

Отчет о выполнении лабораторной работы

Получение и измерение вакуума

Лепарский Роман

18 апреля 2021 г.

1 Аннотация

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

2 Теоретические сведения

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

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i)dt$$

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})

$$\frac{dP}{dt} = 0$$
$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{pr}}$$

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 , уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P = P_o \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{pr}$$

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

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

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

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

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

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

При расчете вакуумных систем нужно принимать во внимание также пропускную способность отверстий, например, в кранах. Для них имеется формула

$$\eta = \frac{1}{4} S n < v >$$

где η — число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени, S — площадь отверстия, n — концентрация молекул перед отверстием, $<v>$ — средняя скорость молекул газа. С другой стороны, $\eta = dN/dt$, $N = PV/kT$, $n = P/kT$, и аналогично формуле для количества газа, покидающего установку при давлении P , получается пропускная способность отверстия

$$C_{otv} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{otv} = S \frac{<v>}{4}$$

Для диффузионного насоса можно считать, что каждая молекула воздуха, попавшая в кольцевой зазор между соплом и стенками насоса, увлекается струей пара и не возвращается обратно в откачиваемый объем. Скорость откачки такого насоса можно считать равной пропускной способности отверстия с площадью, равной площади кольцевого зазора, т. е. насос качает как кольцевой зазор, с одной стороны которого расположен откачиваемый объем, а с другой — пустота.

