

Лабораторная работа №2.3.1  
Получение и измерение вакуума

Струков Олег  
Б04-404

**Цель работы:** 1) измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

**Оборудование:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным ПМТ-2 и ионизационным ПМИ-2, вакуумметры Мерадат ВИТ-16 и Мерадат ВИТ-19.

## Экспериментальная установка

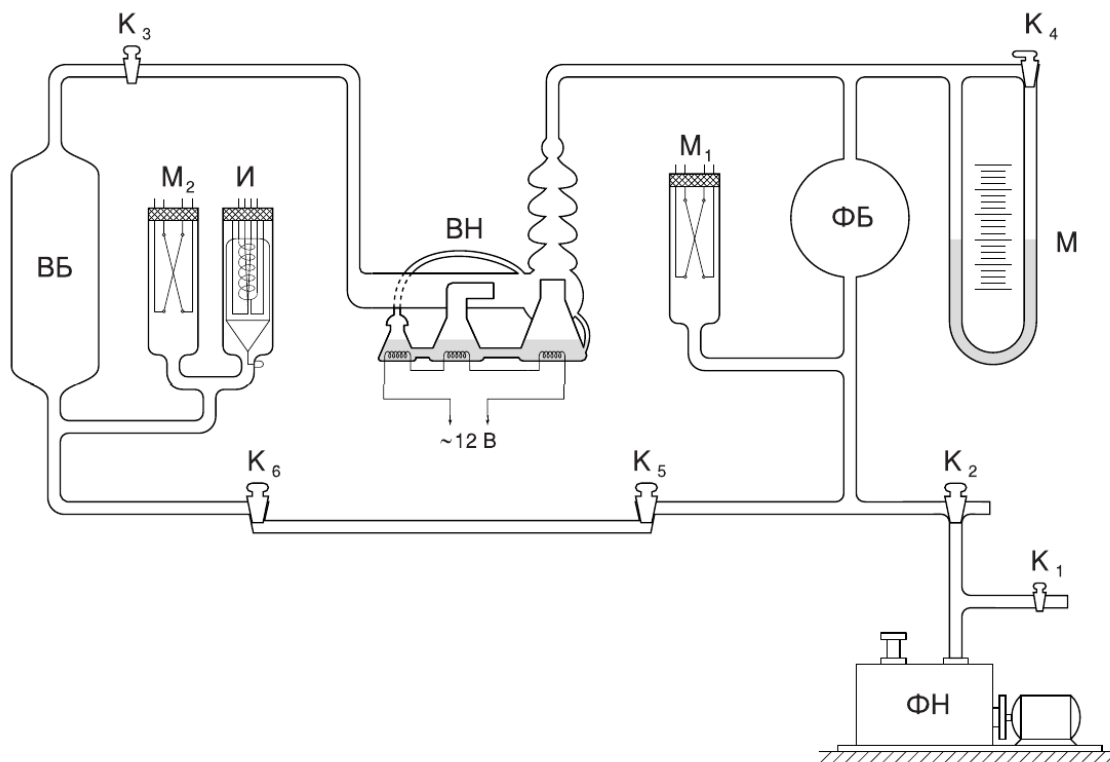


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термомпарных манометров (М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub>), 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 К<sub>4</sub> соединяющий оба колена манометра, должен быть открыт во избежание выброса масла и загрязнения установки. Кран К<sub>4</sub> 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 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  $>1$  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).

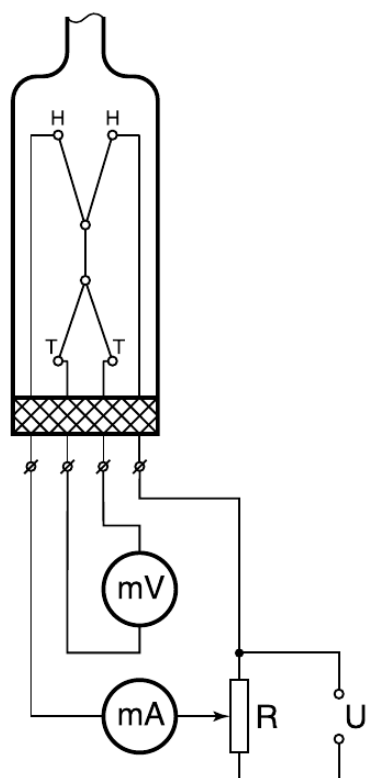


Рис. 2: Схема термопарного манометра.

