

# Задача 2.3.1.

## Получение и измерение вакуума

Лось Денис (группа 611)

26 февраля 2017

**Цель работы:** измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки, определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума.

**В работе используются:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

### Экспериментальная установка

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона(ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса(ВН), высоковакуумного баллона(ВБ), масляного(М) и ионизационного(И) манометров, термомпарных манометров(М1 и М2), форвакуумного насоса(ФН) и соединительных клапанов. Кроме того, в состав установки входят: вариатор(автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат, и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

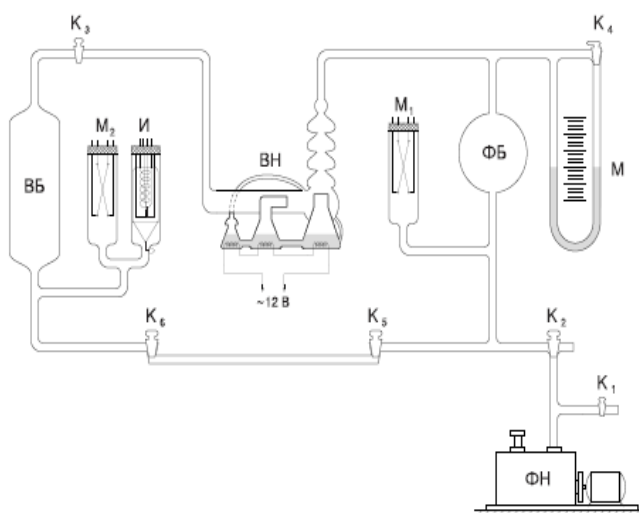


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

## Ход работы

1. Откачаем установку до давления  $P_{\text{отк}} = 7 \cdot 10^{-3}$  торр с помощью форвакуумного насоса. Далее откроем кран  $K_5$  и позволим  $V_{\text{зап}} = (40 \pm 2) \text{ см}^3$  запертого воздуха распространиться по всему объёму форвакуумной части установки. Давление в ней повысится, поэтому измерим с помощью масляного манометра разность первоначального давления в форвакуумной части установки  $P_{\text{отк}}$  и полученного давления  $P_1$  после распространения запертого воздуха по форвакуумной части. Атмосферное давление  $P_0 = 97600 \text{ Па}$ .

В силу уравнения Менделеева - Клапейрона для запертого воздуха:

$$P_0 V_{\text{зап}} = \nu_1 RT$$

Для воздуха, находящегося в форвакуумной части установки:

$$P_{\text{отк}} V_{\text{фв}} = \nu_2 RT$$

Тогда после того как запертый воздух распространится по всему объёму форвакуумной части:

$$P_1 (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}}) = (\nu_1 + \nu_2) RT = P_0 V_{\text{зап}} + P_{\text{отк}} V_{\text{фв}},$$

а значит,

$$V_{\text{фв}} = \frac{(P_0 - P_1) V_{\text{зап}}}{P_1 - P_{\text{отк}}} \approx \frac{P_0 V_{\text{зап}}}{P_1} - V_{\text{зап}}$$

В нашей установке  $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  — плотность масла.

Так как  $\Delta h_{\text{фв}} = (18.5 \pm 0.1) \text{ см}$ , то

$$V_{\text{фв}} = (2.35 \pm 0.02) \text{ л}$$

Откроем кран  $K_3$ , чтобы газ, занимавший до сих пор только форвакуумную часть установки, заполнил и её высоковакуумную часть. Найдя установившееся давление  $P_2$  с помощью масляного манометра, найдём полный объём установки  $V_{\text{полн}}$  и объём высоковакуумной части  $V_{\text{вв}}$ .

Из уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$\begin{aligned} P_1 (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}}) &= \nu_0 RT \\ P_2 (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}} + V_{\text{вв}}) &= \nu_0 RT = P_1 (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}}) \end{aligned}$$

Тогда

$$V_{\text{вв}} = \frac{(P_1 - P_2) (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}})}{P_2}$$

Так как  $\Delta h_{\text{вв}} = (10.5 \pm 0.1) \text{ см}$ , то

$$V_{\text{вв}} = (2.36 \pm 0.03) \text{ л}$$

Значит, полный объём установки:

$$V_{\text{полн}} = (4.75 \pm 0.04) \text{ л}$$

2. Начнём откачивать установку форвакуумным насосом, далее после того как давление упадёт ниже  $3 \cdot 10^{-2}$  торр, закроем кран  $K_6$  и начнём высоковакуумную откачку. Включив ионизационный манометр, измерим предельное давление в системе  $P_{\text{пр}}$  :

$$P_{\text{пр}} = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

3. Найдём скорость откачки по улучшению вакуума во время откачки. Для этого отключим откачку высоковакуумного баллона краном  $K_3$  и подождём, пока вакуум достаточно ухудшится. Далее откроем кран  $K_3$  и начнём отмечать изменение показаний ионизационного манометра во времени.

