

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Измерение коэффициента диффузии гелия при атмосферном давлении.

Автор:  
Шахматов Андрей Юрьевич  
Б02-304

Долгопрудный 2024

## Аннотация

Исследован метод получения высокого вакуума с использованием диффузионного насоса. Измерена скорость откачки системы насосом а также скорость ухудшения вакуума из-за микротечей.

## Содержание

1 Введение	1
2 Методика	1
3 Результаты и их обсуждение	7
4 Выводы	10
5 Использованная литература	11
6 Приложения	11
6.1 Параметры установки и погрешности приборов . . . . .	11

## 1 Введение

Цель настоящей работы заключалась в исследовании получения вакуума с использованием ротационного форвакуумного насоса и диффузионного высоковакуумного насоса.

## 2 Методика

### Экспериментальная установка

В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления  $10^{-2}$  торр и диффузионным масляным насосом до давления  $10^{-4}$  торр.

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термодинамических манометров ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов ( $K_1, K_2, \dots, K_6$ ) (рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

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.

Устройство и принцип действия *форвакуумного насоса* схематически, но довольно ясно изображены на рис 2. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями. Устройство и принцип действия *диффузионного насоса* схематически изображены на рис 2. Такой насос работает в тысячи раз быстрее форвакуумного. Его

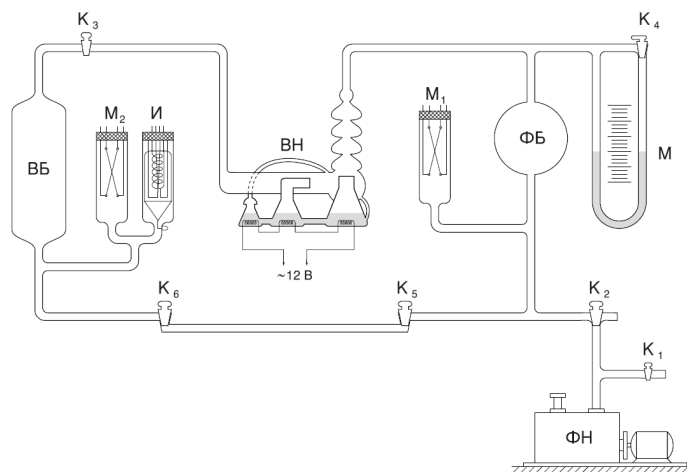


Рис. 1: Схема установки

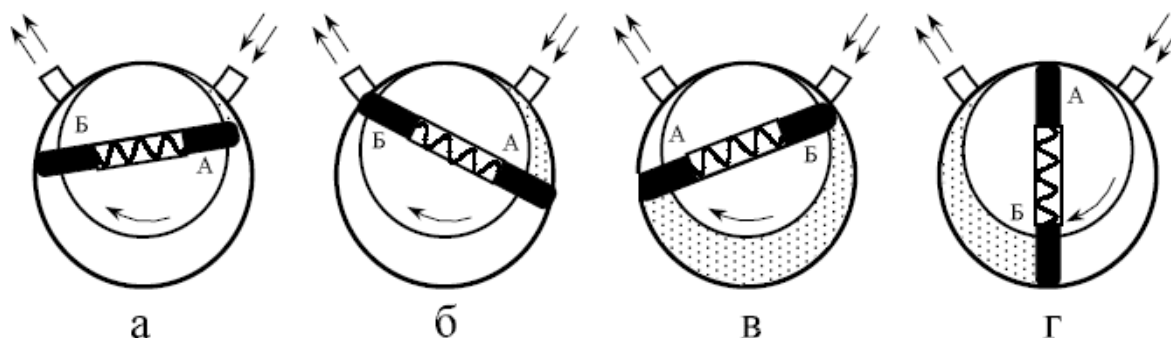


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

действие основано на диффузии. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубке Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. В трубке Г мало осаждается и стекает вниз. Оставшийся газ, выходя в трубку ФВ, откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно, когда длина свободного пробега молекул примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубки ВВ. Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше  $5 \cdot 10^{-2}$  торр, поэтому пары масла создают плотную струю, увлекающую с собой молекулы газа. Диффузионный насос, используемый в нашей установке (см. рис 1) имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется ещё 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 её. По этой причине плотность струи первой ступени выше, и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями масла. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров. Соответственно, в откачиваемый объем поступает меньше паров масла, и его удаётся откачать до более высокого вакуума.

