

«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Дмитрий Павлов
*Студент факультета инноваций
и высоких технологий
(группа 790)*

Лабораторная работа №2.3.1
«Получение и измерение вакуума»

Долгопрудный
9 мая 2018 г.

- **Цель работ:** 1) Измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной части установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по улучшению и ухудшению вакуума.
- **В работе используются:** Вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

1 Теоретический материал:

По степени разрежения вакуумные установки делят на три класса:

1. Низковакуумные (до $10^{-2} - 10^{-3}$ торр)
2. Высоковакуумные ($10^{-4} - 10^{-7}$ торр)
3. Установки сверхвысокого вакуума ($10^{-8} - 10^{-11}$ торр)

В данной работе исследуется откачка установки форвакуумным насосом до давления порядка 10^{-3} торр, а также откачка диффузионным масляным насосом до давления порядка 10^{-5} торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

2 Экспериментальная установка:

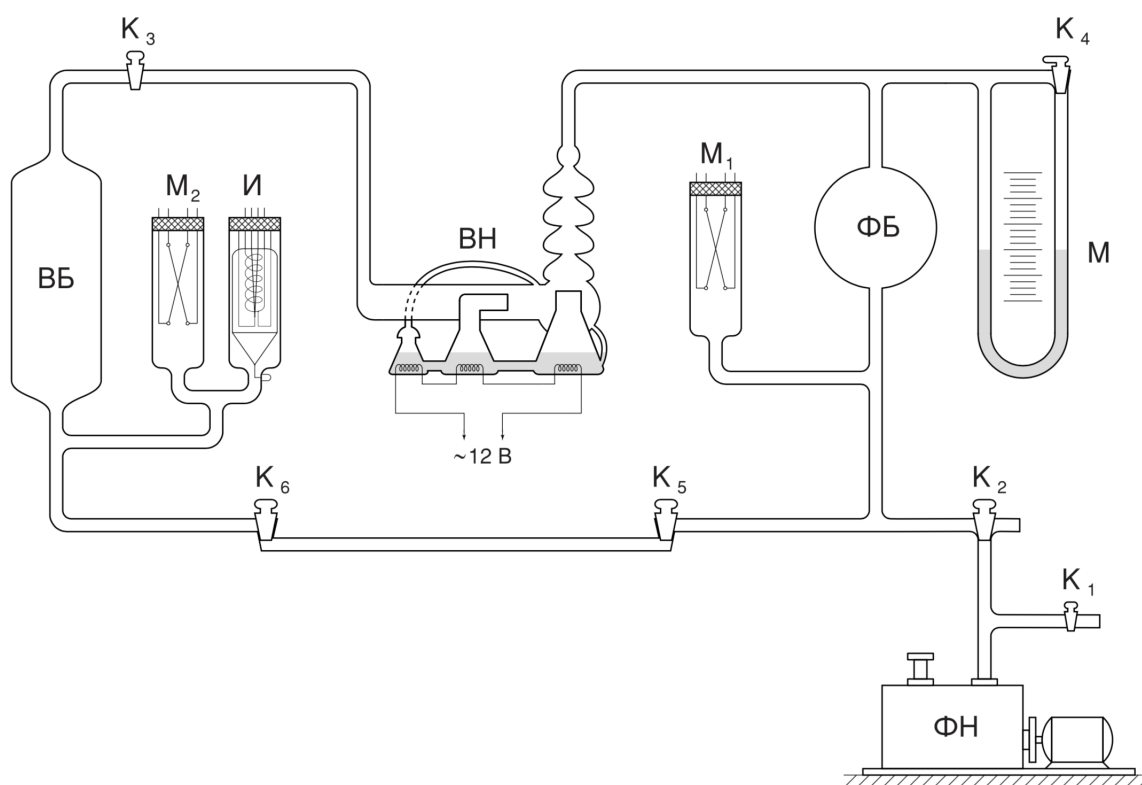


Рис. 1: Схема установки

Общая схема установки представлена на рис.2. Установка 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, \dots, K_6 .

2.1 Насосы

2.1.1 Форвакуумный насос

Устройство и принцип действия ротационного пластинчатого форвакуумного насоса схематически представлены на рис. ??.