$t, \text{ с}$	1	2	4	6	7	10	15
$P \cdot 10^{-4} \text{ торр}$	4.2	3.4	2.8	2.4	2.2	2.0	1.9
$\ln(P - P_{\text{пр}})$	-3.21	-3.53	-3.85	-4.14	-4.32	-4.54	-4.67

Таблица 1: Изменение показаний ионизационного манометра во времени

Так как  $P - P_{\text{пр}} = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right)$ , где  $P_0$  — начальное давление, то:

$$\ln(P - P_{\text{пр}}) = \ln P_0 - \frac{W}{V} \cdot t$$

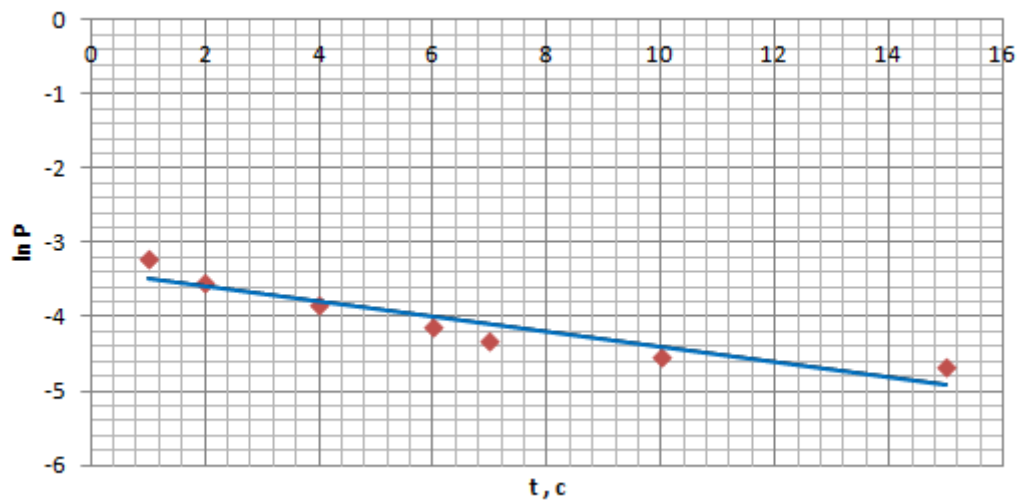


Рис. 2: График изменения показаний ионизационного манометра во времени

Коэффициент наклона графика:

$$k = (0.13 \pm 0.03)$$

А следовательно, скорость откачки:

$$W = (0,31 \pm 0.07) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

4. Перекроем кран  $K_3$  и прекратим таким образом откачку высоковакуумной части системы, далее при помощи высоковакуумного вакуумметра и секундомера будем следить за тем, как ухудшается вакуум.

$t, \text{с}$	6	11	19	28	34	38	45
$P \cdot 10^{-4} \text{ торр}$	2.2	3.0	4.0	4.8	5.4	5.8	6.6

Таблица 2: Изменение показаний ионизационного вакуумметра во времени

Уравнение, описывающее процесс откачки в данном случае:

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

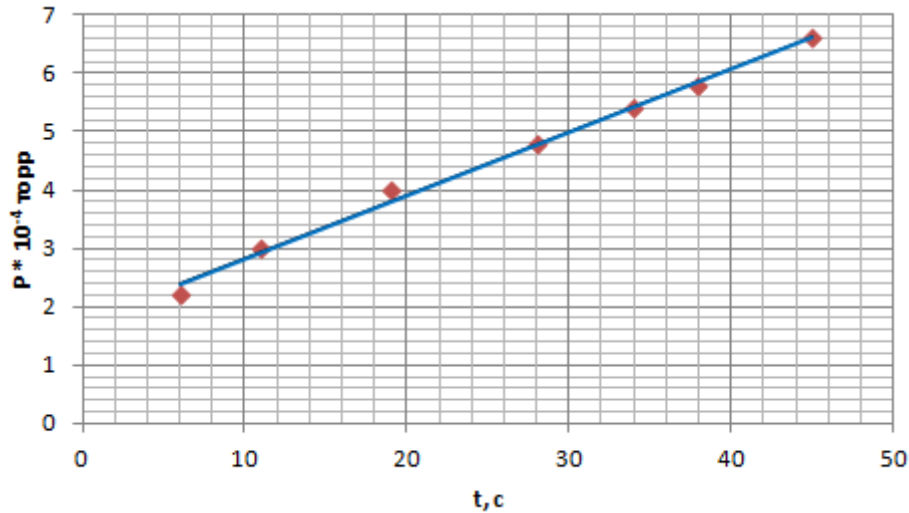


Рис. 3: График изменения показаний ионизационного вакуумметра во времени

Однако при этом  $P_{\text{пр}}W = Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}$ , а значит,

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}}W - V_{\text{вв}}k,$$

где  $k = (0.109 \pm 0.009) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{торр}}{\text{с}}$  — коэффициент наклона графика.

Получается, что

$$Q_{\text{н}} = (1.4 \pm 0.6) \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

5. Открыв кран  $K_6$  и введя таким образом в прибор искусственную течь, мы заметим, что вакуум будет ухудшаться. Установившееся давление:

$$P_{\text{уст}} = (6.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

6. Рассчитаем производительность насоса по различию  $P_{\text{уст}}$  и  $P_{\text{пр}}$ . Для этого найдём количество газа, протекающего через капилляр:

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

При отсутствии течи ( $P = P_{\text{пр}}$ ):

$$P_{\text{пр}} W = Q,$$

где  $Q$  — воздухопотери установки.

Тогда стационарное состояние установки с течью ( $P = P_{\text{уст}}$ ) :

$$P_{\text{уст}} W = Q + \left( \frac{d(PV)}{dt} \right)_{\text{капилл}} = P_{\text{пр}} + \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{фв}} - P_{\text{уст}}}{L}$$

Следовательно,

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

Значит, так как  $d_{\text{кап}} = 0.9$  мм и  $L_{\text{кап}} = 58$  мм

$$W = (2.5 \pm 0.9) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$