

Обычно $Q_{\text{и}}$ постоянно, а $Q_{\text{и}}$ и $Q_{\text{д}}$ слабо зависят от времени, поэтому в наших условиях все эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной скорость откачки W , уравнение 1 можно проинтегрировать и, используя 2, получить

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp \left(-\frac{W}{V} t \right), \quad (3)$$

где P_0 — начальное давление. Оно обычно велико по сравнению с $P_{\text{пр}}$, поэтому можно записать, что

$$P = P_0 \exp \left(-\frac{W}{V} t \right) + P_{\text{пр}}. \quad (4)$$

Постоянная времени откачки $\tau = V/W$ является мерой эффективности откачной системы. Рассмотрим теперь, чем определяется скорость откачки системы. По условию эта скорость характеризует действие всей откачивающей системы, которую мы пока обозначали общим понятием «насос». На самом деле эта система состоит из собственно насоса, а также из кранов и трубопроводов, соединяющих его с откачиваемым объемом.

2.1.5 Искусственная течь.

Для количества газа, протекающего через трубку в условиях высокого вакуума, справедлива формула

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

Для капилляра формула выглядит так.

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

3 Результаты измерений и обработка данных.

3.1 Определение объема форвакуумной и высоковакуумной частей.

Запустим комнатный воздух в установку с открытыми кранами K_5 и K_6 , а затем закроем эти краны, чтобы запереть в этом объеме 50 см^3 воздуха

при атмосферном давлении.

Затем закроем краны, соединяющие установку с атмосферой и насосом, и включим форвакуумный насос, чтобы он откачал воздух из себя. Далее открываем кран K_2 и откачиваем установку до $\sim 10^{-2}$ торр. После этого снова отключим установку от насоса.

Получившееся давление в установке равно $1,6 \cdot 10^{-2}$ торр.

Затем, отделяем краном K_3 высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Открываем кран K_4 для приведения масляного манометра к готовности. Затем открываем кран K_5 , и измеряем давление в форвакуумной части.

Высота первого столбика $h_1 = 34,4$ см, второго — $h_2 = 9,2$ см, давление в форвакуумной части вместе с капилляром составляет $p_{фв} = 2190$ Па. Отсюда находим объем форвакуумной части $V_{фв} = V_K \cdot p_{атм}/p_{фв} = 2260 \text{ см}^3 = 2,26$ л.

Далее открываем краны K_3 и K_6 . После установления давления, снова измерим его манометром. Высота первого столбика $h_3 = 34,4$ см, второго — $h_4 = 9,2$ см, давление в установке вместе с капилляром составляет $p_{фв+вв} = 1400$ Па. Отсюда находим объем установки $V_{фв+вв} = V_K \cdot p_{атм}/p_{фв+вв} = 3530 \text{ см}^3 = 3,53$ л. $V_{вв} = V_{фв+вв} - V_{фв} = 1280 \text{ см}^3 = 1,28$ л.

3.2 Получение высокого вакуума.

Снова откачаем установку форвакуумным насосом. Далее включаем термометрический манометр. После того, как давление упало до уровня $p_{фв} = 0,0014$ торр, закроем кран K_6 . И начнем нагрев масла до температуры кипения. Измерим предельное давление: $p_{пр} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ торр. Далее отключаем откачку высоковакуумной части краном K_3 . Когда вакуум испортится до давления $p_0 = 7,9 \cdot 10^{-4}$ торр. Далее снова включим откачку и будем записывать показания давления от времени. Результат находится в таблице 1. Также там находится вычисленная величина $V_{вв} \ln \left(\frac{P - P_{пр}}{P_0} \right)$, необходимая для построения графика с дальнейшим вычислением расхода воздуха в диффузионном насосе. По данным измерений построим график.