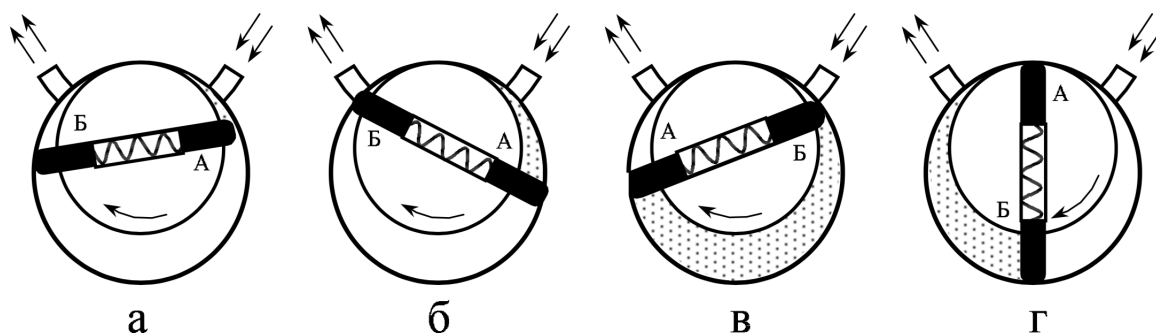


Рис. 2: Принцип работы форвакуумного насоса

тор, постоянно соприкасающийся своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости. Они разделяют объем между ротором и корпусом на две части. При работе насоса происходят циклические изменения объема воздуха, поступаемые из откачиваемого объема. На рис. 2.1.1 в положениях а и б пластина А засасывает разреженный воздух из откачанного объема, а пластина Б вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях в и г происходит то же самое, только пластины меняются ролями.

2.1.2 Диффузионный насос

Принцип работы диффузионного насоса основывается на диффузии молекул разреженного газа в пары масла. Попавшие в струю паров молекулы увлекаются ею и уже не возвращаются. Таким образом происходит повышение разреженности воздуха. Устройство диффузионного насоса схематически показано на рис. 2.1.2. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В, увлекая за собой молекулы воздуха. Далее струя попадает в вертикальную трубу Г, где масло конденсируется и стекает вниз, а молекулы воздуха откачиваются форвакуумным насосом. Давление насыщенных паров масла много больше $5 \cdot 10^{-2}$ торр, поэтому пары масла создают мощную струю.]

2.2 Манометры

2.2.1 Масляный манометр

Масляный манометр представляют собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, имеющим низкое давление насыщенных паров. Из-за малой плотности масла ($\rho = 0,92/\text{см}^3$)

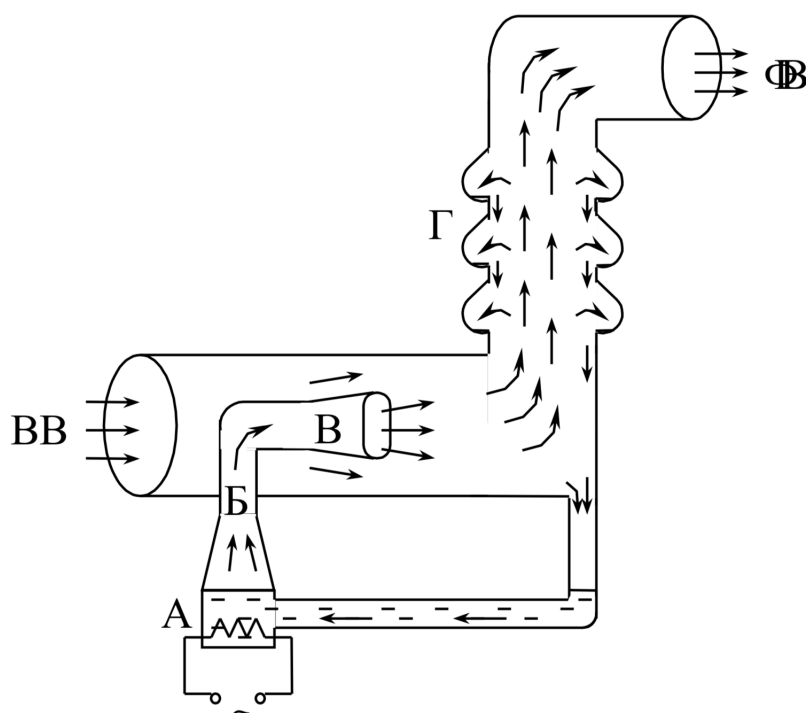


Рис. 3: Устройство диффузионного насоса

можно измерять только небольшие разности давлений (до нескольких торр).

