

# Лабораторная работа 2.3.1

## Получение и измерение вакуума

Журавлёв Максим

20.02.25

Цель работы:

- 1) Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки
- 2) Определение скорости откачки системы в стационарном режиме, по ухудшению и улучшению вакуума

---

При рассмотрении диффузии, теплопроводности, вязкости газы считают сплошными средами (основное влияние на движение частиц газа оказывают их столкновения между собой). Однако при рассмотрении ситуаций, для которых число Кнудсена ( $Kn = \frac{\lambda}{d}$ ) порядка 1 и больше, частицы чаще сталкиваются со стенками сосуда.

Рассмотрим течение разреженного газа по трубе радиуса  $r$ . Пусть молекулы взаимодействуют только со стенками, тогда примем длину свободного пробега  $\lambda = 2r$ . Применим основное уравнение диффузии:

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{dn}{dx} S$$

Для стационарного течения  $\frac{dN}{dt} = const$ , тогда  $\frac{dn}{dx} = \frac{n_1 - n_2}{L}$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{2}{3} r^3 \frac{n_1 - n_2}{L} \sqrt{\frac{8RT\pi}{\mu}}$$

Получили ф-лу Кнудсена. Учитывая, что  $dM = m dN$ , найдём массу газа, протекающего через трубу в единицу времени

$$\frac{dM}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \frac{n_1 - n_2}{L} \sqrt{2\pi m k T} = \frac{4}{3} r^3 \frac{P_1 - P_2}{L} \sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}$$

При вакуумных измерениях  $\frac{dM}{dt}$  считают в единицах  $PV$ ,  $dM = d(PV) \frac{\mu}{RT}$

Для вязкого газа (сплошная среда) расход массы пропорционален  $r^4$ , а для разреженного  $r^3$ .

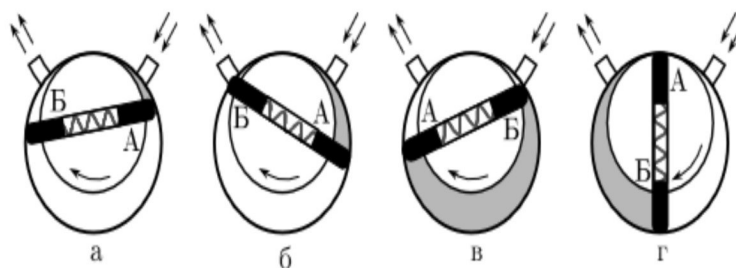
## Вакуум

Различают 3 степени разреженности газа. Низкий вакуум ( $10^{-2} - 10^{-3}$  торр), высокий вакуум ( $10^{-4} - 10^{-7}$  торр), сверхвысокий вакуум ( $10^{-8} - 10^{-11}$  торр). низкий вакуум переходит в высокий, если  $Kn \sim 1$ . В работе будут исследоваться как низкий вакуум (с помощью форвакуумного насоса), так и высокий (диффузионный масляный насос)

### Установка А

Откачка воздуха происходит с помощью форвакуумного и диффузионного насосов

#### Форвакуумный насос

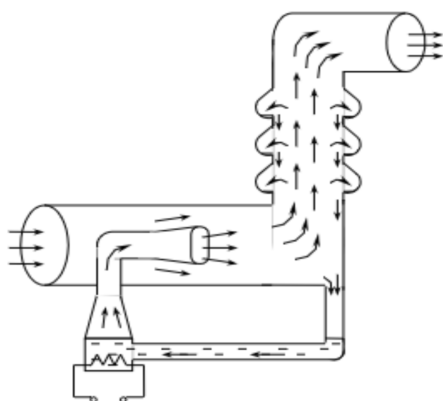


Форвакуумный насос состоит из ротора, диаметрально разделённого двумя пластинами (А и Б). При повороте ротора, в зависимости от положения пластин, через один клапан газ поступает в полость между А и Б, через другой выпускается.

Перед работой насос должен сначала откачать собственный объём. После работы насоса важно запустить в него атмосферу

#### Диффузионный насос

Работа диффузионного насоса построена на увлечении молекул газа парами масла.



