

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

**Отчёт о выполнении лабораторной работы 2.3.1**

Получение и измерение вакуума

Автор:

Чикин Андрей Павлович

Б05-304

Долгопрудный, 2023

# Содержание

<b>1 Краткая Теория.</b>	<b>2</b>
1.1 Экспериментальная установка. . . . .	2
1.2 Диффузионный насос (ВН). . . . .	4
1.3 Масляный манометр (М). . . . .	4
1.4 Термопарный манометр. . . . .	5
1.5 Ионизационный манометр. . . . .	5
<b>2 Теоретическая часть</b>	<b>6</b>
<b>3 Ход работы</b>	<b>8</b>
3.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки . . . . .	8
3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки . . . . .	8
<b>4 Вывод.</b>	<b>8</b>

## Список иллюстраций

1	Схема экспериментальной установки . . . . .	2
2	Схема действия ФН. . . . .	3
3	Схема действия диффузионного насоса. . . . .	4
4	Схема термопарного манометра. . . . .	5
5	Градуировочная кривая термопары. . . . .	5
6	Схема ионизационной лампы ЛМ-2. . . . .	6

## Список таблиц

### 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.

### Приборы:

1. вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

## 1 Краткая Теория.

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса:

1. низковакуумные: до  $10^{-2} - 10^{-3}$  торр.
2. высоковакуумные: до  $10^{-4} - 10^{-7}$  торр.
3. установки сверхвысокого вакуума: до  $10^{-8} - 10^{-11}$  торр.

В данной работе изучаются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до  $10^{-2}$  торр и диффузионным масляным насосом до  $10^{-5}$  торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

