

Лабораторная работа 2.3.1
Получение и изучение вакуума

Кагарманов Радмир Б01-106

17 марта 2022 г.

Цель работы: 1) измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

В работе используется: вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

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, термопарных манометров (M_1 и M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов K_1, K_2, \dots, K_6 .

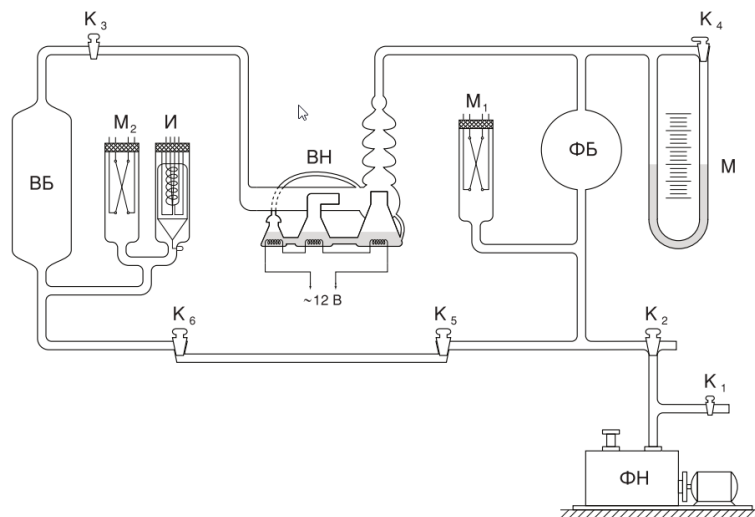


Рис. 1: Экспериментальная установка

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.

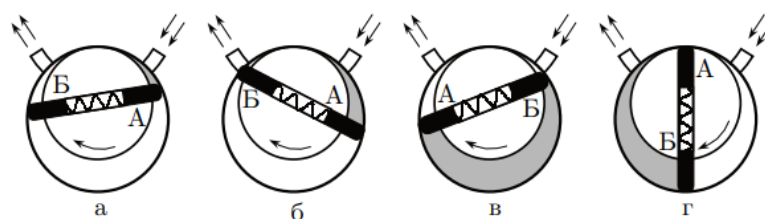


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

В цилиндрической полости массивного корпуса размещен эксцентрично ротор так, что он постоянно соприкасается своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости. Они разделяют объём между ротором и корпусом на две части. Действие насоса ясно из изображённых на рис. 2 последовательных положений пластин при вращении ротора по часовой стрелке. В положении «а» газ из откачиваемого объёма поступает в пространство между пластиной «А» и линией соприкосновения корпуса и ротора. По мере вращения это пространство увеличивается (рис. 2б), пока вход в него не перекроет другая пластина «Б» (рис. 2в). После того как пластина «А» пройдёт выходное отверстие и линию соприкосновения (рис. 2г), лопасть «Б» будет сжимать следующую порцию газа и вытеснять его через клапан в атмосферу.

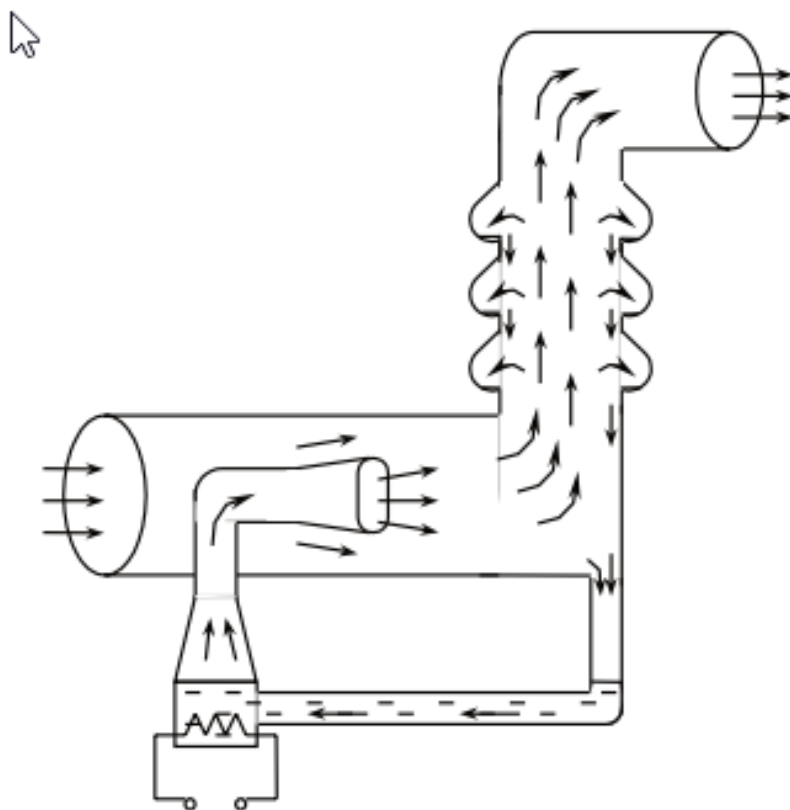


Рис. 3: Экспериментальная установка

Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии (внедрении) молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. На прежнем их месте образуется пустота, которая немедленно заполняется следующими порциями газа, увеличивая степень разрежения газа в окрестности струи и оказывая таким образом сильное откачивающее воздействие на весь газ в откачиваемом объеме. Скорость откачки диффузионных насосов в сотни и тысячи раз превосходит скорость откачки форвакуумного насоса. Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на рис. 3 (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку 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