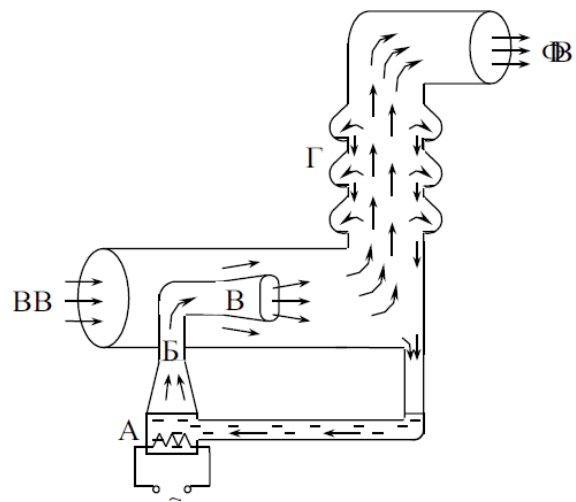


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

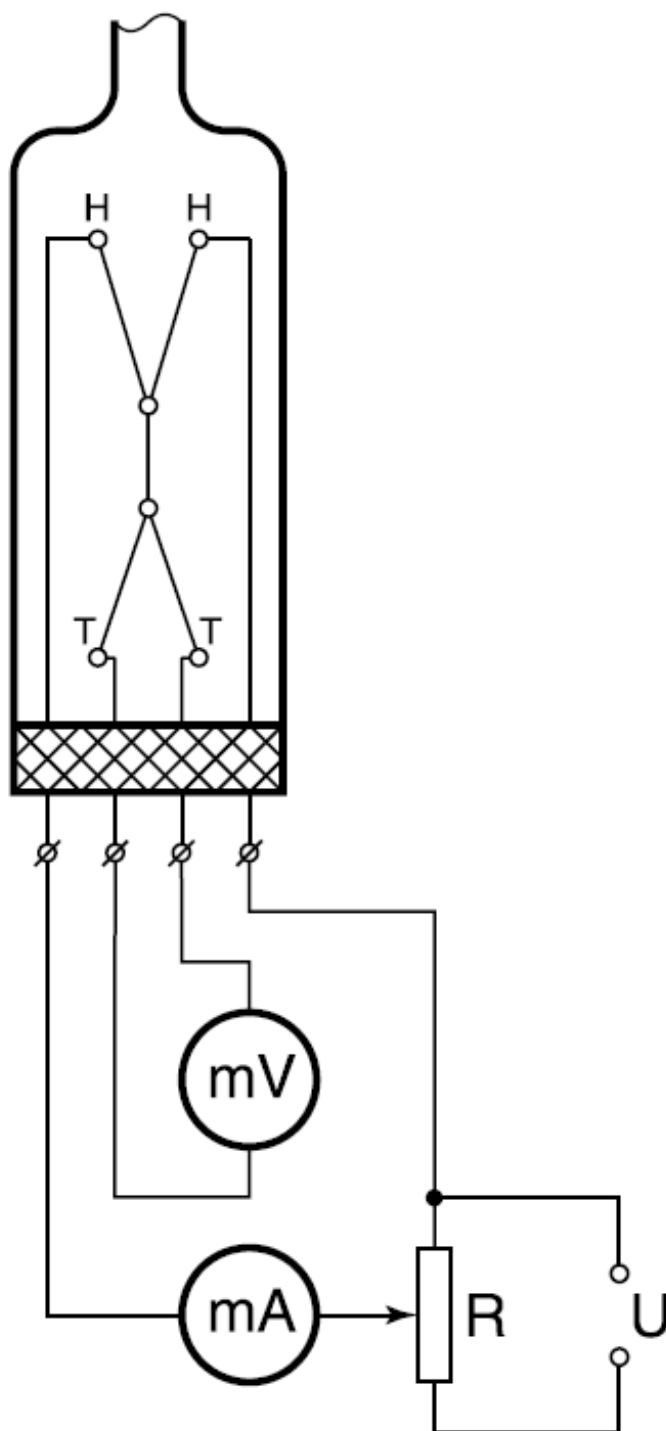


Рис. 4: Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

*Термопарный манометр.* Чувствительным элементом манометра является платиново-родиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключённая в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R, расположенный на передней панели вакуумметра. Тер-

мопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в 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, не меньших 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 порядка  $10^{-3}$  торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими потерями тепла, и температура становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопары приведена на рис. 5.

