

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа № 2.3.1  
**Получение и измерение вакуума**

Комкин Михаил  
Группа Б01-303

Долгопрудный, 2023 г.

# 1 Аннотация

В работе измеряются объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки, определяется скорость откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению режима. Для этого используется вакуумная установка с тремя различными манометрами: масляным, термодарным и ионизационным.

## 2 Экспериментальная установка

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса: 1) низковакуумные до  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  торр; 2) высоковакуумные -  $10^{-3}$ - $10^{-7}$  торр; 3) установки сверхвысокого вакуума  $10^{-8}$ - $10^{-11}$  торр. С физической точки зрения низкий вакуум характерен крайней важностью процессов адсорбции и десорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

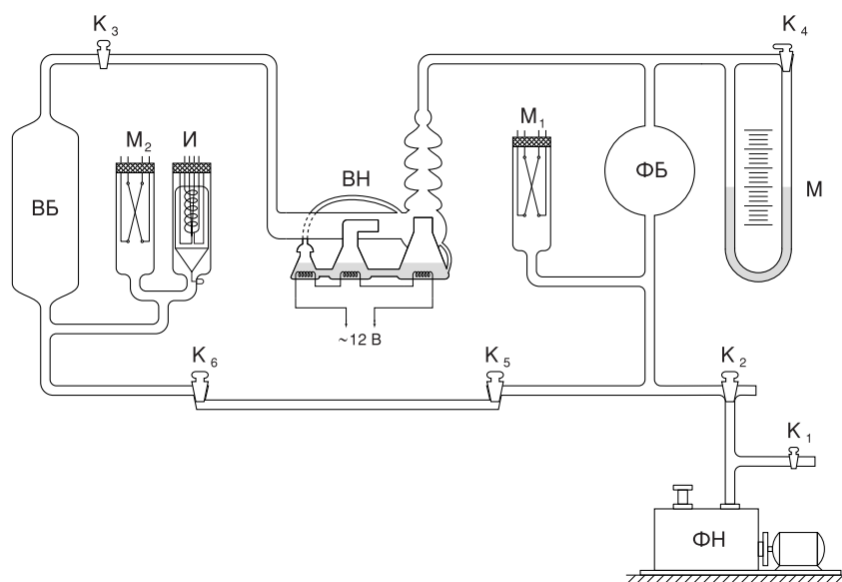


Рис. 1: Схема установки

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 К1, К2, ..., К6 (рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

## 3 Теоретические сведения

### 3.1 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  $RT/\mu$  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  $W$ , уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P = P_o \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{pr}. \quad (4)$$

### 3.2 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

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L}. \quad (5)$$

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

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

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

$$\nu = \frac{1}{4} S n \bar{v}, \quad (7)$$

где  $\nu$  - число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени,  $S$  - площадь отверстия,  $n$  - концентрация молекул перед отверстием,  $\bar{v}$  средняя скорость молекул газа. С другой стороны,  $\nu = dV/dt$ ,  $N = PV/kT$ ,  $n = P/kT$ , и аналогично по формуле (6) для количества газа покидающего установку при давлении  $P$ , получается пропускная способность отверстия

$$C_{otv} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{otv} = S \frac{\bar{v}}{4}. \quad (8)$$

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 объём. 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 объём, а с другой - пустота.

## 4 Модель эксперимента

### 4.1 Определение объема форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Перед началом работы проверим, что все краны приведены в правильное положение.
2. Запустим воздух в систему (для этого нужно открыть кран К2 и подождать пару минут пока воздух заполнит установку).
3. Запустим форвакуумный насос. Вначале он должен откачать воздух из себя самого, затем из установки.

Продолжим откачку до того момента пока давление не достигнет  $10^{-2}$  торр.

4. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объём, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части, откроем на всю форвакуумную часть. Тогда давление изменится
5. Запишем показания масляного манометра, а именно высоту масла в обоих коленях:

$$h_{up1} = (38.4 \pm 0.1) \text{ см} \quad h_{low1} = (11.7 \pm 0.1) \text{ см.} \quad (9)$$

$$h_{up2} = (38.3 \pm 0.1) \text{ см} \quad h_{low2} = (11.6 \pm 0.1) \text{ см.} \quad (10)$$

$$\sigma_{otd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{sr})^2} \quad \sigma = \frac{\sigma_{otd}}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{h1}^2 + \sigma_{h2}^2} \approx 3.5 \% \quad \Delta h = (26.7 \pm 1.0) \text{ см.} \quad (12)$$

6. Зная объем "запертой" части установки  $V = 50 \text{ }^3$  и используя соотношение  $P_A V = P_2 V_2$  вычислим объем форвакуумной части установки. При этом давление  $P_1 = P = (98.4 \pm 0.1)$   $P_2 = \rho g \Delta h$ , а относительная погрешность полученного значения равна относительной погрешности величины  $\Delta h$ :