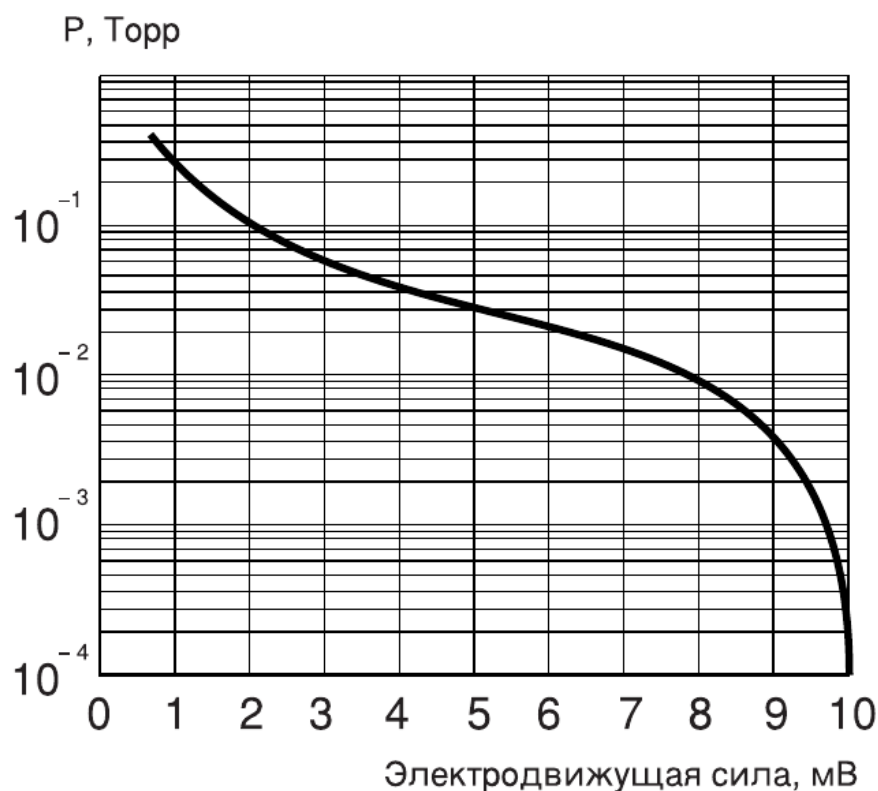


Рис. 3: Градуировочная кривая термопарного манометра.

**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 её 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 объём). 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 термопарному манометру, что давление в системе не превышает  $10^{-3}$  торр. При измерении нить ионизационного манометра сильно греется. При этом она сама, окружающие её 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.

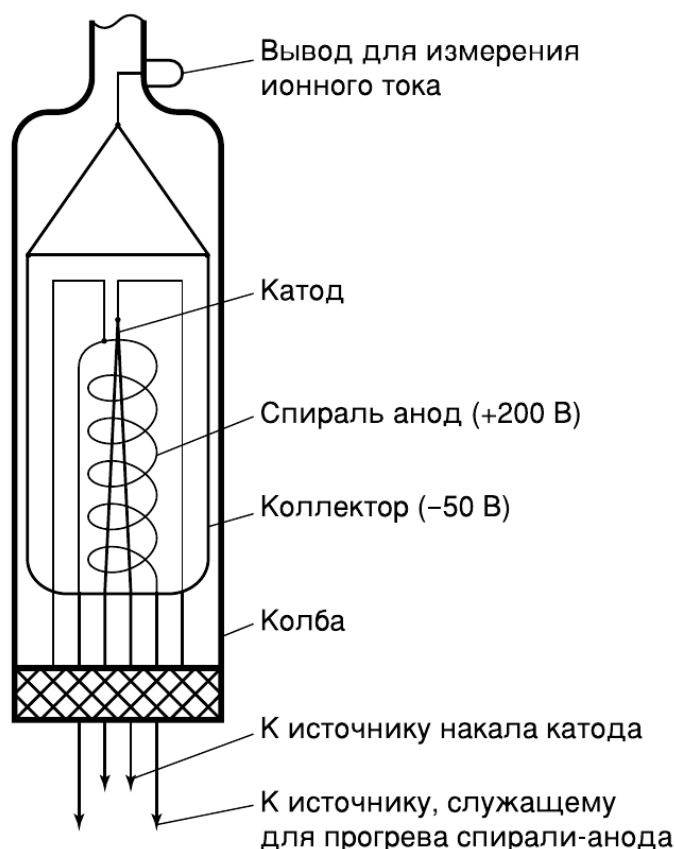


Рис. 4: Схема ионизационной лампы.