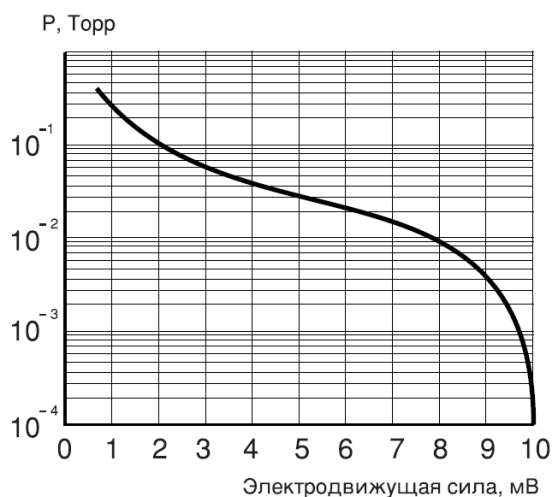


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2



Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛТ-2

*Ионизационный манометр.* Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются раскалённым катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за её витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своём пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток.

Накалённый катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает  $10^{-3}$  торр, поэтому перед его включением необходимо проверить давление термоманометром.

## Процесс откачки

Опишем процесс откачки математически: Пусть  $W$  — объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени,  $Q_i$  для различных значений  $i$  обозначим различные притоки газа в сосуд (в единицах  $PV$ ), такие как течи извне  $Q_{\text{и}}$ , десорбция с поверхностей внутри сосуда  $Q_{\text{д}}$ , обратный ток через насос  $Q_{\text{н}}$ . Тогда, приравнявая убыль газа из сосуда (с точностью до  $RT/\mu$ ) в единицу времени  $-VdP$  и сумму перечисленных токов, имеем:

$$-VdP = (PW - \sum_i Q_i)dt \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума устанавливается давление  $P_{\text{пр}}$ , и  $dP = 0$ . Тогда

$$W = (\sum_i Q_i)/P_{\text{пр}} \quad (2)$$

Поскольку обычно  $Q_{\text{н}}$  постоянно, а  $Q_{\text{н}}$  и  $Q_{\text{д}}$  слабо зависят от времени, также считая постоянной  $W$ , можем проинтегрировать (1) и получить:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (3)$$

Полная скорость откачки  $W$ , собственная скорость откачки насоса  $W_{\text{н}}$  и проводимости элементов системы  $C_1, C_2, \dots$  соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (4)$$

## Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном и форвакуумном давлениях длина свободного пробега меньше диаметра трубок, и течение газа определяется его вязкостью, т.е. взаимодействием молекул. При высоком вакууме течение существеннее определяется взаимодействием со стенками. Для количества газа, протекающего через трубу длины  $l$  и радиуса  $r$  в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

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

Если труба соединяет насос установку, то давлением  $P_1$  у насоса можно пренебречь. Давление в сосуде  $P = P_2$ . Тогда имеем:

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

Для пропускной способности отверстий имеется формула

$$C_{\text{отв}} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (7)$$

Для воздуха при комнатной температуре  $\bar{v}/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$ .

## 3 Результаты и их обсуждение

Согласно методичке измерены объёмы форвакуумной и высоковакуумной части установки (Прил. 6.1). Полученные объёмы соответственно равны  $V_1 = (2.179 \pm 0.021) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  и  $V_2 = (1.21 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . С использованием диффузионного насоса получен высокий вакуум в высоковакуумной части установки. После этого было произведено отключение насоса от системы и измерена зависимость давления в установке от времени. После произведено повторное подключение насоса к системе и измерена зависимость давления в установке от времени (Рис. 7).