### 1.1 Экспериментальная установка.

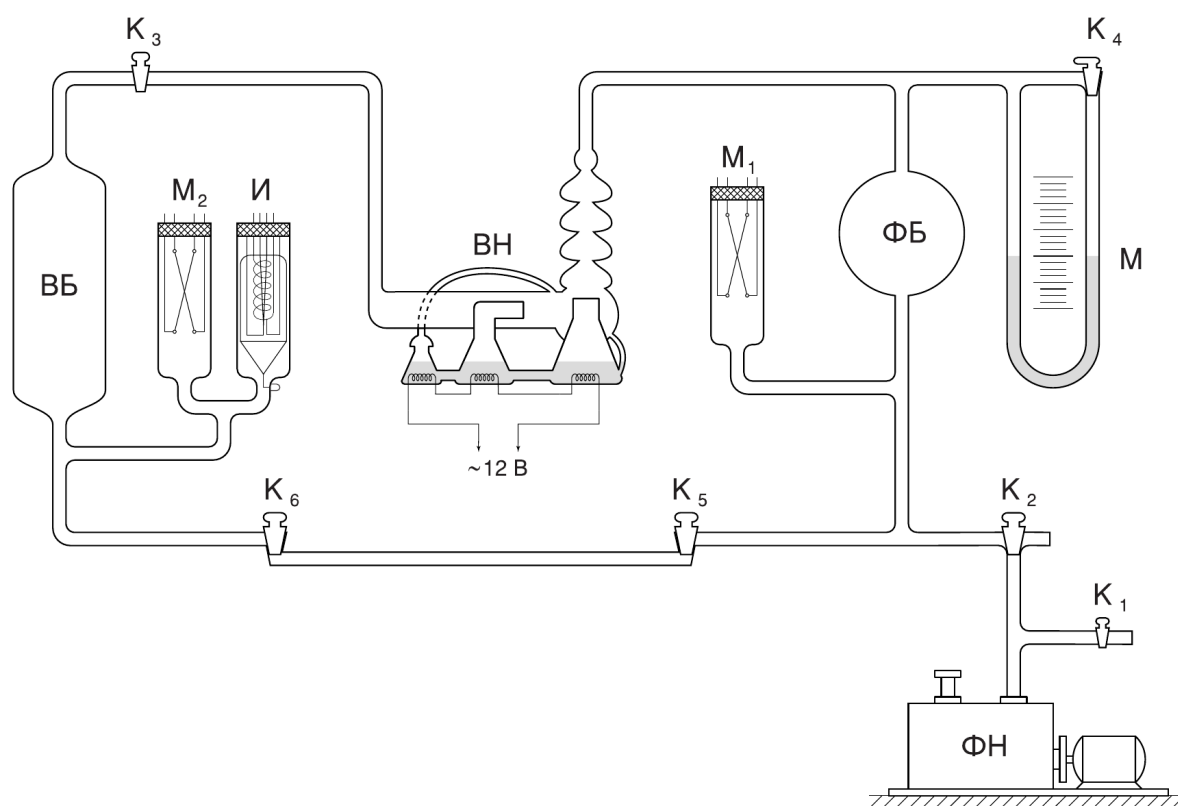


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

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)
- соединительных кранов ( $K_1, \dots, K_6$ )

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов полые и составляют одно целое с рукоятками. Пробки кранов притерты к корпусам. Для герметизации используется вакуумная смазка.

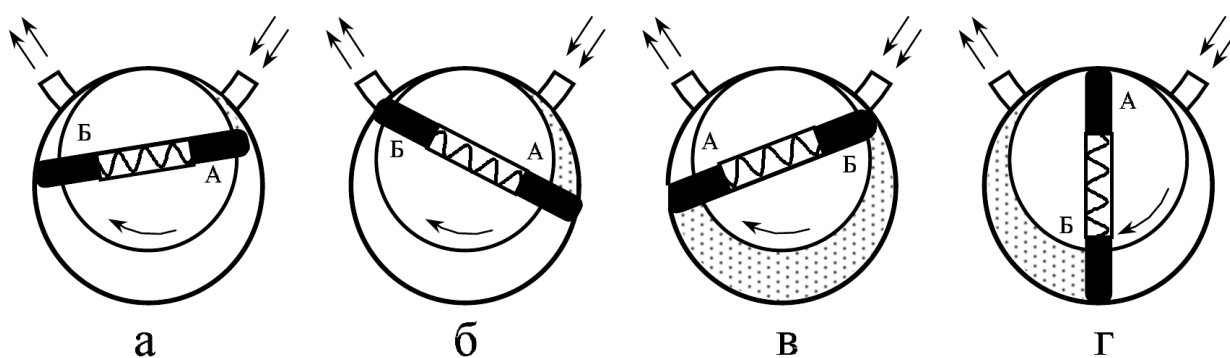


Рис. 2: Схема действия ФН.

Устройство и принцип действия *форвакуумного насоса* схематически, но довольно ясно изображены на рис. 2.