Масло подогревается так что его пары поднимаются и вырываются из сопла. Струя паров увлекает молекулы газа в трубе до попадания в вертикальную трубу, из которой газ откачивается форвакуумным насосом, а масло осаждается на стенках и стекает вниз, обратно в исходный сосуд.

Если зазор между соплом и стенками трубы порядка длины свободного пробега, то молекулы газа через этот зазор увлекаются наиболее эффективно, так как все молекулы оказавшиеся в сечении зазора уже не меняют направления свое скорости.

В установке используется диффузионный насос, работающий в 2 ступени (вертикальная и горизонтальная)

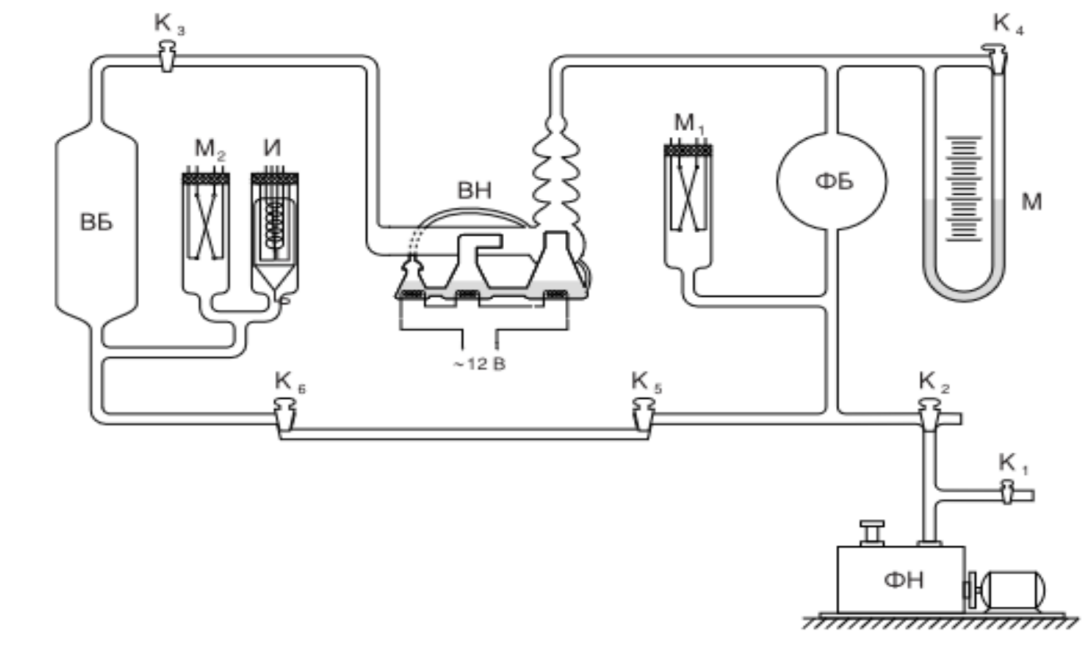
### Экспериментальная установка

Схема состоит из: 1) Форвакуумного насоса(ФН), форвакуумного балона(ФБ), манометра 1(М1), масляный манометр(М) - для получения низкого вакуума.

2)Высоковакуумного насоса(ВН), высоковакуумного балона(ВБ), манометра 2(М2), ионизационного балона(И) - для высокого вакуума

Манометры М1 и М2 образуют термопару. Система регулируется с помощью кранов(К), соединяющих части установки

### Схема установки



### Как происходит откачка

Определим производительность насоса как  $W = \frac{dV}{dt}$  (при данном давлении - объём газа удаляемого из сосуда).  
Общее кол-во газа покидающего "откачиваемый объём" определяется помимо мощности насоса: десорбцией с поверхностью, проникновением газа через течи и проникновением газа обратно из насоса. Тогда, записывая в единицах PV изменение кол-ва газа:

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

Считая  $Q_n$  постоянной, а  $Q_d, Q_h$  независимыми от времени, проинтегрируем

$$P - P_{\text{предел}} = (P_0 - P_{\text{предел}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right)$$