2.2.2 Термопарный манометр

Чувствительным элементом манометра является платино-платинорадиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключенная в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на рис. ???. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство.

При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимыми с диаметром нити, теплопровод падает и возрастает температура нити. При вакууме $\sim 10^{-3}$ торр температура нити становится практически постоянной.

Для оценки вакуума с помощью термопарного манометра используют градуировочную кривую (см рис. 5).

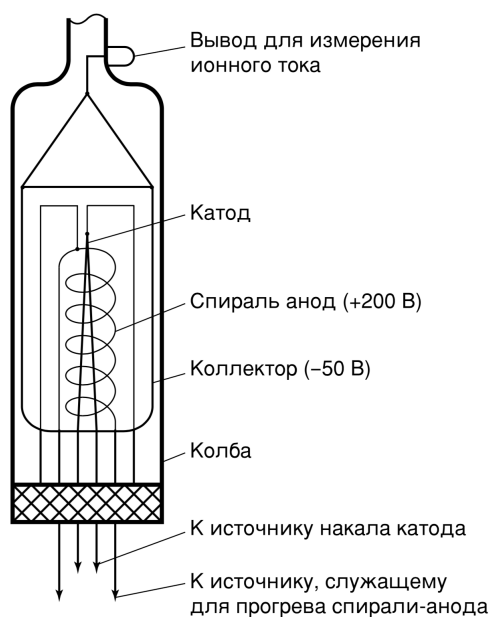


Рис. 4: Устройство термопарного манометра

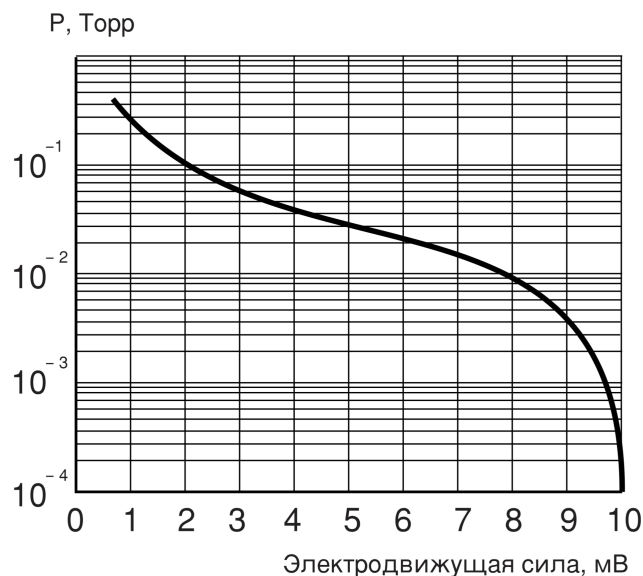


Рис. 5: Градуировочная кривая

2.2.3 Ионизационный манометр

Схема ионизационного манометра представлена на рис. 2.2.3.

Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются нагретым катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему форму спирали. Под влиянием поля коллектора электроны многократно пересекают пространство между катодом и коллектором и ионизируют молекулы газа. Образовавшиеся ионы притягиваются к коллектору и определяют его ток. Лампа перегорает при давлении свыше 10^{-3} торр, поэтому необходимо производить измерения при давлениях, не превышающих данного значения.

2.3 Откачка воздуха

Производительность насоса определяется *скоростью откачки* W – объемом газа, удаляемым из сосуда при данном давлении за единицу времени. Определим предельное давление, достижимое при откачке воздуха:

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_u)dt, \quad (1)$$

где Q_d – количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, Q_n – поток газа, поступающего из насоса обратно в систему, Q_u – количество газа, проникающего в систему извне в единицу времени.

