

Получение и измерение вакуума

Каспаров Николай, Б01-304

May 2, 2024

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 различными манометрами: масляным, термопарным, ионизационным.

1 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). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

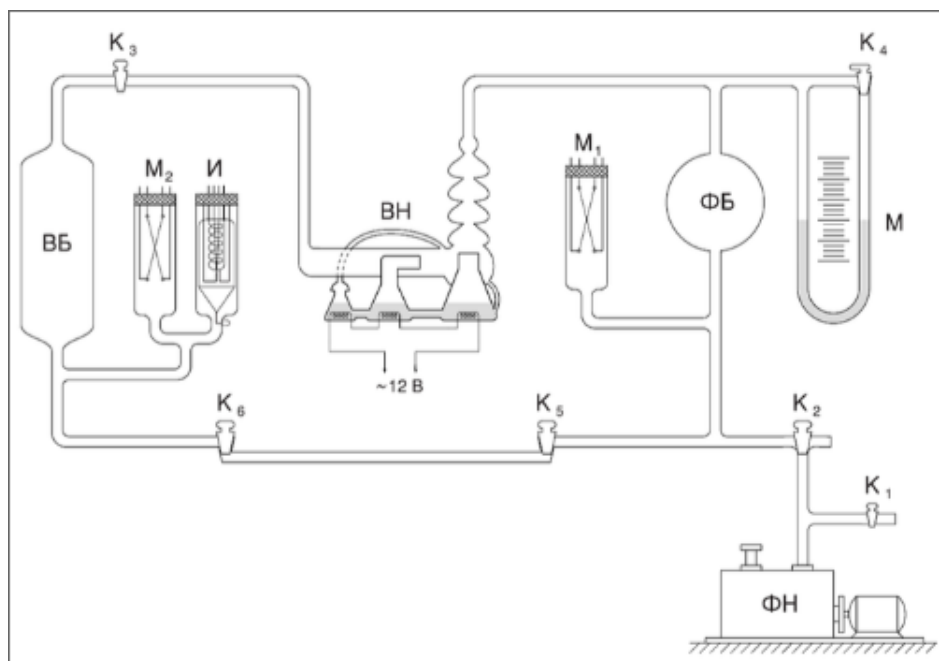


Рисунок 1: Схема установки

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.

Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на Рис. 2 (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе и вырываются из сопла. Струя паров увлекает молекулы газа,

которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку. Далее смесь попадает в вертикальную трубу. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом

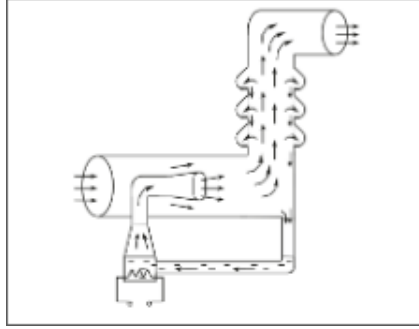


Рисунок 2: Схема насоса

1.1 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 воздухозаборной 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_i — количество газа, проникающего в единицу времени 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_i и Q_n в единицах PV (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя RT/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

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

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

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{pr}} \quad (3)$$

Обычно Q_i постоянно, а Q_n и Q_d слабо зависят от времени, поэтому в наших условиях все эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной скорость откачки W , получим:

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

где P_0 - начальное давление. Оно велико по сравнению с $P_{пр}$, поэтому можно записать:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (5)$$

Постоянная откачки $\tau = \frac{V}{W}$ является мерой эффективности откачной системы.

1.2 Течение газа 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. Течение газа в трубе напоминает в этих условиях диффузию газа из области больших концентраций в области, где концентрация ниже, причем роль длины свободного пробега

играет ширина трубы. Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L}. \quad (6)$$

Применим эту формулу к случаю, когда труба соединяет установку с насосом. Пренебрежем давлением P_1 у конца, обращенного к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении $P = P_2$. Пропускная способность трубы:

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}. \quad (7)$$

Мы видим, что пропускная способность зависит от радиуса трубы в третьей степени и обратно пропорциональна ее длине. Поэтому в вакуумных установках следует поэтому применять широкие короткие трубы.

