

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной  
физики

**Лабораторная работа 2.3.1**  
**ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ**  
**ВОЗДУХА ПО ТЕЧЕНИЮ В**  
**ТОНКИХ ТРУБКАХ**

Авторы:  
Идрисов Сергей  
Б04-306

Долгопрудный 2024

# 1 Экспериментальная установка

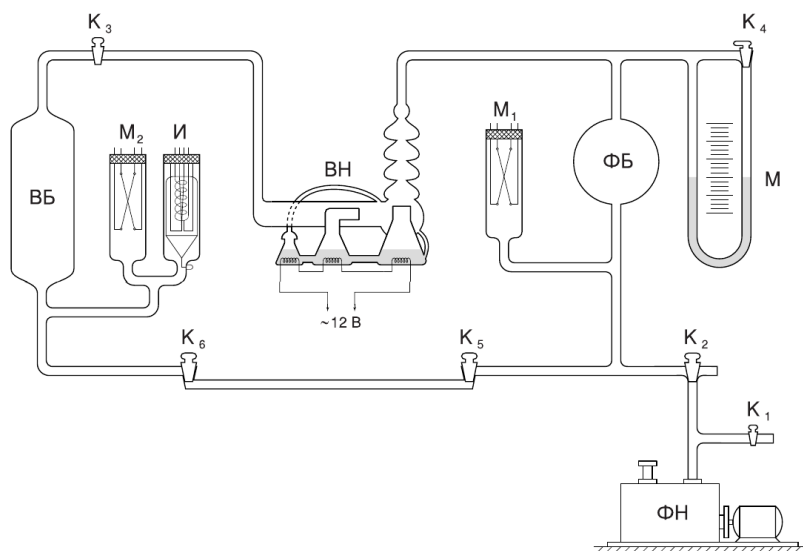


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термпарных манометров ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

**Маслянный манометр:** Представляет собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, обладающим весьма низким давлением насыщенных паров. Так как плотность масла мала,  $\rho = 0,885 \text{ г/см}^3$ , то при помощи манометра можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких торр). Во время откачки и заполнения установки атмосферным воздухом кран  $K_4$  соединяющий оба колена манометра, должен быть открыт во избежание выброса масла и загрязнения установки. Кран  $K_4$  закрывается только при измерении давления U-образным манометром.

**Термопарный манометр:** Чувствительным элементом манометра является термопара, заключенная в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на (Рис. 2). 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 (Рис. 3).

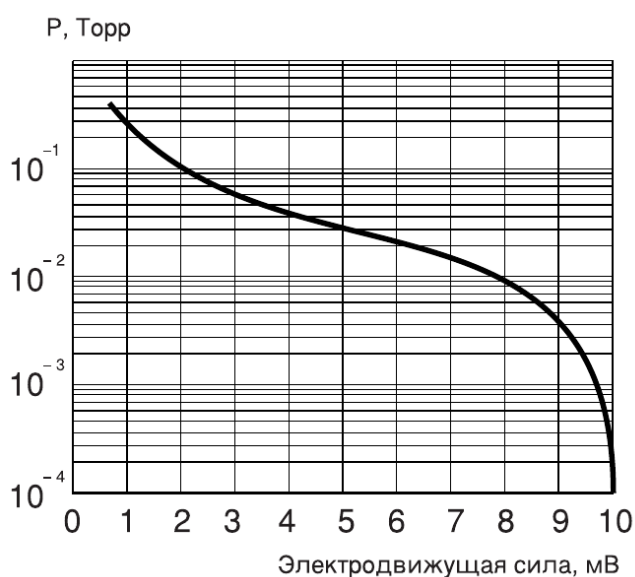
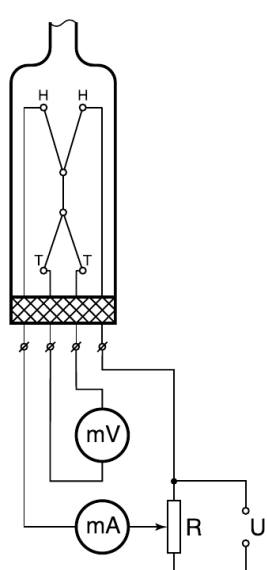


Рис. 2: Схема термопарного манометра. Рис. 3: Градуировочная кривая термопарного манометра.

**Ионизационный манометр:** Схема ионизационного манометра изображена на (Рис. 4). 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 перегорает, если давление в системе превышает  $10^{-3}$  торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термодатчику, 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.

