



Физтех-школа аэрокосмических технологий

3 мая 2024 года

Лабораторная работа 2.3.1 ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Зайцев Александр

Б03-305

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, термодарным и ионизационным.

Экспериментальная установка.

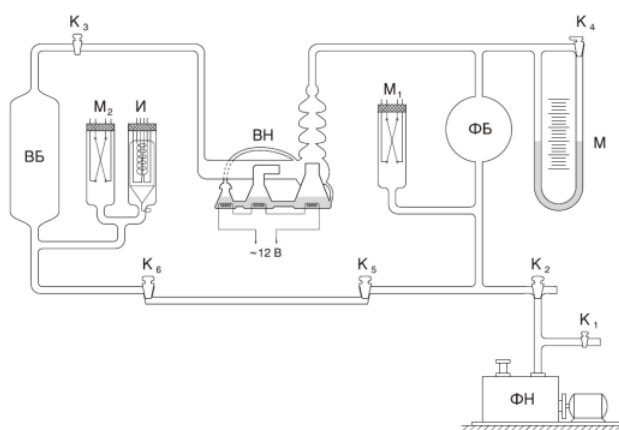


Рис. 1: Схема установки

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термодарных манометров (М1 и М2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов (K1, K2,..., K6) (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 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. Устройство и принцип 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.

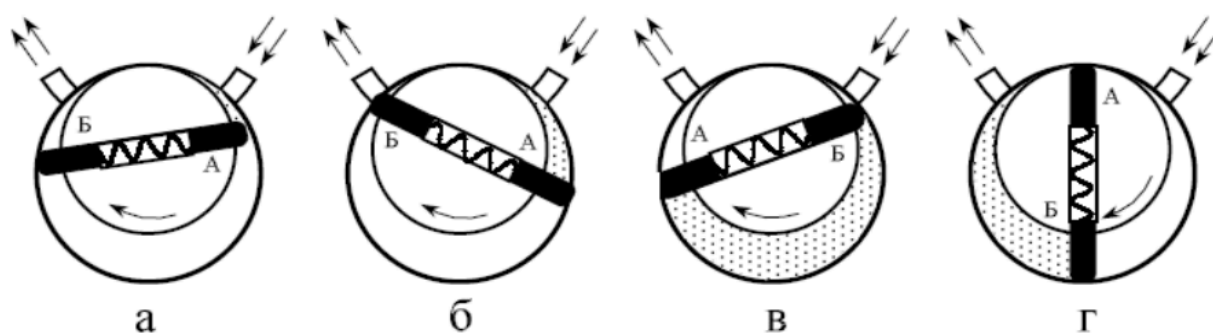


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

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).

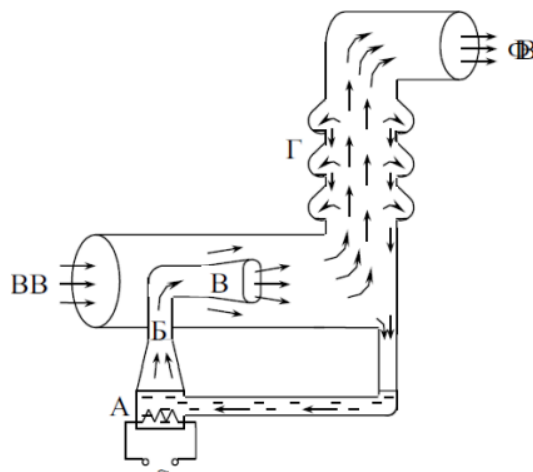


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

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 мало летучими фракциями масла. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров. Соответственно, в откачиваемый объем поступает меньше паров масла, и его удастся откачать до более высокого вакуума. Термопарный манометр. Чувствительным элементом манометра является платиновородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключенная 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.

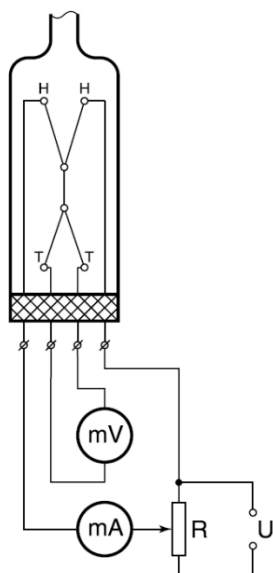


Рис.4: Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

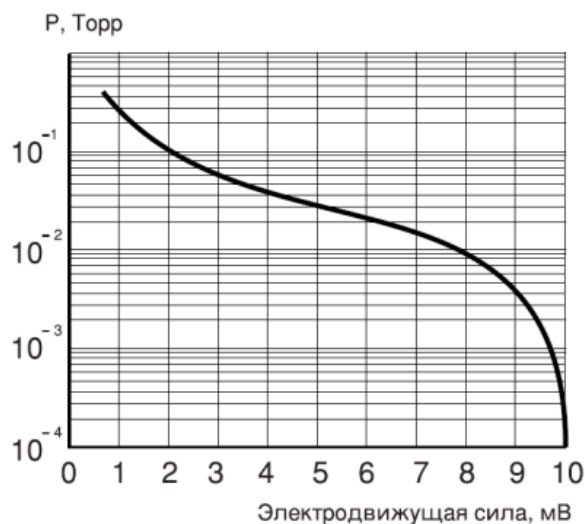


Рис.5: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются раскаленным 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 ионизируют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Накаленный катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает 10^{-3} торр, поэтому перед его включением необходимо проверить давление термопарным манометром.