2 Ход работы

2.1 Определение объёмов

Объём, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части при атмосферном давлении, откроем на форвакуумную часть. Запишем показания масляного манометра:

$$\Delta h_1 = (26.3 \pm 0.4) \text{ см} \quad (8)$$

Считая газ идеальным, можно записать:

$$V_{\text{фв}} = \frac{p_0 V}{\rho g \Delta h_1} = (2160 \pm 40) \text{ см}^3 \quad (9)$$

Откроем высоковакуумный баллон:

$$\Delta h_2 = (16.9 \pm 0.4) \text{ см} \quad (10)$$

Аналогично получим:

$$V_{\text{общ}} = (3360 \pm 80) \text{ см}^3 \quad (11)$$

$$V_{\text{вв}} = (1200 \pm 90) \text{ см}^3 \quad (12)$$

2.2 Измерение вакуума

Откачав установку диффузионным насосом, с помощью ионизационного манометра измерим значение предельного давления:

$$P_{\text{пр}} = (6.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.} \quad (13)$$

Теперь найдём скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума, для этого, открывая и закрывая кран 3, будем то подключать насос к объёму, то отключать его. Результаты зафиксируем на графике

Найдем коэффициенты наклона, используя МНК:

$$k_{\text{ухуд}} = (0.841 \pm 0.002) \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм рт. ст.}}{\text{с}} \quad (14)$$

$$k_{\text{улуч}} = (-0.196 \pm 0.002) \cdot 10^{-5} \frac{\ln(\text{мм рт. ст.})}{\text{с}} \quad (15)$$

Тогда, используя $W = -kV$, тогда:

$$W = (235 \pm 18) \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \quad (16)$$

Оценим величину потока газа $Q_{\text{н}}$.

$$(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = (1010 \pm 80) \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм. рт. ст.} \cdot \text{см}^3}{\text{с}} \quad (17)$$

Используя формулу $Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}} W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$, получим, что:

$$Q_{\text{н}} = (520 \pm 140) \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм. рт. ст.} \cdot \text{см}^3}{\text{с}} \quad (18)$$

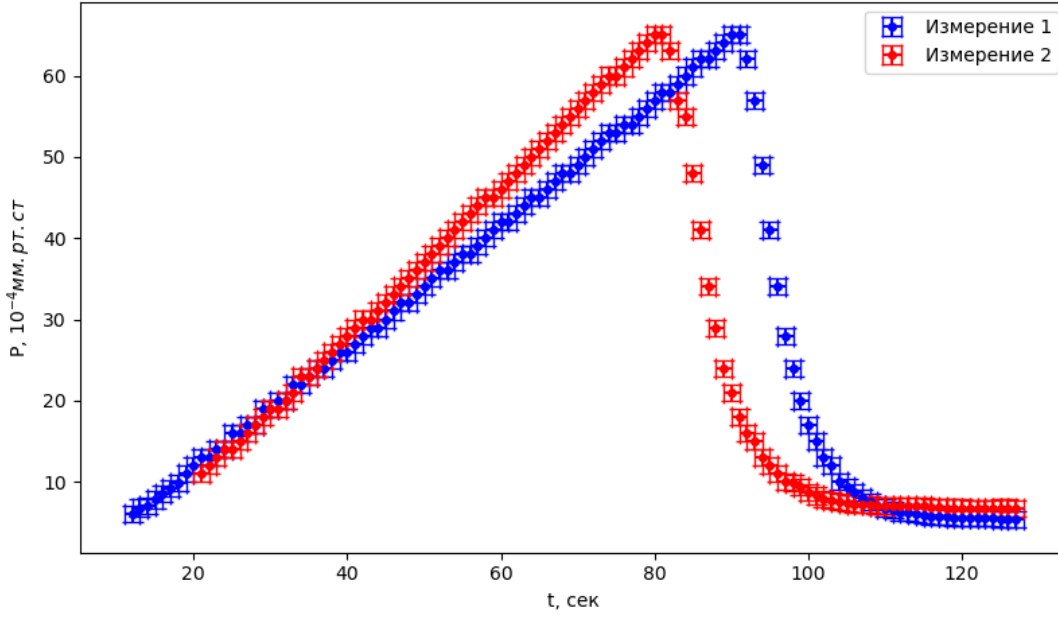


Рисунок 3: Зависимость давления от времени

2.3 Пропускная способность трубы

Оценим пропускную способность трубки:

$$L = 10.8 \text{ см}; \quad d = 0.8 \text{ мм}. \quad (19)$$

$$C_{\text{тр}} = 0.584 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}. \quad (20)$$

2.4 Искусственная течи

Введём в систему искусственную течь и запишем значение установившегося при этом давления и давления в форвакуумной части установки:

$$P_{\text{уст}} = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ мм. рт. ст.} \quad (21)$$

$$P_{\text{фв}} = (3.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ мм. рт. ст.} \quad (22)$$

Поскольку

$$P_{\text{пр}} W = Q_1, \quad P_{\text{уст}} W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}, \quad (23)$$

то

$$W = \frac{dV_{\text{кап}}}{dt} \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = (51 \pm 11) \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \quad (24)$$

3 Выводы

К сожалению, результаты сошлись лишь порядком. Это показывает несостоятельность второго метода измерения.