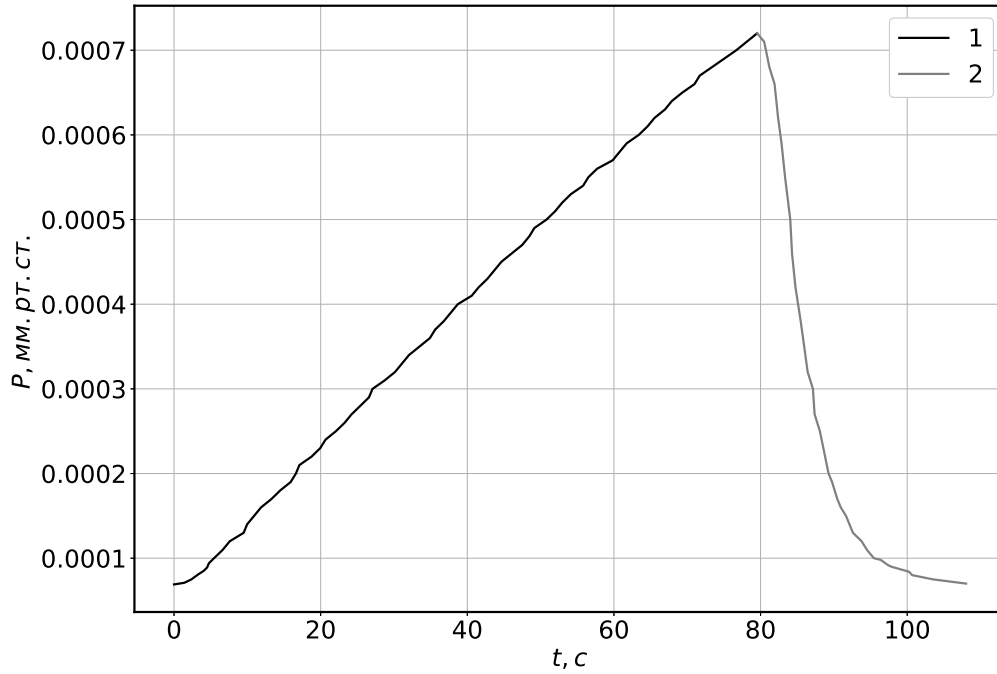


Рис. 7: Зависимость давления  $P$ , измеренного на ионизационном манометре в зависимости от времени  $t$  при выключенной откачке (линия 1), и при включенном диффузионном насосе (линия 2).

Согласно теории, участок 2 на графике соответствует экспоненциальному уменьшению давления, поэтому перестроим данную часть графика в логарифмическом масштабе (Рис. 8). По графику видно, что полученная зависимость является линейной, что подтверждает корректность используемой модели. В таком случае возможно вычислить скорость откачки  $W$ :

$$W = -V_2 b,$$

где  $b$  - коэффициент наклона графика в логарифмическом масштабе. В таком случае  $W = (2.34 \pm 0.07) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ .

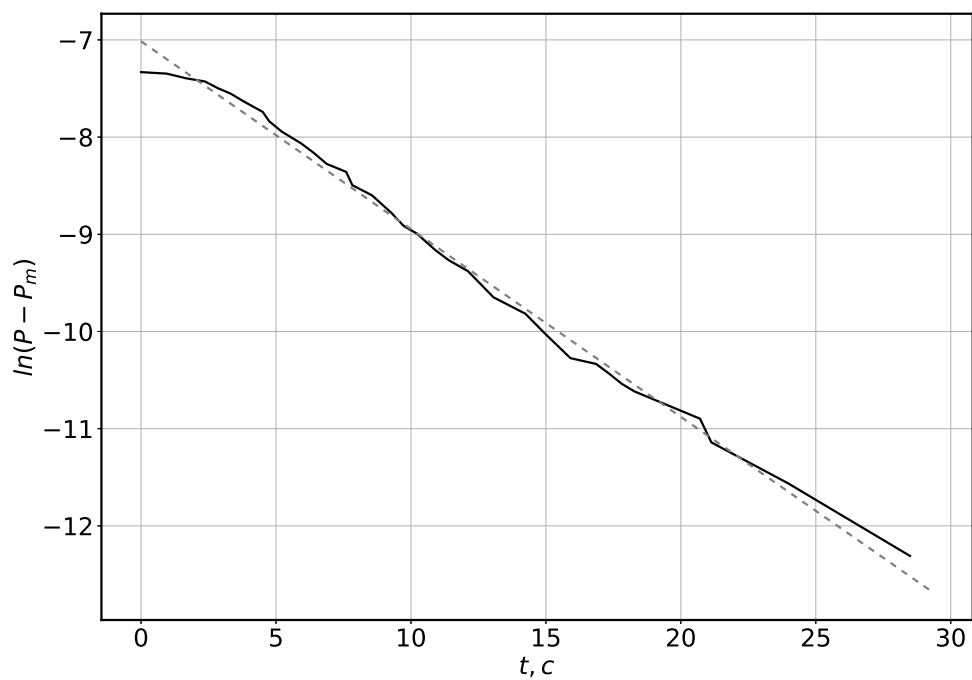


Рис. 8: Зависимости давления  $P$  в установке от времени  $t$  при включенном насосе.