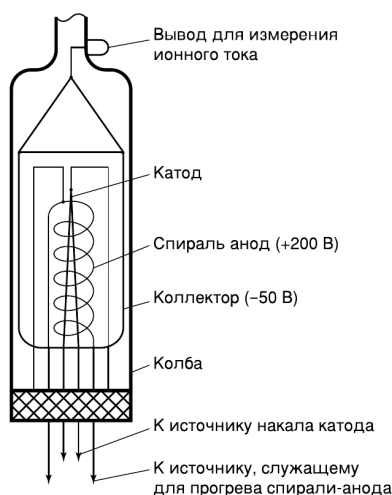


Рис. 4: Схема ионизационного манометра.

**Диффузионный насос:** Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии (внедрении) молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на (Рис. 5) (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). 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. Дальше 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. Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше  $5 \cdot 10^{-2}$  торр. Именно поэтому пары масла создают плотную струю, которая и увлекает собой молекулы газа. Если диффузионный насос включить при давлении, сравнимом с давлением насыщенного пара масла, то последнее никакой струи не создаст и масло будет просто окисляться и угорать.

Диффузионный насос, используемый в нашей установке, имеет две ступени и соответственно два сопла (Рис. 6). Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется еще одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. По этой причине плотность струи первой ступени выше и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно в откачиваемый объем поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

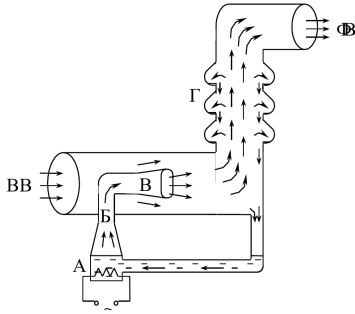


Рис. 5: Схема одной ступени диффузионного насоса.



Рис. 6: Диффузионный насос используемый в нашей работе.

## 2 Теоретическая часть

**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.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через  $Q_{и}$  — 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.  $Q = Q_d + Q_{и} + Q_n$  измеряем в единицах (моль/с). Получаем формулу

$$-\frac{VdP}{RT} = \left( \frac{PW}{RT} - Q \right) dt$$

При предельном давлении  $dP = 0$  и поэтому получаем

$$Q = \frac{P_{пр}W}{RT}$$

Подставляя получаем

$$-VdP = W(P - P_{пр})dt$$

Интегрируем полученное ур-е и получаем

$$P - P_{пр} = (P_0 - P_{пр}) \exp \left( -\frac{W}{V}t \right) \quad (1)$$

Пренебрегая  $P_{пр}$  относительно  $P_0$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (2)$$

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  $W_n$ , 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.

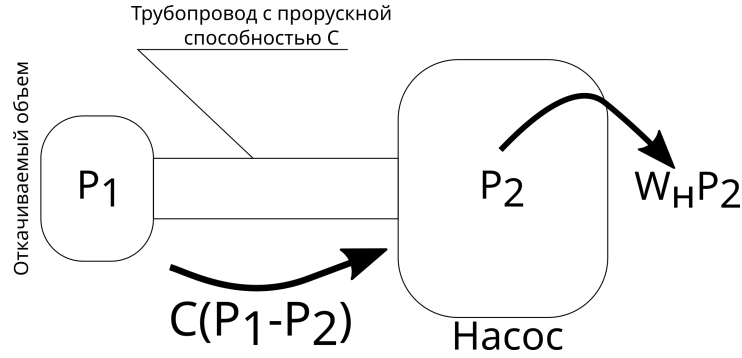


Рис. 7: Схема насоса с трубопроводом.

Попробуем описать систему математически. Пусть у нас есть насос со скоростью откачки  $W_n$  и трубопровод с пропускной способностью  $C$ . Давление в откачиваемом объеме –  $P_1$ . Исследовав схему 7 получаем

$$C(P_1 - P_2) = W_n P_2 \Rightarrow P_2 = \frac{CP_1}{C + W_n} \Rightarrow WP_1 = W_n P_2 = \frac{CW_n}{C + W_n} P_1$$

Как видим, для результирующей скорости  $W$  верно соотношение

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C}$$

Обобщая это выражение для последовательно соединенных труб получаем

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (3)$$

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

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

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

$$C_{\text{тр}} = \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (5)$$

Для пропускной способности отверстия (например в кранах) имеем формулу

$$C_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (6)$$

### 3   Ход работы