## 1.2 Диффузионный насос (ВН).

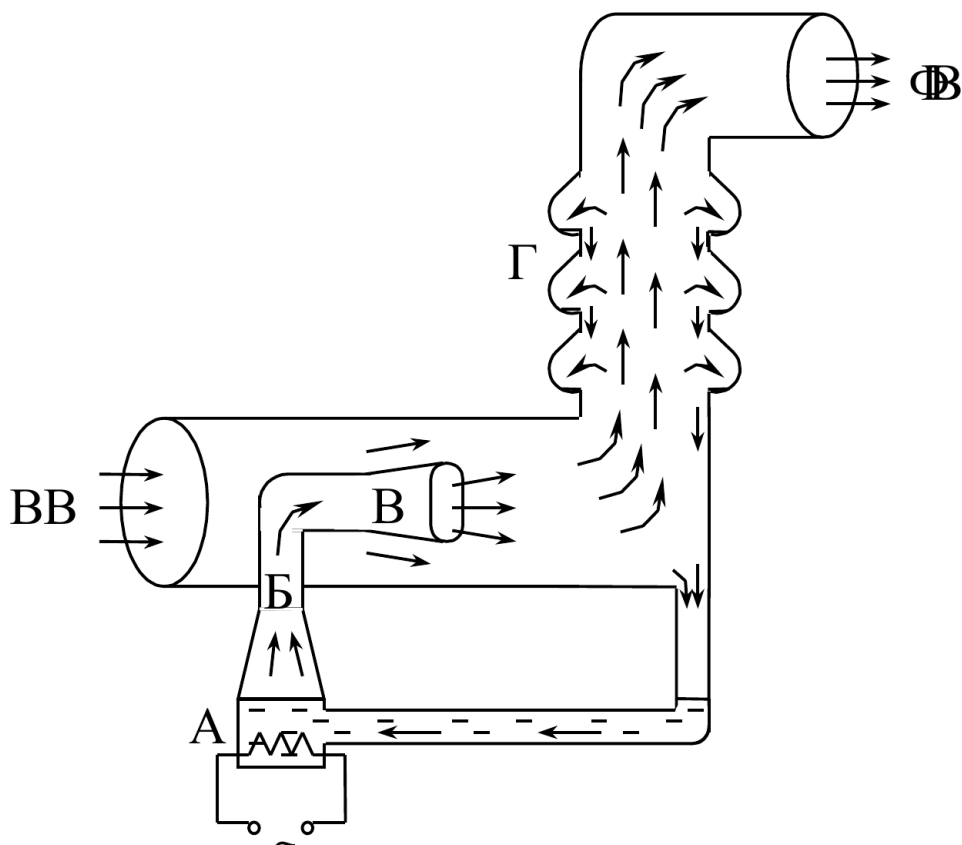


Рис. 3: Схема действия диффузионного насоса.

Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Далее смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубы ВВ. В этом случае пары масла увлекают молекулы воздуха из всего сечения зазора.

Включать ВН стоит только при уже имеющемся вакууме  $5 \cdot 10^{-2}$  торр. После включения ВН, давление в системе сначала будет подниматься. Через десять минут масло начнет испаряться, а ВН - работать.

## 1.3 Масляный манометр (М).

Две U-образные трубки, наполовину заполненные маслом. Разница давления измеряется по разнице высот масла в двух трубках.

$$\rho \approx 0.9 \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \quad (1.1)$$

$\rho$  - плотность масла в масляном манометре.

## 1.4 Термопарный манометр.

(см. рис. 4)

По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла окружающее пространство. Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях  $>1$  торр теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает. При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает и температура спая возрастает. При вакууме  $10^{-3}$  торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими видами потерь тепла и температура нити становится практически постоянной.

Градуировочная кривая термопарного манометра приведена на (см. рис. 5).

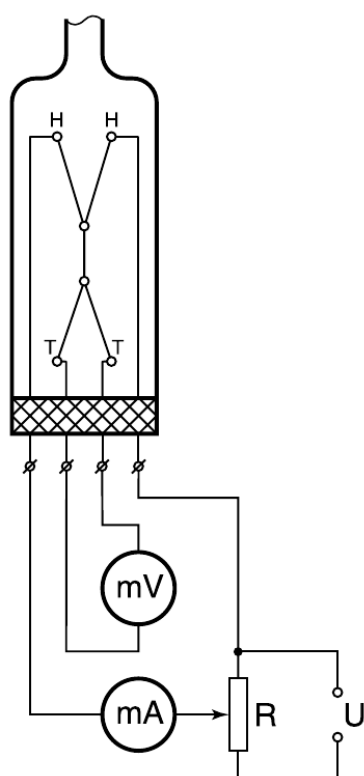


Рис. 4: Схема термопарного манометра.