**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. 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. 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 с 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. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло 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 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 объём поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

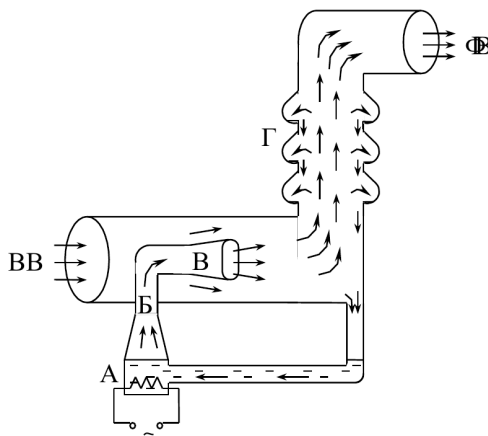


Рис. 5: Схема работы диффузионного насоса.

## Теоретическая часть

**Процесс откачки:** Производительность насоса определяется скоростью откачки  $W$  (л/с):  $W$  — это объём газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса равна ёмкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объёма в

единицу времени, через  $Q_{\text{и}}$  – количество газа, проникающего в единицу времени в этот объём извне – через течи. Будем считать, что насос обладает скоростью откачки  $W$  и в то же время сам является источником газа; пусть  $Q_{\text{н}}$  – поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему.  $Q = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}$  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

$$Q = \frac{P_{\text{пр}}W}{RT}$$

Подставляя получаем

$$-VdP = W(P - P_{\text{пр}})dt$$

Интегрируем полученное уравнение и получаем

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

$P_{\text{пр}}$  относительно  $P_0$  можно пренебречь:

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

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  $W_{\text{н}}$ , 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 упадёт.

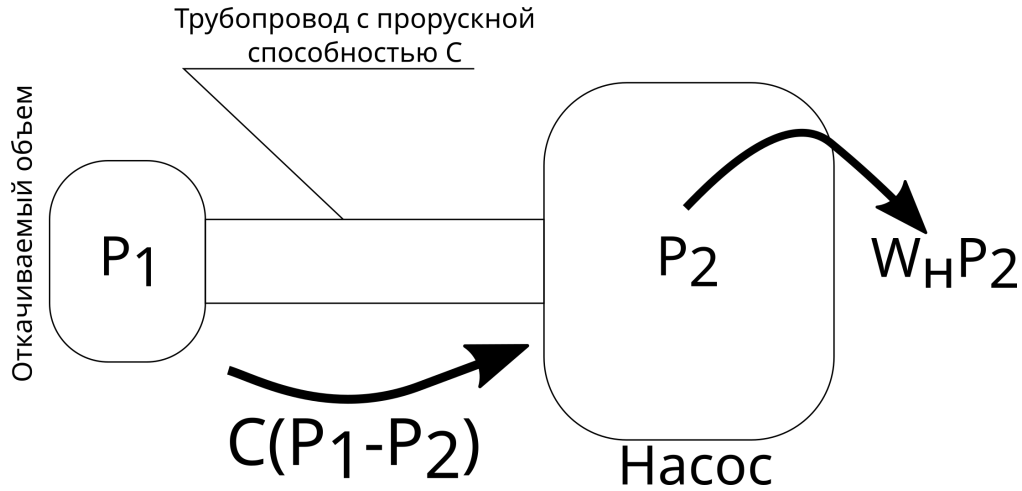


Рис. 6: Схема насоса с трубопроводом.

Попробуем описать систему математически. Пусть у нас есть насос со скоростью откачки  $W_{\text{н}}$  и трубопровод с пропускной способностью  $C$ . Давление в откачиваемом объёме –  $P_1$ . Исследовав схему 6 получаем

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

Как видим, для результирующей скорости  $W$  верно соотношение

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C}$$

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

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

## Ход работы

### Определение объёмов форвакуумного и высоковакуумного баллонов

1. Все краны были открыты, выждано 2 минуты, пока воздух заполнял всю установку.
2. В капилляре между кранами  $K_5$  и  $K_6$  было заперто примерно  $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$  воздуха при атмосферном давлении  $p_a = 99,09 \text{ кПа}$ .
3. С помощью форвакуумного насоса была начата откачка установки, и через несколько минут внутри было получено давление  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$
4. Были закрыты краны  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$ , а кран  $K_5$  открыт, благодаря чему воздух из капилляра заполнил форвакуумную часть установки.
5. Полученное в ней давление было измерено с помощью масляного манометра: верхнее значение уровня масла в коленях манометра составило  $h_1 = 34,7 \text{ см масл. ст.}$ , нижнее –  $h_2 = 9,7 \text{ см масл. ст.}$  Разность уровней  $\Delta h_{\text{фв}} = 25,0 \text{ см масл. ст.}$
6. Зная плотность используемого масла –  $\rho = 0,885 \text{ г/см}^3$ , и поскольку процесс можно считать изотермическим (т.е.  $PV = \text{const}$ ), можно определить объём форвакуумной части установки:  