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{P_1} \approx 3.5 \%$$

и в результате имеем:

$$V_{fv} = (2.15 \pm 0.08) \text{ л} \quad (13)$$

7. Проведем те же самые измерения с диффузионным насосом и получим объем установки, из которой вычитанием объема форвакуумной части получается объем высоковакуумной части.

$$h_{up3} = (34.0 \pm 0.1) \text{ см,} \quad h_{low3} = (16.9 \pm 0.1) \text{ см,} \quad (14)$$

$$h_{up4} = (33.9 \pm 0.1) \text{ см,} \quad h_{low4} = (16.7 \pm 0.1) \text{ см,} \quad (15)$$

$$\Delta h = (17.1 \pm 0.9) \text{ см.} \quad (16)$$

Погрешности высот определяются аналогично предыдущему пункту. Как и формула для полного объема установки, тогда:

$$V_{poln} = \frac{P_A}{\rho g \Delta h_{poln}} V_{kap} \approx 3.36 \text{ л,} \quad \varepsilon_{V_{poln}} = \varepsilon_{\Delta h} \approx 5 \%. \quad (17)$$

В результате искомая величина равна:

$$V_{vv} = V_{poln} - V_{fv} = 1.14 \text{ л,} \quad \sigma_V = \sqrt{\sigma_{V_{poln}}^2 + \sigma_{V_{fv}}^2} \approx 0.06 \%, \quad (18)$$

$$V_{vv} = (1.21 \pm 0.07) \text{ л.} \quad (19)$$

## 4.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки.

1. Не выключая форвакуумного насоса убедимся в том, что в установке не осталось запертых объёмов.
2. Откачав установку до давления порядка  $10^{-2}$  мм. рт. ст, приступим к откачке ВБ с помощью диффузионного насоса.

3. С помощью термодарного манометра пронаблюдаем за тем, как идёт откачка ВБ. Мы должны продолжать процесс откачки до тех пор, пока там не установится давление порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст. При приближении давления к этой величине масло в диффузионном насосе закипит, поэтому подсчитаем количество капель, стекающих из сопла второй ступени диффузионного насоса:

$N = 16$  капель.

4. С помощью ионизационного манометра измерим значение предельного давления в системе со стороны высоковакуумной части:

$$P = (5.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$$

5. Найдём скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума, для этого открывая и закрывая кран КЗ будем то подключать насос к объёму, то отключать его, при этом на видео зафиксируем показания манометра от времени и занесём полученные результаты в Таблицу 1 и построим графики необходимых зависимостей, для которых определим коэффициенты наклона прямых и их погрешности (с помощью МНК), полученные результаты также зафиксируем в Таблице 1. Так же запишем итоговое значение для коэффициента наклона прямых, которое является средним из двух полученных, а его погрешность вычисляется по формуле  $\sigma_k = \sqrt{\sigma_{k_1}^2 + \sigma_{k_2}^2}$  или же полуразность  $k_1$  и  $k_2$ , если вдруг эти значения не будут совпадать в пределах погрешности  $k_1$  и  $k_2$ .

Улучшение				Ухудшение			
$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, \text{ с}$	$P, \cdot 10^{-5}$ торр	$t, \text{ с}$
75	0	78	0	7.9	0	11	0
33	5	39	5	10	5	13	5
20	10	22	10	12	10	16	10
11	15	12	15	15	15	18	15
8.6	20	9.5	20	18	20	21	20
8.0	25	8.2	25	20	25	23	25
7.6	30	7.8	30	23	30	26	30
$k_1 = -(0.095 \pm 0.002) \text{ с}^{-1}$				$k_1 = (0.519 \pm 0.005) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$			
$k_2 = -(0.092 \pm 0.003) \text{ с}^{-1}$				$k_2 = (0.55 \pm 0.005) \cdot 10^{-5} \cdot \text{с}^{-1}$			
$k_{cp} = -(0.0935 \pm 0.006)^{-1}$				$k_{cp} = (0.53 \pm 0.07) \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-5} \cdot \text{с}^{-1}$			

Таблица 1: Результаты измерений

6. Сначала проведём вычисления для коэффициента  $k$ , полученного при улучшении вакуума (для этого мы строили графики зависимости  $\ln((P - P_0)/(P_0 - P))$  от  $t$ ). Поскольку  $W = -kV$ , то  $\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_V^2} \approx 4\%$ , в результате имеем:

$$W = (0.1131 \pm 0.01) \text{ л/с.}$$

7. Оценим величину потока газа  $Q$ . Для этого воспользуемся данными, полученными при ухудшении вакуума. А именно построим графики зависимости  $P(t)$  и определим для них коэффициенты угла наклона прямой. Поскольку  $V_{vv}dP = (Q_d + Q_i)dt$  получим  $(Q_d + Q_i) = kV_{vv} = (0.78 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \text{ л/с}$   
 $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{V_{vv}}^2} \approx 10\%$ .