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 $Q_{\text{и}}$, 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 $Q_{\text{и}}$ 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 формулой (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 и установку, то давлением P_1 у насоса можно пренебречь. Давление в сосуде $P = P_2$. Тогда имеем:

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

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

Ход работы.

Для начала определим объемы высоко-вакуумной и форвакуумной частей установки, имея в виду следующие параметры установки:

$$\rho_{\text{масл}} = 0,885 \text{ г/см}^3 \quad V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3 \quad P_0 = 99,3 \text{ кПа}$$

Будем использовать следующие формулы:

$$V_{\text{фв}} = \frac{P_0 V_0}{\rho g \Delta h_{\text{фв}}} = \frac{99,3 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{885 \cdot 9,8 \cdot 0,27} = 2,12 \text{ л} = 0,00212 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{вв}} = V_{\text{пол}} - V_{\text{фв}} = \frac{P_0 V_0}{\rho g \Delta h_{\text{пол}}} - V_{\text{фв}} = 1,19 = 0,00119 \text{ м}^3$$

Получим высокий вакуум и запишем значение предельного давления

$$P_{\text{пр}} = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$$

Затем проведем измерения по ухудшению и улучшению вакуума.

Построим графики зависимости логарифма разности текущего и предельного давлений от времени по улучшению вакуума:

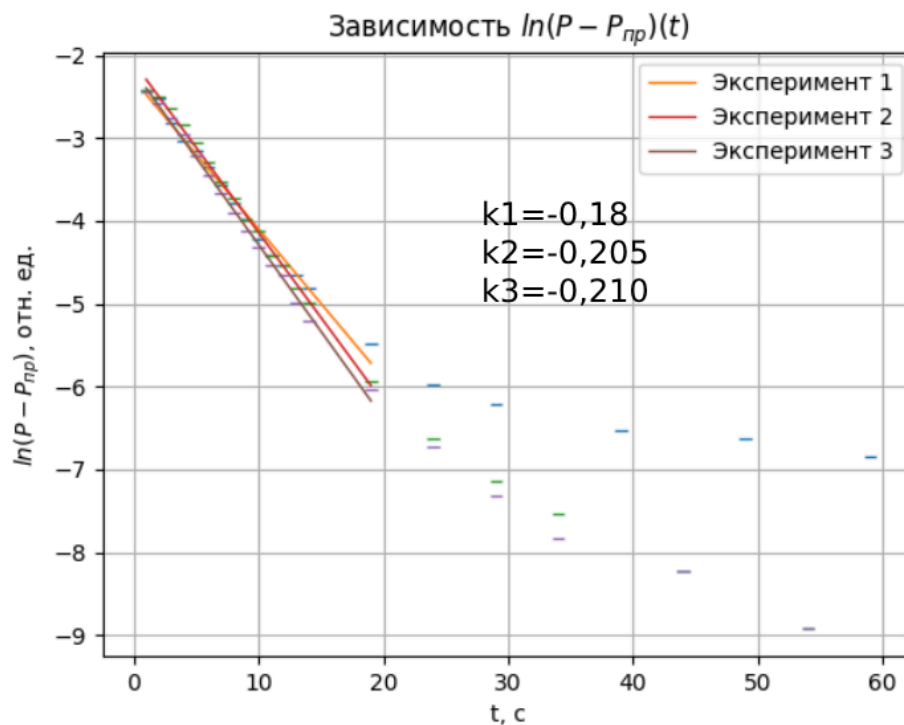


Рис. 6. График №1

Погрешность углового коэффициента определяется по формуле:

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2} \quad (8)$$

В итоге имеем:

$$k_1 = -0,18 \pm 0,01$$

$$k_2 = -0,205 \pm 0,003$$

$$k_3 = -0,210 \pm 0,003$$

Используя эти данные найдем скорость откачки W диффузионного насоса:

$$W_1 - k_1 \cdot V_{\text{вв}} = 0.214 \text{ л/с}$$

$$\sigma W_1 = \varepsilon_{k_1} \cdot W_1 = 0.005/0.18 \cdot 0.214 = 0.006 \text{ л/с}$$

Итоговые значения

$$W_1 = (0.214 \pm 0.006) \text{ л/с } \varepsilon = 3\%$$

$$W_2 = (0.244 \pm 0.004) \text{ л/с } \varepsilon = 2\%$$

$$W_3 = (0.250 \pm 0.004) \text{ л/с } \varepsilon = 2\%$$

Теперь построим графики для ухудшения вакуума:

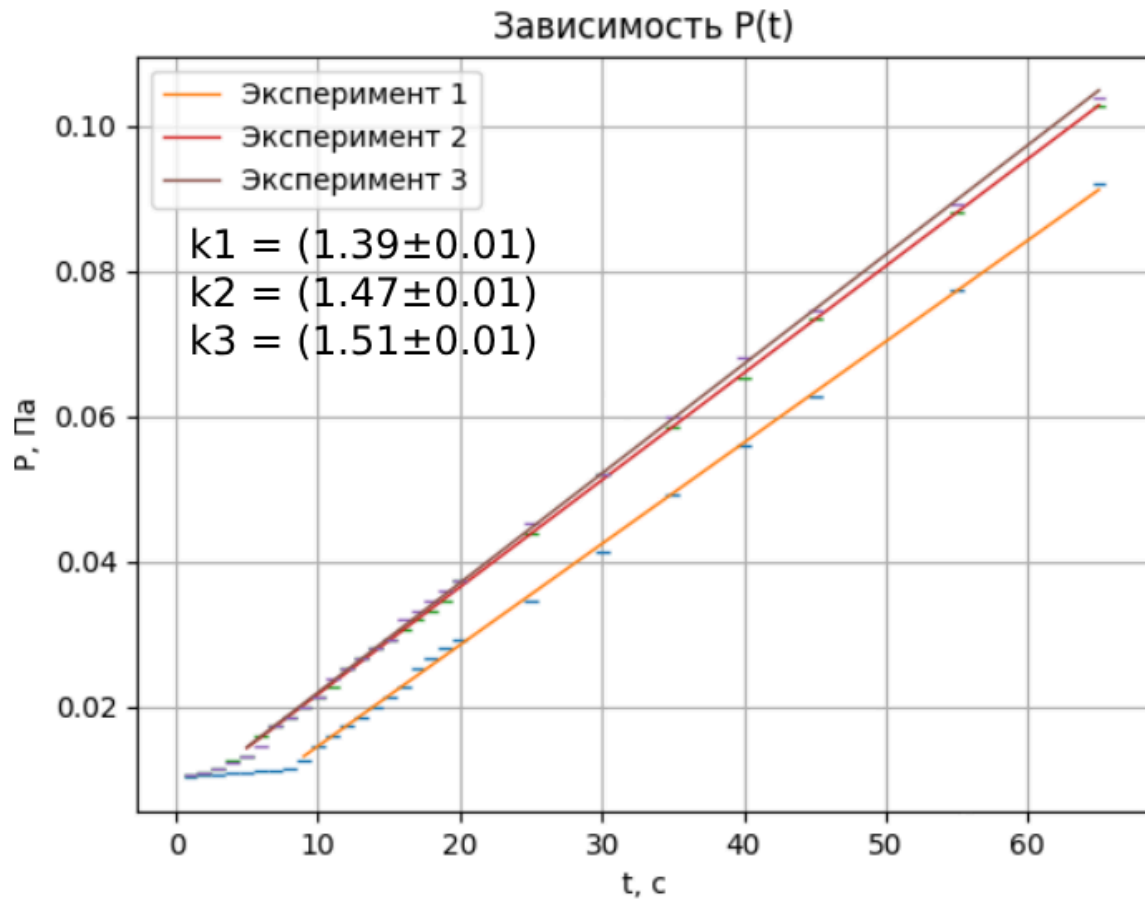


Рис. 7. График №2.

Формула для погрешности аналогичная.

В итоге имеем:

$$k_1 = (1.39 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \text{ (Па/с)}$$

$$k_2 = (1.47 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \text{ (Па/с)}$$

$$k_3 = (1.51 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \text{ (Па/с)}$$

Зная эти коэффициенты вычислим значения оттока газа $Q_n + Q_d$:

$$(Q_n + Q_d)_1 = k \cdot V_{\text{вв}} = 1.65 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

$$Q_d \ll Q_n, \text{ тогда : } Q_n + Q_d \approx Q_n$$

$$\sigma_{Q_{n1}} = \varepsilon_{k1} \cdot Q_{n1} = 0.01 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

Оценим пропускную способность трубы от вакуумного баллона, имея в виду порядка ее диаметра и длины и размерного множителя

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

используя формулу (6) имеем:

$$C_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \approx 1 \text{ л/с}$$

что отлично согласуется с полученным ранее значением W .

Рассчитаем производительность насоса еще одним способом: создав искусственную течь. Открываем кран $K6$ при включенном насосе и измеряем давление, установившееся при течи. Оно равно

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

Запишем (2) для данного случая:

$$P_{\text{пр}} W = Q_1, P_{\text{уст}} W = Q_1 + \frac{(PV)_{\text{капилляр}}}{dt}$$

С учетом (6) получаем

$$(P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}})W = \frac{4}{3} (d/2)^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{фв}}}{L}$$

где d и L — диаметр и длина капилляра, равные

$$d = 0,8 \text{ мм}, L = 108 \text{ мм}, P_{\text{фв}} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ торр}$$

Получаем

$$W = \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = 0,16 \text{ л/с}$$

Вывод.

Двумя способами была определена скорость откачки насоса, значения плохо согласуются между собой, возможно дело в том, что газ проходил несколько различные маршруты в этих двух методах. Также был получен отток газа при закрытом вакуумном сосуде.