$$W_1 = (51 \pm 11) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

$$W_2 = (235 \pm 18) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

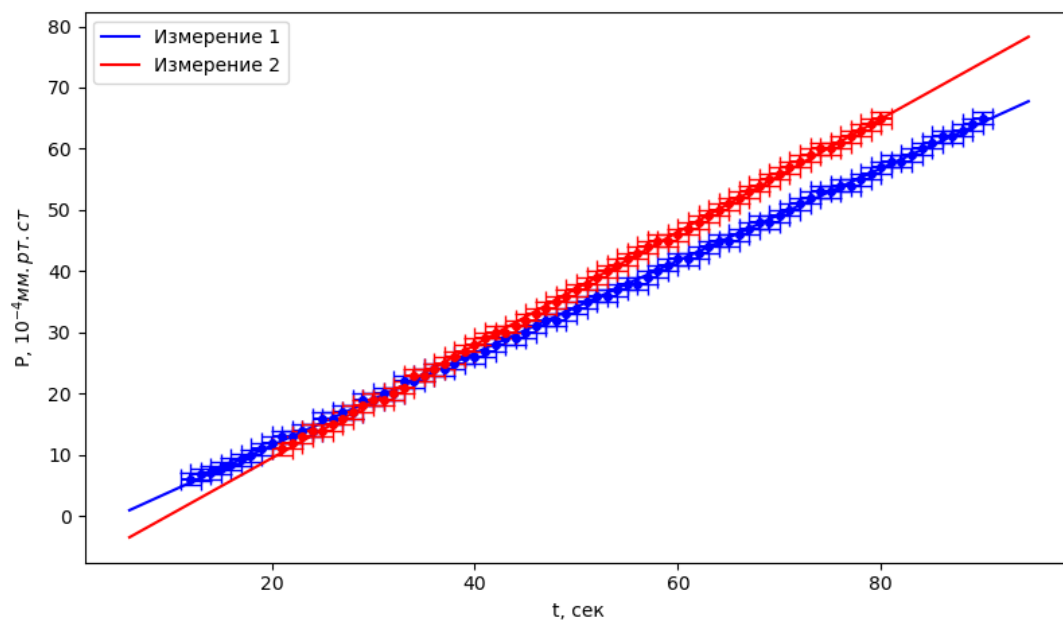


Рисунок 4: Зависимость давления от времени при ухудшении вакуума

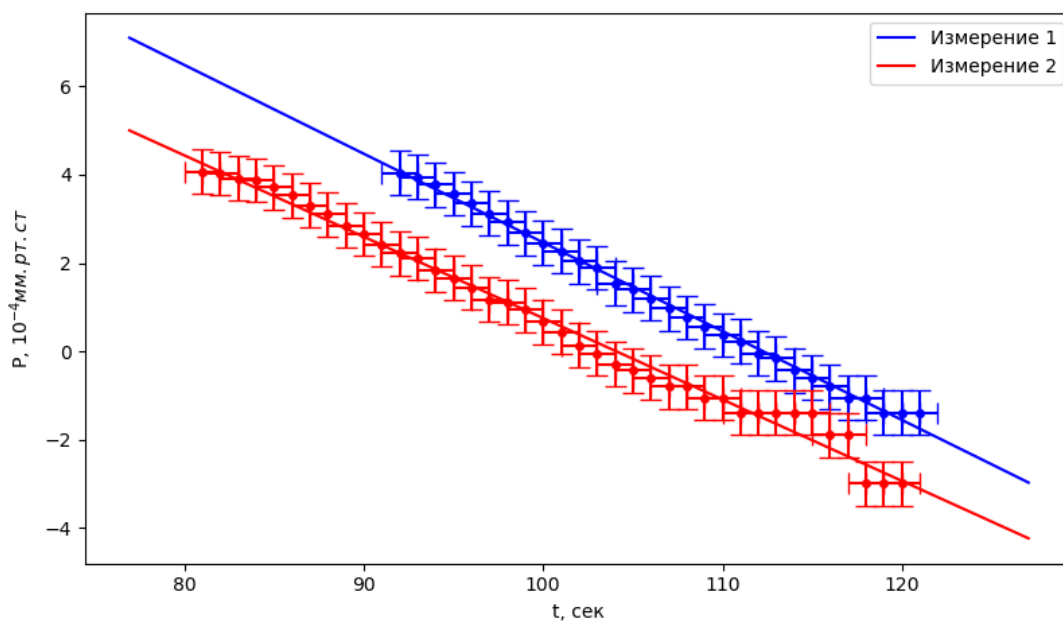


Рисунок 5: Зависимость давления от времени при улучшении вакуума