Используя формулу  $Q_H = P_{pr}W - (Q_d + Q_i)$ , а значит  $\varepsilon_{Q_H} = \sqrt{\varepsilon_{P_{pr}W}^2 + \varepsilon^2} \approx 11\%$  получим, что:

$$Q_H = (0.64 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с.}$$

8. Оценим пропускную способность трубки по формуле (6):

$$L = (10.8 \pm 1) \text{ см}; \quad d = (0.8 \pm 0.1) \text{ мм.}$$

$$C = (1.0 \cdot 10^{-8}) \text{ л/с.}$$

9. Введём в систему искусственную течь и запишем значение установившегося при этом давления и давления  $P$ :

$$P_{yct} = (1.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.}$$

$$P_{fv} = (2.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ торр.}$$

10. Поскольку

$$P_{pr}W = Q_1, \quad P_{yct}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{kap}}{dt},$$

то

$$W = \frac{d(PV)_{kap}}{dt} \frac{P_{fv}}{P_{yct} - P_{pr}} = (0.19 \pm 0.05) \text{ л/с;}$$

(Поскольку давления померены с точностью не менее 10%, то можно учитывать погрешность, вносимую величиной  $\frac{d(PV)}{dt}$  относительная погрешность которой равна относительной погрешности  $C$ , то есть составляет 20%)

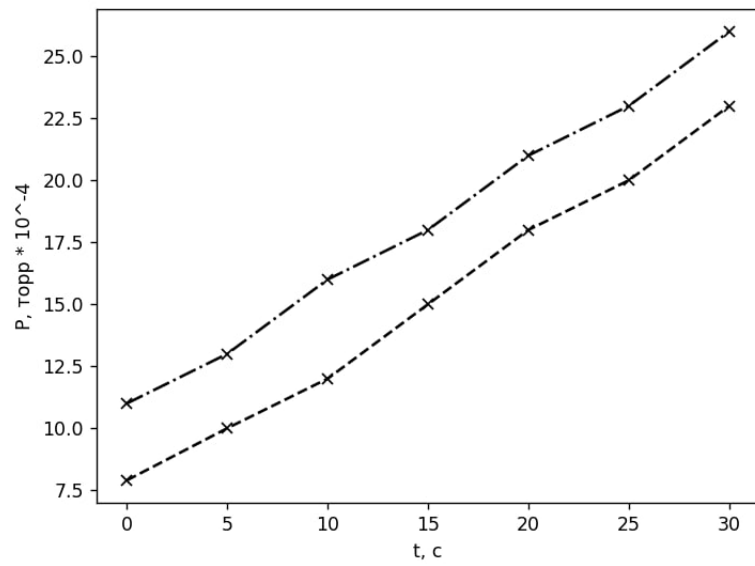


Рис. 2: Улучшение вакуума

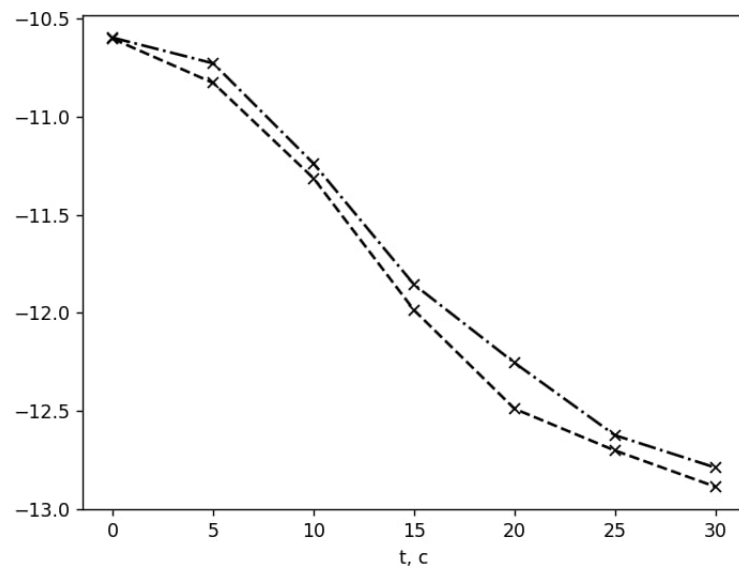


Рис. 3: Ухудшение вакуума



## Вывод

Был получен вакуум  $P = (5.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст.

Также были проверены законы, в соответствии с которыми вакуум в установке ухудшается и улучшается, были построены графики,  $\ln((P - P_0)/(P_0 - P))$  от  $t$ , а для ухудшения —  $P(t)$ . Согласно теории они должны представлять собой линейную зависимость. Получившиеся графики оказались немного неточны.