3 Экспериментальная установка

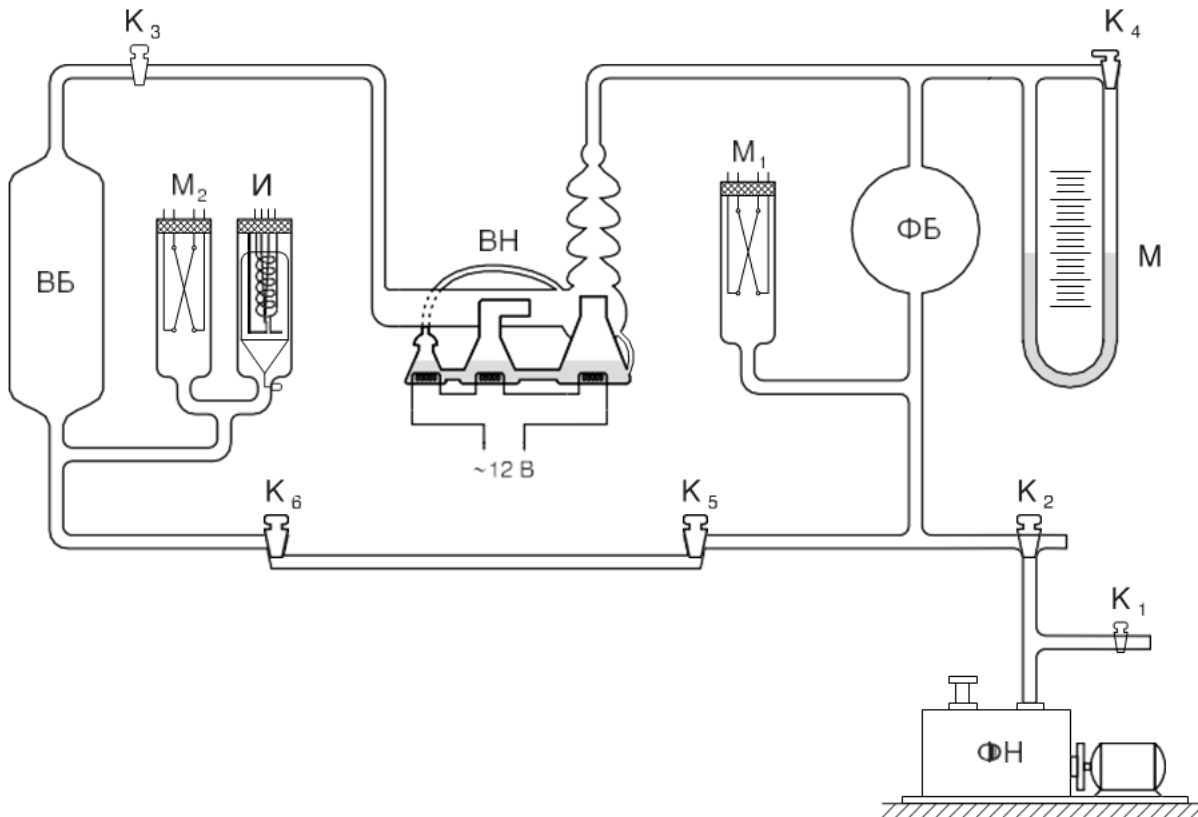


Рис. 1: Схема установки

установка включает в себя краны K_1, \dots, K_6 , форвакуумный баллон, высоковакуумный диффузионный насос, высоковакуумный баллон, разного вида манометры, форвакуумный насос.

Принцип действия форвакуумного ротационного насоса представлен на следующей схеме:

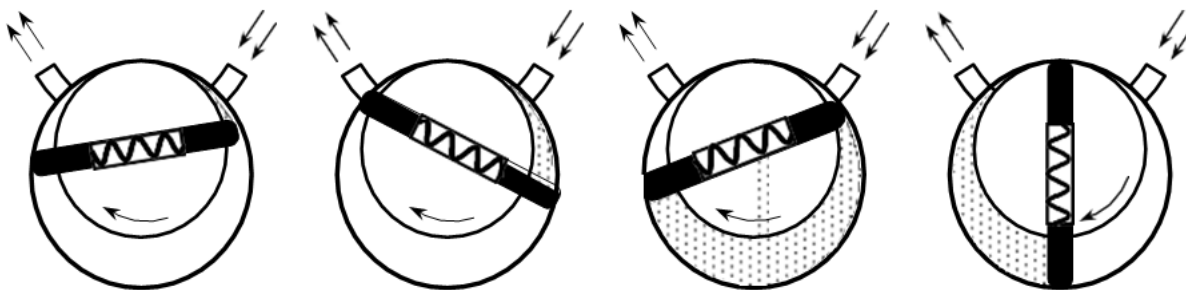


Рис. 2:

После включения этого насоса нужно дождаться, пока он откачает собственный объем, а только потом подключать его к установке.

Диффузионный насос работает по следующему принципу:

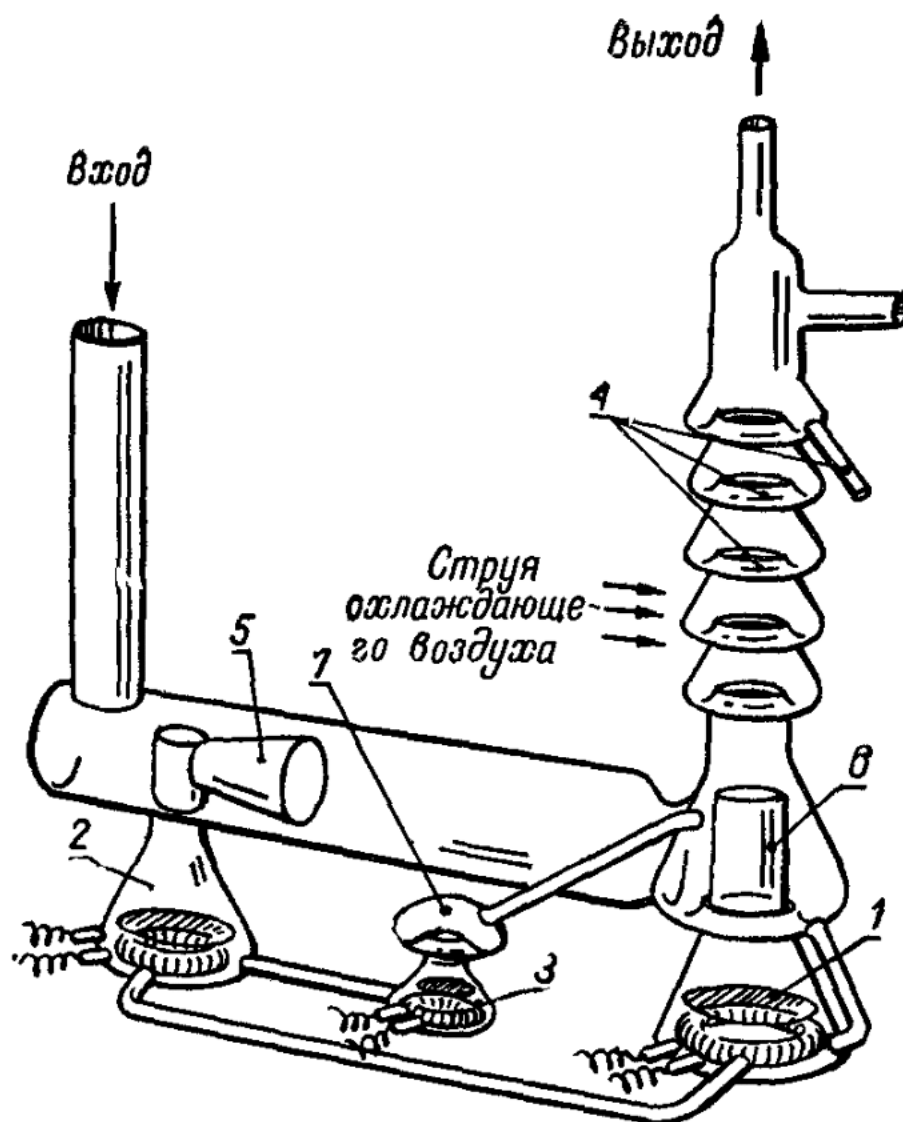


Рис. 3: Диффузионный насос

Молекулы газа, попадая в поток масляных паров, увлекаются им и не могут попасть обратно. Этот эффект оказывает сильное откачивающее воздействие на газ в сосуде. Диффузионный насос работает более эффективно, когда длина свободного пробега молекул примерно равна зазору между трубкой и соплом (5).

В установке используются несколько видов манометров. U-образный не представляет никакого интереса, поэтому перейдем сразу к описанию термоманометра:

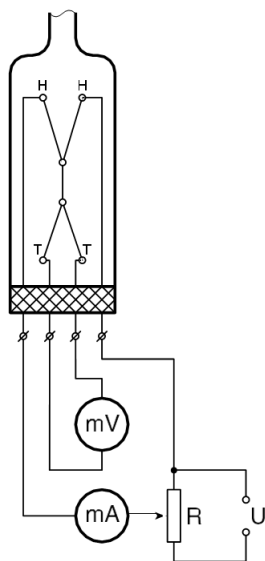


Рис. 4: Термопарный манометр

Через нить накаливания пропускается ток, регулируемый потенциометром R , а с помощью термопары измеряется нагрев нити, который зависит в том числе от давления газа. Характеристику данной термопары можно увидеть на графике:

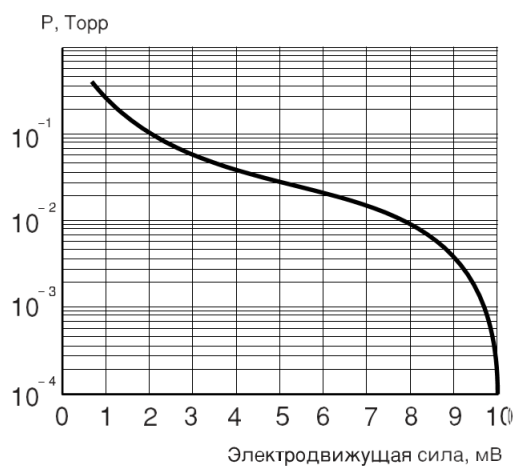


Рис. 5: Характеристика термопары

Рассмотрим принцип работы ионизационного манометра:

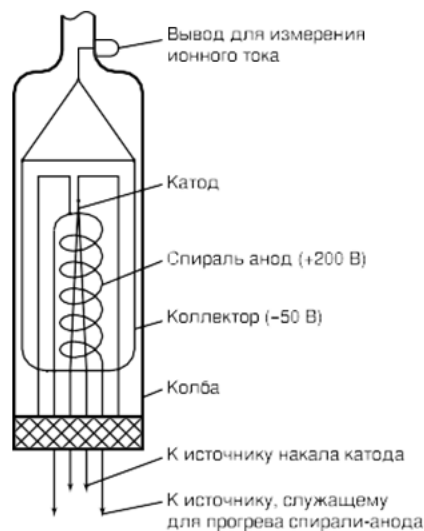


Рис. 6: Ионизационный манометр

Электроны, выпускаемые катодом, прежде чем осесть на аноде успевают ионизировать воздух в колбе. Затем, ионы воздуха оседают на коллекторе. Измеряя ток, образованный ионизированным воздухом, можно определить его давление.

4 Приборы и материалы

В работе используются:

- Вакуумная установка;
- Масляный манометр;
- Термопарный манометр;
- Ионизационный манометр.

5 Обработка результатов

Запишем результаты измерений для нахождения объемов установки

Рассчитав по закону Бойля-Мариотта ($P_1/P_2 = V_2/V_1$) объемы форвакуумной и высоковакуумной части, получим:

$$V_{\text{фв}} = 2,23 \pm 0,02 \text{ л}$$

$$V_{\text{вв}} = 1,31 \pm 0,01 \text{ л}$$

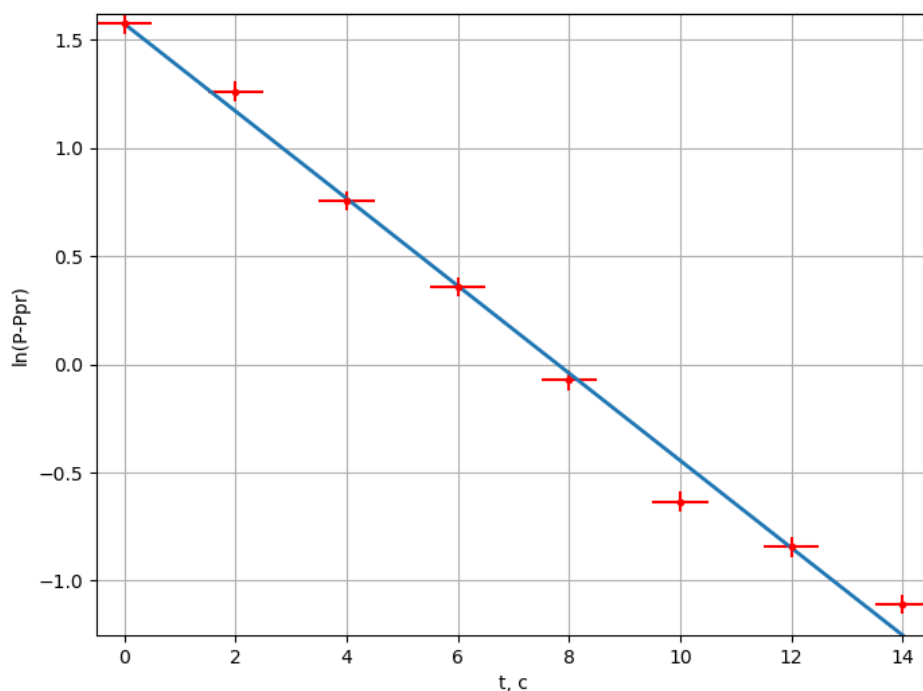


Рис. 7: $k = -0.201 \pm 0.007 \text{ 1/c}$

Включим установку. Откачаем ее форвакуумным насосом, а затем диффузионным насосом добьемся высокого вакуума. С помощью ионизационного манометра измерим предельное значение давления.

$$P_{pr} = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$$

Запишем зависимость улучшения вакуума от времени:

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14
P, 10^{-4} Торр	5,6	4,3	2,9	2,2	1,7	1,3	1,2	1,1
$\ln(P - P_{pr})$	1,57	1,26	0,75	0,35	-0,07	-0,63	-0,84	-1,10