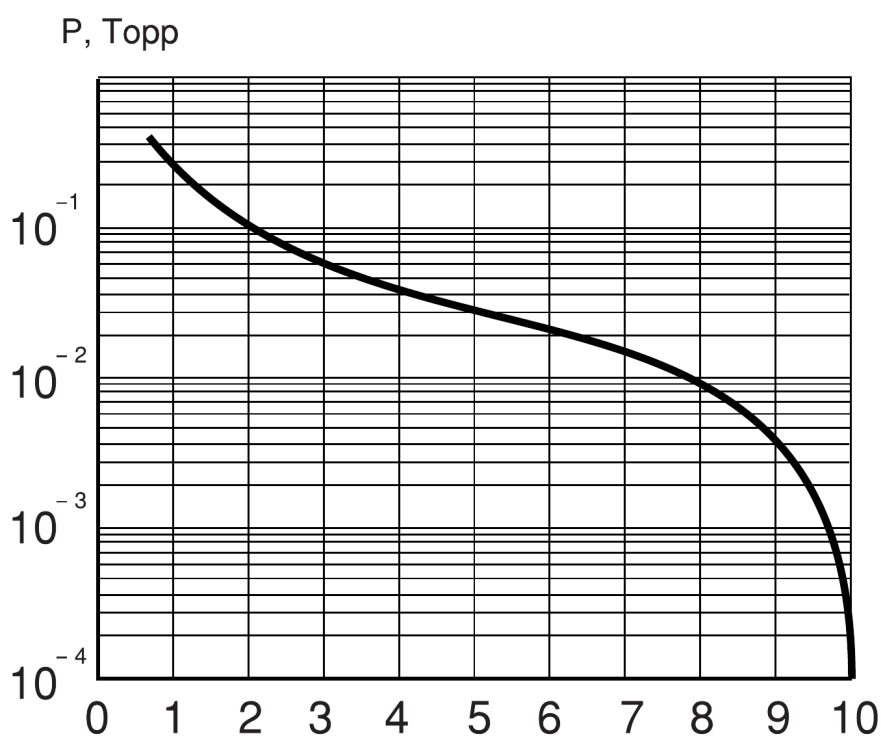


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары.

## 1.5 Ионизационный манометр.

Схема ионизационного манометра изображена на (см. рис. 6). Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления. Вероятность ионизации зависит от рода газа, заполняющего лампу (а значит, и откачиваемый объем). Калибровка манометра верна, если остаточным газом является воздух. Накалившийся катод ионизационного манометра перегора-

ет, если давление в системе превышает  $10^{-3}$  торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термопарному манометру, что давление в системе не превышает  $10^{-3}$  торр. При измерении нить ионизационного манометра сильно греется. При этом она сама, окружающие ее электроды и стенки стеклянного баллона могут десорбировать поглощенные ранее газы. Выделяющиеся газы изменяют давление в лампе и приводят к неверным показаниям. Поэтому перед измерениями ионизационный манометр прогревается (обезгаживается) в течение 10–15 мин. Для прогрева пропускается ток через спиральный анод лампы.

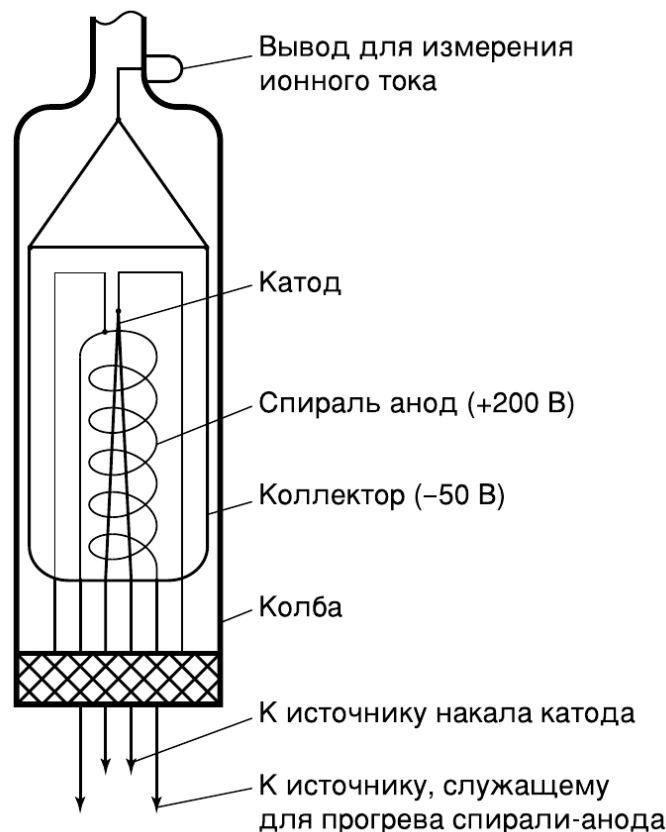


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛМ-2.