Процесс откачки. Производительность насоса определяется скоростью откачки W (л/с): W - это объём газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени.

$$VdP = (PW - \sum_i Q_i)dt \quad (1)$$

Q_i - это количество газа попадающего в систему в единицу времени через течи, насос и т.д. Левая часть этого уравнения равна убыли газа в откачиваемом объёме V , а правая определяет количество газа, уносимого насосом, и количество прибывающего вследствие перечисленных выше причин за время dt . При достижении предельного вакуума (давление $P_{пр}$). Тогда $\frac{dP}{dt} = 0$. Через уравнение (1) найдём скорость откачки:

$$W = \frac{\sum_i Q_i}{P_{пр}} \quad (2)$$

Считая Q_i и W постоянными проинтегрируем уравнение (1):

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

Полная скорость откачки W , собственная скорость откачки насоса W_n и проводимости элементов системы C_1, C_2, \dots соотносятся согласно формуле (4):

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

Течение через трубу Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном давлении и даже при понижении давления до форвакуумного длина свободного пробега меньше диаметра трубок и течение откачиваемого газа определяется его вязкостью, т. е. взаимодействием его молекул. При переходе к высокому вакууму картина меняется. Столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль,

чем соударения со стенками. Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума, или, как говорят, в кнудсеновском режиме, 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 и 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. Впустим в установку атмосферный воздух.
2. Запрём в капилляре $V_0 = 50 \text{ см}^3$ воздуха при атмосферном давлении $P_{\text{атм}} = 101000 \pm 100 \text{ Па}$
3. Подключим установку к форвакуумному насосу и откачаем установку до давления 10^{-2} торр
4. После открытия крана K_5 запёртый воздух распространился по всей форвакуумной части. Измерим показания масляного манометра:
 $h_1 = 34,4 \pm 0,1 \text{ см масл. ст.}$, $h_2 = 9,0 \pm 0,1 \text{ см масл. ст.}$
 $\sigma_{\Delta h_{\text{фв}}} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} \approx 1,1\%$
 $\Delta h_{\text{фв}} = (25,4 \pm 0,3) \text{ см масл. ст.}$
5. Пользуясь законом Бойля-Мариотта, найдём объём форвакуумной части $V_{\text{фв}}$:
 $V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}}}{P_2} V_0$, где $P_2 = \rho_{\text{масл}} \Delta h_{\text{фв}} g$, $\rho_{\text{масл}} = 0,885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
 $\sigma_{V_{\text{фв}}} = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{фв}}}^2 + \sigma_{P_{\text{атм}}}^2} \approx 1,1\%$
 $V_{\text{фв}} = (2,29 \pm 0,03) \text{ л}$
6. Откроем кран K_3 , чтобы газ заполнил высоковакуумную часть. Посчитаем её объём, как это сделали с фарвакуумной частью.
 $h_1 = 30,1 \pm 0,1 \text{ см масл. ст.}$, $h_2 = 13,9 \pm 0,1 \text{ см масл. ст.}$
 $\sigma_{\Delta h_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} \approx 0,8\%$
 $\Delta h_{\text{вв}} = (16,2 \pm 0,1) \text{ см масл. ст.}$
 $V_{\text{вв}} = \frac{P_{\text{атм}}}{P_2} V_0$
 $\sigma_{V_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{вв}}}^2 + \sigma_{P_{\text{атм}}}^2} \approx 0,8\%$
 $V_{\text{вв}} = (1,30 \pm 0,01) \text{ л}$

Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

7. После установки давления 10^{-2} мм рт. ст. в установке начинаем откачивать ВБ с помощью диффузионного насоса.

8. С помощью ионизационного манометра фиксируем предельное давление $P_{\text{пр}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

9. 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, 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.

Сначала проведём вычисления для коэффициента k , полученного при улучшении вакуума (для этого мы строили графики зависимости $\ln((P - P_0)/(P_0 - P_{\text{пр}}))$ от t). Поскольку $W = -kV_{\text{вв}}$, то $\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{\text{вв}}}^2} \approx 1,4\%$, в результате имеем: $W = (7,92 \pm 0,11)$ л/с.