считая  $P_{\text{предел}}$ :  $\frac{dP}{dt} = 0$  пренебрежимо малым по сравнению с начальным давлением:

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

Здесь величина  $\frac{V}{W}$  - постоянна, она характеризует *время*, за которое удастся откачать систему до около предельного давления

Скорость откачки системы ( $W$ ) определяется не только действием самого насоса, но и проводимостью кранов, трубок и иных частей системы

Рассматривая откачивающую установку можно ввести аналогию с электрической цепью, поток газа отождествить с силой тока.

В таком случае пропускная система системы определяется аналогично проводимостям элементов в электрической цепи (для последовательного соединения)

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_H} + \frac{1}{C_1} + \dots$$

здесь за  $C_i$  обозначены пропускные способности элементов установки

### Определение параметров компонентов

В условиях высокого вакуума характер течения в основном зависит от столкновений молекул газа со стенками сосуда (длина свободного пробега в таком случае -  $2r$ ). В данных условиях для трубы радиуса  $r$

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

Пренебрежём давлением  $P_1$  в откачиваемом объёме и определим изменение объёма при давлении  $P_2$

$$C_{\text{трубы}} = \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$$

Так как длина свободного пробега в высоком вакууме порядка  $r$ , то для диффузионного насоса каждая молекула попавшая в зазор между соплом и стенками трубы увлекается парами. Тогда скорость откачки насоса можно считать как пропускную способность некоторого отверстия площади зазора.

Для проводимости отверстий нетрудно получить

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} S n v$$

$$C_{\text{отв}} = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{4} S v$$

## Измерения

Измерим объём форвакуумной и высоковакуумной частей установки. Для этого дадим запёртому в установке воздуху при атмосферном давлении расширяться сначала в форвакуумную часть установки, затем в высоковакуумную. Воспользуемся законом Бойля-Мариотта:  $PV = const$

$$V_0 = 50 \text{ cm}^3 \quad P_{\text{атм}} = 100.76 \text{ КПа}$$

Получили:

$$V_{\text{фвм}} = 2,15 \text{ л} \quad V_{\text{ввм}} = 1,23 \text{ л}$$

Оценим производительность насоса. Проведём 2 эксперимента по ухудшению и улучшению вакуума

После отключения вакуума от насоса краном 3, вакуум ухудшился до давления  $8 \cdot 10^{-4}$  тор. Затем вв балон снова подключается к насосу.

Ожидаемая экспоненциальная зависимость давления от времени в процессе откачки изображена на графике  $\ln P(t)$ .

Здесь коэффициент угла наклона определяется производительностью насоса, которую выразим из

$$P = P_0 e^{-\frac{W}{V}t}$$

$$k = -0.14, W = 0.17 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Полученную скорость откачки можно использовать в равенстве:

$$P_{\text{пр}} W = Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{н}}$$

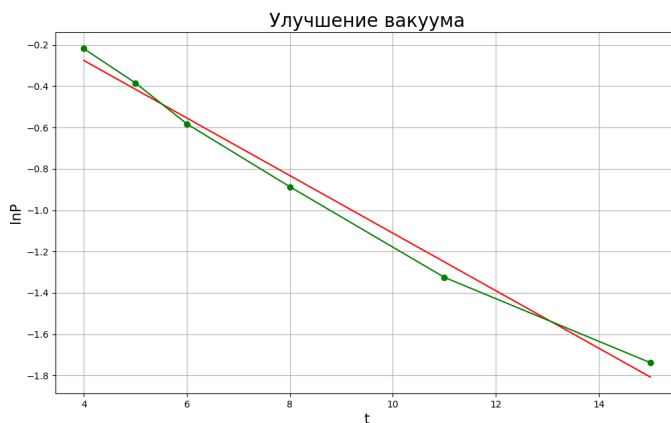


Рис. 1:  $\ln(\frac{P}{P_0})$ ;  $t, c$

Для ухудшения вакуума отключим вв балон от насоса с помощью крана 3.