№	Прошло, с	$p, \cdot 10^{-4}$ торр	$V_{\text{вв}} \ln \left(\frac{P-P_{\text{нр}}}{P_0} \right), \text{ л}$
1	0,0	$7,9 \pm 0,1$	$-0,27 \pm 0,02$
2	0,5	$7,8 \pm 0,1$	$-0,29 \pm 0,02$
3	1,0	$7,7 \pm 0,1$	$-0,31 \pm 0,02$
4	1,5	$7,4 \pm 0,1$	$-0,37 \pm 0,02$
5	2,0	$7,1 \pm 0,1$	$-0,44 \pm 0,02$
6	2,5	$6,7 \pm 0,1$	$-0,53 \pm 0,02$
7	3,0	$6,2 \pm 0,1$	$-0,66 \pm 0,02$
8	3,5	$5,6 \pm 0,1$	$-0,84 \pm 0,03$
9	4,0	$5,0 \pm 0,1$	$-1,04 \pm 0,03$
10	4,5	$4,4 \pm 0,1$	$-1,27 \pm 0,07$
11	5,0	$3,9 \pm 0,1$	$-1,52 \pm 0,07$
12	5,5	$3,5 \pm 0,1$	$-1,75 \pm 0,07$
13	6,0	$3,1 \pm 0,1$	$-2,03 \pm 0,07$
14	6,5	$2,8 \pm 0,1$	$-2,30 \pm 0,07$
15	7,0	$2,5 \pm 0,1$	$-2,63 \pm 0,07$
16	7,5	$2,3 \pm 0,1$	$-2,92 \pm 0,07$
17	8,0	$2,2 \pm 0,1$	$-3,09 \pm 0,08$
18	8,5	$2,0 \pm 0,1$	$-3,52 \pm 0,09$
19	9,0	$1,9 \pm 0,1$	$-3,81 \pm 0,11$
20	9,5	$1,8 \pm 0,1$	$-4,17 \pm 0,2$
21	10,0	$1,8 \pm 0,1$	$-4,17 \pm 0,4$
22	10,5	$1,7 \pm 0,1$	$-4,69 \pm 0,7$
23	11,0	$1,7 \pm 0,1$	$-4,69 \pm 0,7$
24	11,5	$1,6 \pm 0,1$	$-5,58 \pm 1,0$
25	12,0	$1,6 \pm 0,1$	$-5,58 \pm 1,0$
26	12,5	$1,5 \pm 0,1$	$— (\rightarrow \infty)$

Таблица 1: Результаты измерения зависимости давления от времени при улучшении вакуума.

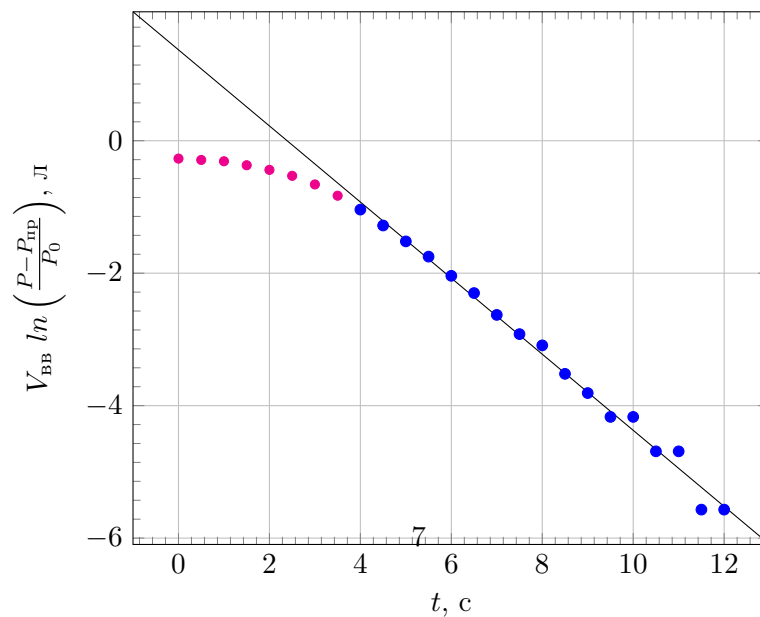


Рис. 5: Зависимость давления от времени.

Из графика видно, что примерно с 4 секунды зависимость похожа на линейную. Это связано с тем, что в соответствии с уравнением 4:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{\text{пр}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V \ln\left(\frac{P - P_{\text{пр}}}{P_0}\right) = -Wt.$$

До четвертой секунды процесс просто не успел полностью вступить в силу. Аппроксимируем данные начиная с 4 секунды к прямой. Вычислив угловой коэффициент, получаем $-W = -0,57$ л/с, то есть $W = 0,57$ л/с. Теперь снова закроем кран К₃ и пронаблюдаем за ухудшением вакуума. Результаты измерений представлены в таблице 2.

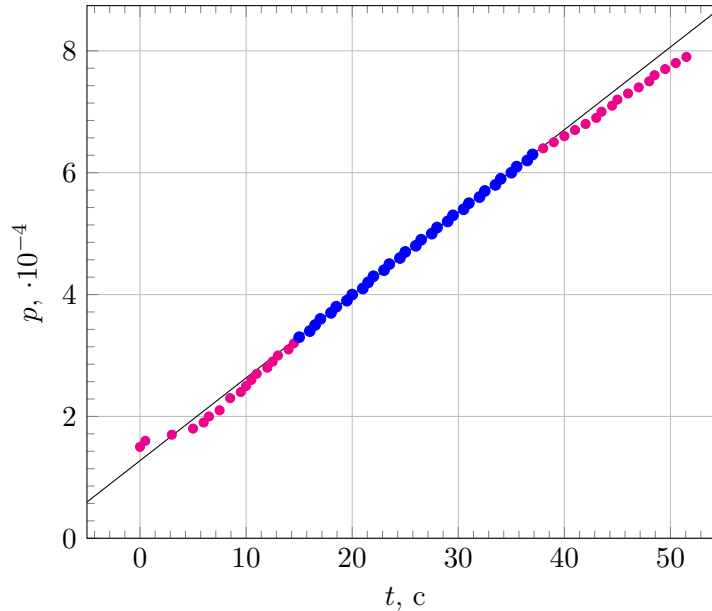


Рис. 6: Зависимость давления от времени.