При $P = P_{np}$ $\frac{dP}{dt} = 0$, поэтому

$$P_{np}W = Q_d + Q_n + Q_u \quad (2)$$

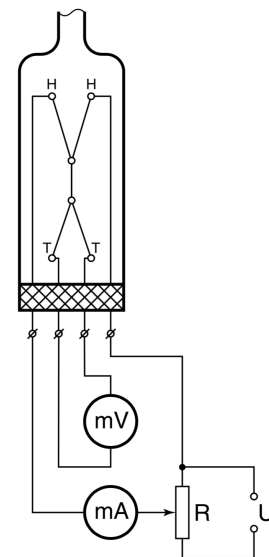


Рис. 6: Схема ионизационного манометра

Полагая, что все Q постоянны, интегрируя (1) и применяя (2), получаем

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

Постоянная меры откачки $\tau = V/W$ является мерой эффективности откачной системы.

3 Выполнение работы:

3.1 Определение объема форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Определим объемы сосудов. Для этого закроем краны K_5 и K_6 (при этом в капиллярах «запирается» объем $V = 50 \text{ см}^3$), затем закроем краны K_1 и K_2 , подключив установку к форвакуумному насосу, и кран K_3 , изолируя таким образом высоковакуумную часть от форвакуумной. Включим форвакуумный насос и откачаем установку. Измерим полученное давление масляным манометром.

2. Затем откроем кран K_5 . При этом «запертый» воздух заполнит всю форвакуумную часть установки. Измерим изменение давления манометром:

$$h_1 = 16,5 \text{ см}$$

$$h_2 = 31,2 \text{ см}$$

$$\Delta h_{\phi\phi} = h_2 - h_1 = 14,7 \text{ см}$$

$$P = \rho g \Delta h = 1274,9 \text{ Па}$$

Из закона Бойля-Мариотта получим, что объем форвакуумной части установки $V_{\phi\phi} = \frac{P_0 V_0}{P}$.

Отсюда можно получить значение $V_{\phi\phi} = 3972,7 \text{ см}^3$.

3. Откроем кран K_3 , соединяя форвакуумную и высоковакуумную часть. Измерим изменение давления масляным манометром. Рассуждая аналогично, получим значение объема высоковакуумной части $V_{\phi\phi}$.

$$h_1 = 18 \text{ см}$$

$$h_2 = 29,8 \text{ см}$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = h_2 - h_1 = 11,8 \text{ см}$$

$$P = \rho g \Delta h = 1274,9 \text{ Па}$$

$$V_{\text{полн}} = 4949,1 \text{ см}^3$$

$$V_{\phi\phi} = V_{\text{полн}} - V_{\phi\phi} = 976,4 \text{ см}^3$$

4. Погрешность измерений:

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_0}}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta h}}{\Delta h}\right)^2}$$

Отсюда $V_{\phi\phi} = (3972,7 \pm 239,9) \text{ см}^3$, $V_{\phi\phi} = (976,4 \pm 59,1) \text{ см}^3$

3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

1. Откачаем установку форвакуумным насосом и, когда давление станет достаточно низким $< 3 \cdot 10^{-2}$ торр, начнем высоковакуумную откачку. Дождемся, пока давление в системе упадет до предельного значения.
2. Проведем измерение значения предельного давления с помощью ионизационного манометра:
 $P_{np} = 6,3 \cdot 10^{-5}$ торр
3. Найдем скорость откачки по улучшению вакуума во время откачки. Для этого откроем кран K_3 и измерим изменение давления в зависимости от времени. Запишем результаты в таблицу 1.

t, с	$P, 10^{-4}$ торр	$\ln(P - P_{np})$
0	6,4	1,76
1	5,6	1,61
2	4,2	1,28
3	3,4	1,03
4	2,8	0,79
5	2,3	0,53
6	1,9	0,26
7	1,6	0,00
8	1,4	-0,22
9	1,2	-0,51
10	1,1	-0,69
11	0,9	-1,20
12	0,8	-1,61