В этом случае

$$V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}) dt$$

Определим  $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}})$  как коэффициент угла наклона  $p(t)$ , с учётом предыдущего равенства.

$$k = 0.71 \cdot 10^{-5}, (Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}) = 0.87 \cdot 10^{-5} \frac{PV}{c}$$

Предельное давление -  $6 \cdot 10^{-5}$  тор

$$Q_{\text{н}} = 0.15 \cdot 10^{-5} \frac{\text{тор} \cdot \text{л}}{c}$$

Полученное значение в 6 раз меньше количества воздуха, откачиваемого насосом в секунду при данном давлении, это значит насос действительно забирает из откачиваемого объёма воздуха больше, чем через него уходит обратно

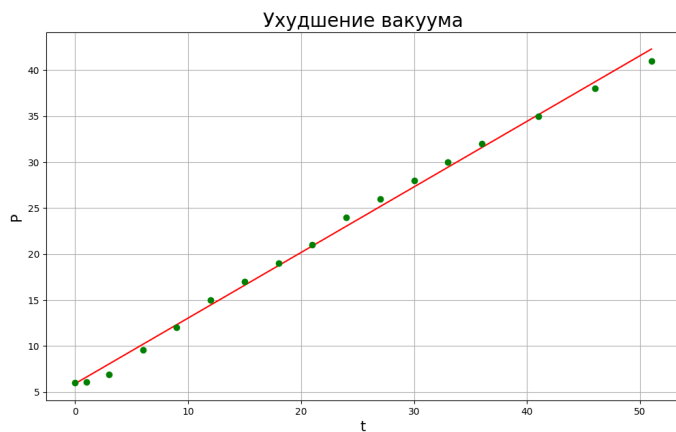


Рис. 2:  $P, 10^{-5} \text{ тор}$ ;  $t, c$

### Течение воздуха через капилляр

$$\frac{d(PV)}{dt} = P_{\text{уст}}W - P_{\text{пр}}W$$

$P_{\text{уст}} = 10^{-4}$  тор - установившееся давление после открытия крана К5

$$\frac{d(PV)}{dt} = 8.5 * 10^{-7} \frac{\text{тор} * \text{л}}{\text{с}}$$

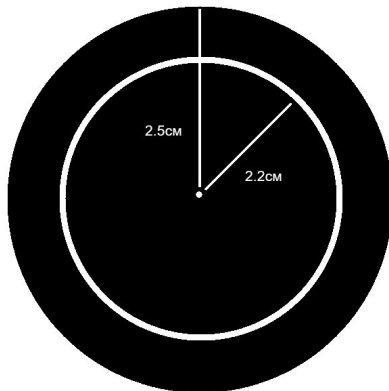
Сравним со значением, полученным теоретически для течения через трубку в кнудсеновском режиме

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

$$\frac{d(PV)}{dt} = 6.4 * 10^{-8} \frac{\text{тор} * \text{л}}{\text{с}}$$

Оценим пропускную способность насоса в отдельности от системы. В силу устройства диффузионного насоса его скорость откачки можно считать как пропускную способность отверстия площади  $S$ .

$$C_{\text{отв}} = S \frac{v}{4}$$



$$S \approx 4.4 \text{ cm}^2 \quad \frac{v}{4} \approx 11 \frac{\text{л}}{\text{с} * \text{cm}^2}$$

$C \equiv W_{\text{насоса}} = 48.7 \frac{\text{л}}{\text{с}}$ . Можно заметить, что производительность откачивающей системы в данном случае в меньшей степени зависит от мощности насоса и в большей от проводимости составляющих её элементов (трубы, кран).

### Отчёт

- 1) С помощью диффузионного насоса был получен высокий вакуум с предельным давлением  $6 * 10^{-5}$  тор.
- 2) Давление в откачиваемом объёме экспоненциально зависит от времени (нарушается при значениях близких к предельному)
- 3) Получено аналитическое значение производительности насоса. Как оказалось, на производительность системы в большей степени влияет пропускная способность труб и крана, соединяющих насос и откачиваемый объём