Построим по этим значениям график и найдем коэффициент наклона:

Найдем скорость откачки:

$$\ln\left(\frac{P - P_{pr}}{P_0 - P_{pr}}\right) = -\frac{W}{V}t \Rightarrow W = -kV = 0.263 \pm 0.009 \text{ л/с}$$

Запишем зависимость $P(t)$ при ухудшении вакуума:

t, c	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
P, 10^{-4} Торр	2,9	3,3	3,7	4,1	4,5	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2

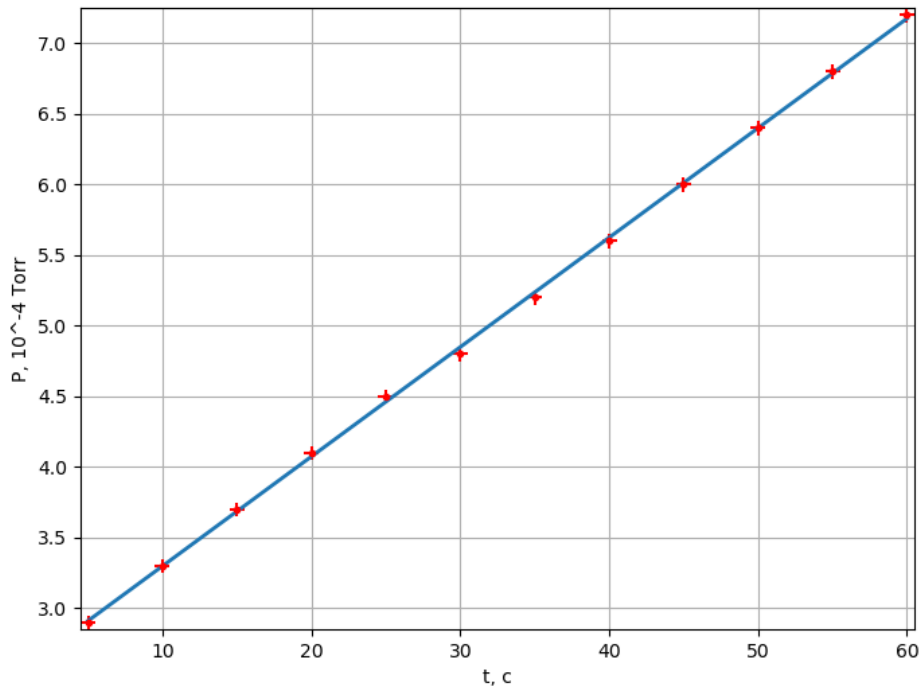


Рис. 8: $k = (0.0775 \pm 0.0004) \cdot 10^{-4} \text{ Torr/c}$

Теперь воспользуемся следующими формулами:

$$P - P_{pr} = \frac{Q_d + Q_i}{V} t$$

$$W = \frac{\sum Q}{P_{pr}}$$

Отсюда

$$Q_n = W P_{pr} - (Q_d + Q_i) = (10,098 \pm 0,007) \cdot 10^{-6} \text{ Torr*л/с}$$

Создадим в установке течь и запишем установившееся давление и давление форвакуумной части.

$$P_{уст} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$$

$$P_{фв} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$$

Воспользуемся следующими формулами:

$$\begin{aligned}
P_{pr}W &= \sum Q \\
P_{уст} &= \sum Q + \frac{d(PV)}{dt} \\
\frac{d(PV)}{dt} &= \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{фв} - P_{уст}}{L}
\end{aligned}$$

Отсюда найдем W

$$W = 0.252 \pm 0.02 \text{ л/с}$$

6 Вывод

С помощью данной установки нам удалось получить вакуум с максимальным разряжением $7.7 \cdot 10^{-5}$ Торр. Также мы нашли скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума ($W = 0.263 \pm 0.009$ л/с), а так же в стационарном режиме ($W = 0.259 \pm 0.02$ л/с). Как мы можем видеть, значения совпадают с учетом погрешности, однако метод с улучшением вакуума дает более точный результат, что может быть следствием большего количества измерений.