10. 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 $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = kV_{\text{вв}} = (1,80 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ торр \cdot л/с (Погрешность рассчитывается по формуле $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{\text{вв}}}^2} \approx 0,8\%$). Используя формулу $Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}}W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$, а значит $\varepsilon_{Q_{\text{н}}} = \sqrt{\varepsilon_{P_{\text{пр}}}^2 W^2 + \varepsilon^2} \approx 1,6\%$ получим, что:
 $Q_{\text{н}} = (9,29 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$ торр \cdot л/с.

Вывод

В ходе данной лабораторной работы удалось проверить законы, в соответствии с которыми вакуум в установке ухудшается и улучшается, на графиках ухудшения хорошо видно, что зависимость линейная, но на

графиках улучшения виден большой разброс. Также была изучена скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума.

$$W = (7,92 \pm 0,11) \text{ л/с.}$$

$$Q_H = (9,29 \pm 0,15) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с.}$$

Были найдены объёмы форвакуумной и высоковакуумной частей установки:

$$V_{\text{фв}} = (2,29 \pm 0,03) \text{ л}$$

$$V_{\text{вв}} = (1,30 \pm 0,01) \text{ л}$$

Таблица 1: Результаты измерений

Улучшение				Ухудшение			
$P, \cdot 10^{-5} \text{ торр}$	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5} \text{ торр}$	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5} \text{ торр}$	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5} \text{ торр}$	$t, \text{ с}$
75	0	76	0	15	0	15	0
73	1	74	1	17	3	18	3
67	2	70	2	21	6	23	6
51	3	61	3	26	9	28	9
39	4	49	4	31	12	33	12
30	5	37	5	35	15	37	15
23	6	28	6	40	18	42	18
20	7	22	7	44	21	46	21
18	8	19	8	48	24	50	24
17	9	17	9	53	27	54	27
15	10	16	10	56	30	58	30
14	11	15	11	60	33	61	33
		14	12	64	36	65	36
				68	39	68	39
				75	45	76	45
$k_1 = -6.196 \text{ с}^{-1}$ $k_2 = -5.989 \text{ с}^{-1}$ $k_{\text{ср}} = -(6.093 \pm 0.073) \text{ с}^{-1}$				$k_1 = 1.387 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{с}^{-1}$ $k_2 = 1.376 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{с}^{-1}$ $k_{\text{ср}} = (1.382 \pm 0,006) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{с}^{-1}$			

Рис. 4: Ухудшение вакуума 1

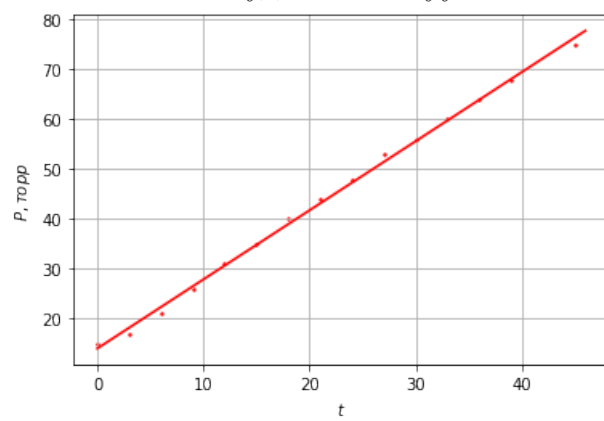


Рис. 5: Ухудшение вакуума 2

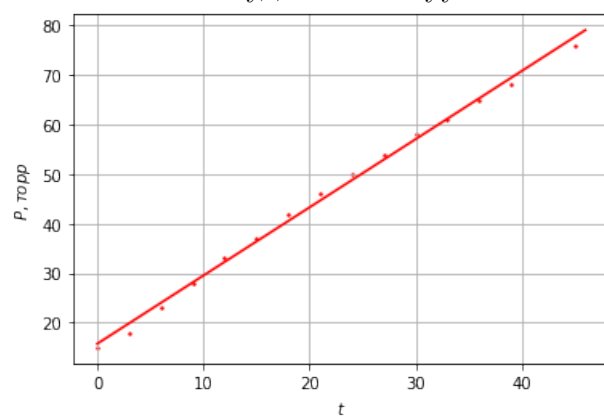


Рис. 6: Улучшение вакуума 1

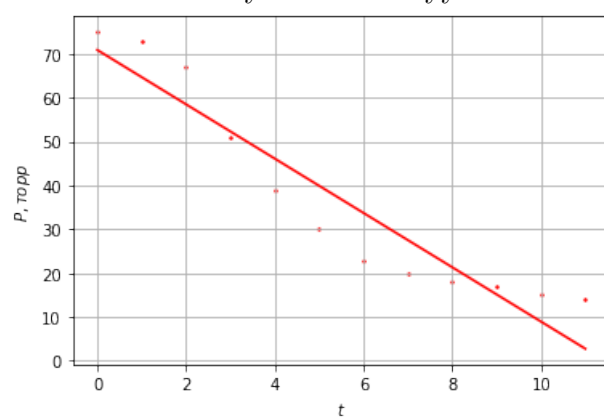


Рис. 7: Улучшение вакуума 2