Таблица 1: Измерения при улучшении вакуума

4. По полученным данным построим график зависимости $\ln(P - P_{np})$ от t:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{W}{V_{\text{вв}}} = -0,275$$

$$W = 0,275 \cdot 0,976 \approx 0,268 \text{ л/с}$$

$$\varepsilon_W = \sqrt{(\varepsilon_\tau)^2 + (\varepsilon_V)^2} \approx 7\%$$

Таким образом $W = 0,268 \pm 0,019 \text{ л/с}$

Оценим величину потока Q_n (в Н·м/с):

$$V_{\text{вв}} dP = (Q_d + Q_n) dt$$

$$Q_n = PW \approx 1,1 \cdot 10^{-5}$$

5. Откроем кран K_6 , введя таким образом искусственную течь в установку. Измерим установившееся давление:

$$P_{\text{уст}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

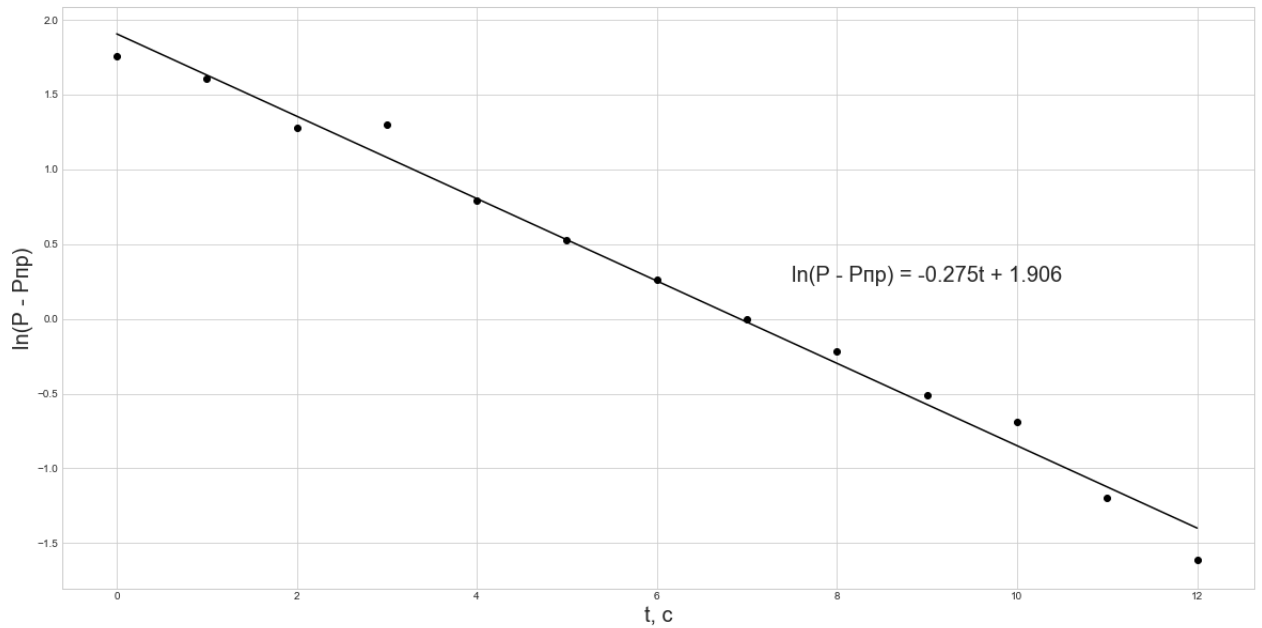


Рис. 7: Улучшение вакуума

Количество газа, протекающего через капилляр: $\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\phi\phi} - P_{yct}}{l}$

$$P_{yct}W = P_{np}W + \frac{d}{dt}(PV)_{\text{капилл}} \rightarrow W = \frac{4}{3l}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\phi\phi} - P_{yct}}{P_{yct} - P_{np}} \approx 6,98 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} = 6,98 \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

$$\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_P^2 + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_l^2} \approx 13\%$$

Полученное значение $W = (6,98 \pm 0,91) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$

4 Вывод:

При улучшении вакуума при откачке полученное значение скорости откачки равно $W = (0,268 \pm 0,019) \text{ л/с}$, а при введении искусственной течи $W = (6,98 \pm 0,91) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$. Расхождения в значениях вызваны погрешностями и недостаточной точностью измерительных приборов, а также утечкой воздуха из установки.