Для того чтобы найти количество газа, выходящее из системы из-за микротечей, построим график зависимости давления в системе от времени при отключенном насосе (Рис. 9).

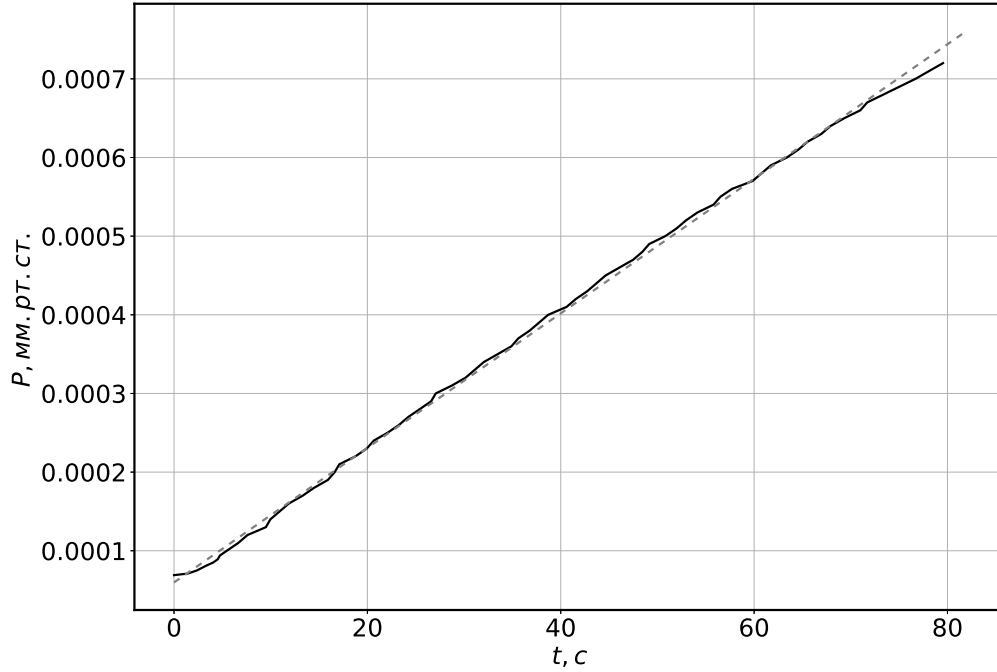


Рис. 9: Зависимости давления  $P$  в установке от времени  $t$  при выключенном насосе.

Полученный график хорошо аппроксимируется прямой, что подтверждается теоретической моделью, в таком случае считая, что уменьшение давления характеризуется только утечкой через микрощели, имеем формулу:

$$Q = bV_2,$$

где  $b$  - коэффициент наклона. Полученное значение величины утечки равна  $Q = (1.038 \pm 0.036) \cdot 10^{-8} \text{ (мм. рт. ст.) } \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ .

Далее в систему была введена искусственная течь и измерено установившееся давления  $P_y = (1.00 \pm 0.10) \cdot 10^{-4} \text{ мм. рт. ст.}$ . Тогда возможно рассчитать мощность откачки как

$$W = \frac{1}{P_y - P_m} \frac{4}{3} \frac{d^3}{2} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu} \frac{P_v}{L}},$$

где  $P_v$  - давление в форвакуумной части установки,  $P_y$  - установившееся давление,  $P_m$  - минимальное значение откачки. В таком случае  $W = (6.5 \pm 1.9) \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ . Полученное значение отличается в несколько раз от полученного по графику. Такое расхождение можно объяснить тем, что на представленной установке установлен мощный насос, из-за чего характерное время установления  $P_y$  велико, что может давать большую погрешность измерения  $P_y$ .

## 4 Выводы

Получен вакуум с давлением  $P = (5.90 \pm 0.10) \cdot 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$ . Измерена мощность откачки насоса а также величина микротечей утсановки.

## **5   Использованная литература**

### **Список литературы**

[1] Лабораторный практикум по общей физике, Том 1, под редакцией А. Д. Гладуна

[2] Н.А. Кириченко «Термодинамика, статистическая и молекулярная физика».

## **6   Приложения**

### **6.1   Параметры установки и погрешности приборов**