## 2 Теоретическая часть

**Процесс откачки:** Производительность насоса определяется скоростью откачки  $W$  (л/с). Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени,  $Q_{и}$  — 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.

Пусть  $Q = Q_d + Q_{и} + Q_n$  (моль/с).

Получаем формулу:

$$-VdP = (PW - Q \cdot RT) dt \quad (2.1)$$

При предельном давлении  $dP = 0$  и поэтому получаем:

$$P_{пр}W = Q \cdot RT; \quad W = \frac{Q \cdot RT}{P_{пр}} \quad (2.2)$$

Подставляя получаем

$$-VdP = W(P - P_{\text{пр}}) dt \quad (2.3)$$

Интегрируем полученное ур-е и получаем

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (2.4)$$

Пренебрегая  $P_{\text{пр}}$  относительно  $P_0$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (2.5)$$

Как видим, величина  $\tau = V/W$  показывает характерное время откачки системы.

Теперь попробуем понять чем обусловлена скорость откачки. Очевидно, скорость  $W$  зависит от скорости откачки насоса  $W_{\text{н}}$ , но она так же зависит от трубопровода соединяющего насос к откачиваемой части, т.к. если трубопровод не сможет обеспечить достаточное количество газа к входу насоса то, производительность упадет.

Попробуем описать систему математически. Пусть у нас есть насос со скоростью откачки  $W_{\text{н}}$  и трубопровод с пропускной способностью  $C$ . Давление в откачиваемом объеме –  $P_1$ .

$$C(P_1 - P_2) = W_{\text{н}}P_2 \implies P_2 = \frac{CP_1}{C + W_{\text{н}}} \Rightarrow WP_1 = W_{\text{н}}P_2 = \frac{CW_{\text{н}}}{C + W_{\text{н}}}P_1 \quad (2.6)$$

Как видим, для результирующей скорости  $W$  верно соотношение

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C} \quad (2.7)$$

Обобщая это выражение для последовательно соединенных труб получаем

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (2.8)$$

Заметим только что данные формулировки верны при молекулярном режиме течения, когда вязкое трение не имеет большого вклада в движение газа.

**Течение газа через трубу:** Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула (см. формулу 3.6):

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2.9)$$

где  $r$  и  $L$  соответственно радиус и длина трубы. Если пренебречь давлением  $P_1$  у конца, обращенного к насосу, получаем формулу для пропускной способности трубы

$$C_{\text{тр}} = \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (2.10)$$

Для пропускной способности отверстия (например в кранах) имеем формулу

$$C_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (2.11)$$



### 3 Ход работы

#### 3.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверим, что кран К4 открыт. Откроем все краны, кроме К1 и К2.
2. Впустим в установку атмосферный воздух через краны К1 и К2.
3. Закроем краны К5 и К6. В этих кранах и соединяющем их капилляре «запирается»  $V_{\text{зап}}$  воздуха при атмосферном давлении.

$$V_{\text{зап}} = 50 \text{ см}^3$$

4. Закроем краны К1 и К2, включим ФН и дадим ему откачать себя. Подключим установку к ФН краном К2 и откачаем установку до давления  $10^{-2}$  торр.
5. Повернув рукоятку крана К2, отсоединим установку от ФН. Оставим ФН работать.
6. Закроем К3.
7. Закроем К4.
8. Откроем К5.
9. Зная  $V_{\text{зап}}$  (см. п. 3) и  $\Delta h_{1,2}$ , найдем, пользуясь законом Бойля–Мариотта, объем  $V_{\text{фв}}$  форвакуумной части. Считаем, что объем труб мал, по сравнению с  $V_{\text{фв}}$  и  $V_{\text{вб}}$ .

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_1 V_{\text{фв}} = P_2 (V_{\text{фв}} + V_{\text{вб}})$$

$$\Delta h_1 = (25.3 \pm 0.1) \text{ см}; \quad \Delta h_2 = (16.3 \pm 0.1) \text{ см}$$

$$P = \rho g \Delta h. \quad 1.1$$

$$P_1 = () \text{ Па}$$

#### 3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

### 4 Вывод.