Здесь снова видна линейная зависимость примерно с 15 до 37 секунды наблюдается линейная зависимость. Эта зависимость описывается уравнением $V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}) dt$. Соответственно, коэффициент наклона графика в этом процессе равен $\frac{Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}}{V_{\text{вв}}}$. Таким образом, найдя этот коэффициент, мы сможем оценить $Q_{\text{н}}$. Вычислить его точно не удастся, так как невозможно найти их отдельно, но есть возможность его оценить, полагая его большим, чем $Q_{\text{д}}$. Таким образом, $\frac{Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}}{V_{\text{вв}}} = 0,136 \frac{\text{торр}}{\text{с}} \Rightarrow Q_{\text{н}} \sim 0,173 \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$.

4 Выводы.

В ходе работы были произведены измерения объемов форвакуумной и высоковакуумной части, а затем с использованием этих данных, была

№	Прошло, с	$p, \cdot 10^{-4}$ торр	№	Прошло, с	$p, \cdot 10^{-4}$ торр
1	0,0	$1,5 \pm 0,1$	34	26,0	$4,8 \pm 0,1$
2	0,5	$1,6 \pm 0,1$	35	26,5	$4,9 \pm 0,1$
3	3,0	$1,7 \pm 0,1$	36	27,5	$5,0 \pm 0,1$
4	5,0	$1,8 \pm 0,1$	37	28,0	$5,1 \pm 0,1$
5	6,0	$1,9 \pm 0,1$	38	29,0	$5,2 \pm 0,1$
6	6,5	$2,0 \pm 0,1$	39	29,5	$5,3 \pm 0,1$
7	7,5	$2,1 \pm 0,1$	40	30,5	$5,4 \pm 0,1$
8	8,0	$2,2 \pm 0,1$	41	31,0	$5,5 \pm 0,1$
9	8,5	$2,3 \pm 0,1$	42	32,0	$5,6 \pm 0,1$
10	9,5	$2,4 \pm 0,1$	43	32,5	$5,7 \pm 0,1$
11	10,0	$2,5 \pm 0,1$	44	33,5	$5,8 \pm 0,1$
12	10,5	$2,6 \pm 0,1$	45	34,0	$5,9 \pm 0,1$
13	11,0	$2,7 \pm 0,1$	46	35,0	$6,0 \pm 0,1$
14	12,0	$2,8 \pm 0,1$	47	35,5	$6,1 \pm 0,1$
15	12,5	$2,9 \pm 0,1$	48	36,5	$6,2 \pm 0,1$
16	13,0	$3,0 \pm 0,1$	49	37,0	$6,3 \pm 0,1$
17	14,0	$3,1 \pm 0,1$	50	38,0	$6,4 \pm 0,1$
18	14,5	$3,2 \pm 0,1$	51	39,0	$6,5 \pm 0,1$
19	15,0	$3,3 \pm 0,1$	52	40,0	$6,6 \pm 0,1$
20	16,0	$3,4 \pm 0,1$	53	41,0	$6,7 \pm 0,1$
21	16,5	$3,5 \pm 0,1$	54	42,0	$6,8 \pm 0,1$
22	17,0	$3,6 \pm 0,1$	55	43,0	$6,9 \pm 0,1$
23	18,0	$3,7 \pm 0,1$	56	43,5	$7,0 \pm 0,1$
24	18,5	$3,8 \pm 0,1$	57	44,5	$7,1 \pm 0,1$
25	19,5	$3,9 \pm 0,1$	58	45,0	$7,2 \pm 0,1$
26	20,0	$4,0 \pm 0,1$	59	46,0	$7,3 \pm 0,1$
27	21,0	$4,1 \pm 0,1$	60	47,0	$7,4 \pm 0,1$
28	21,5	$4,2 \pm 0,1$	61	48,0	$7,5 \pm 0,1$
29	22,0	$4,3 \pm 0,1$	62	48,5	$7,6 \pm 0,1$
30	23,0	$4,4 \pm 0,1$	63	49,5	$7,7 \pm 0,1$
31	23,5	$4,5 \pm 0,1$	64	50,5	$7,8 \pm 0,1$
32	24,5	$4,6 \pm 0,1$	65	51,5	$7,9 \pm 0,1$
33	25,0	$4,7 \pm 0,1$	—		

Таблица 2: Результаты измерения зависимости давления от времени при ухудшении вакуума.

вычислена скорость откачки воздуха диффузионным насосом.