$$V_{\text{фв}} = \frac{p_a V_{\text{кап}}}{\rho g \Delta h_{\text{фв}}} - V_{\text{кап}}$$
 Таким образом,  $V_{\text{фв}} = 2285,0 \text{ см}^3$ .
7. Был открыт кран  $K_3$  и аналогичным образом определены объёмы всей установки  $V_{\text{полн}}$  и её высоковакуумной части  $V_{\text{вв}}$ :  $h_3 = 30,6 \text{ см масл. ст.}$ ,  $h_4 = 14,5 \text{ см масл. ст.}$ ,  $\Delta h_{\text{полн}} = 16,1 \text{ см масл. ст.}$ ,  $V_{\text{полн}} = \frac{p_a V_{\text{кап}}}{\rho g \Delta h_{\text{полн}}}$ ,  $V_{\text{вв}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{кап}} - V_{\text{фв}}$ . Получены значения  $V_{\text{полн}} = 3548,2 \text{ см}^3$  и  $V_{\text{вв}} = 1263,1 \text{ см}^3$ .
8. По окончании измерений был открыт кран  $K_4$  для уравнивания масла в манометре.

## Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

1. Для продолжения откачки установки для выполнения второй части работы был открыт кран  $K_2$ . При этом в установке не осталось запертых объёмов.
2. После того, как давление упало ниже  $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст., был закрыт кран  $K_6$  и начата откачка высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса. Для этого с помощью источника питания был начат его нагрев.
3. Через некоторое время масло в диффузионном насосе закипело, и давление в итоге составило  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.
4. Затем был запущен ионизационный манометр ПМИ-2 вакуумметра ВИТ-19 и проведена "Дегазация". После этого было достигнуто предельное давление  $p_{пр} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.
5. Для нахождения скорости откачки по ухудшению и улучшению вакуума сначала закрывался кран  $K_3$  (тем самым отключалась откачка высоковакуумного баллона) и на видео фиксировалось ухудшение вакуума во времени до предела около  $7,6 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Затем кран  $K_3$  открывался и фиксировалось улучшение вакуума во времени. Данные измерения были проведены дважды, полученные данные изображены на графиках (расположены в конце отчёта).
6. Логарифмируя формулу (2), получаем  $\ln(P - P_{пр}) = \ln P_0 - \frac{W}{V_{вв}} t$ . Таким образом, из зависимости  $\ln(P - P_{пр})$  от  $t$  был найден коэффициент наклона прямой  $k = -\frac{W}{V_{вв}}$ :

$$k_1 = -0,246 \text{ с}^{-1}, \quad k_2 = -0,200 \text{ с}^{-1}, \quad k_{ср} = \frac{k_1 + k_2}{2} = -0,223 \text{ с}^{-1}$$

7. Исходя из полученных данных, можно найти скорость откачки:  $W = -k_{ср} V = 282 \text{ см}^3/\text{с}$
8. Из уравнения ( $Q_{и}$  – поток газа, поступающий извне,  $Q_{д}$  – количество десорбирующегося газа)

$$V_{вв} dP = (Q_{д} + Q_{и}) dt$$

Следует зависимость ( $f$  – коэффициент наклона прямой графика зависимости  $P(t)$  при ухудшении вакуума):

$$Q_{д} + Q_{и} = f V_{вв}$$

$$\begin{aligned} f_1 &= 1,156 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст./с} \\ f_2 &= 1,143 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст./с} \\ f_{ср} &= \frac{f_1 + f_2}{2} = 1,150 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст./с} \end{aligned}$$

Учитывая, что  $P_{пр} W = Q_{д} + Q_{и} + Q_{н}$ , получаем

$$Q_{н} = P_{пр} W - f_{ср} V_{вв} = 1,93 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.} \cdot \text{см}^3/\text{с}$$

9. По формуле (5) была оценена пропускная способность трубки от высоковакуумного баллона до насоса:  $L = 10,8 \text{ см}$ ,  $r = 0,4 \text{ см}$ ,  $T = 296 \text{ К}$ , следовательно,  $C_{тр} = 567,3 \text{ см}^3/\text{с}$ , что примерно в два раза больше скорости откачки.

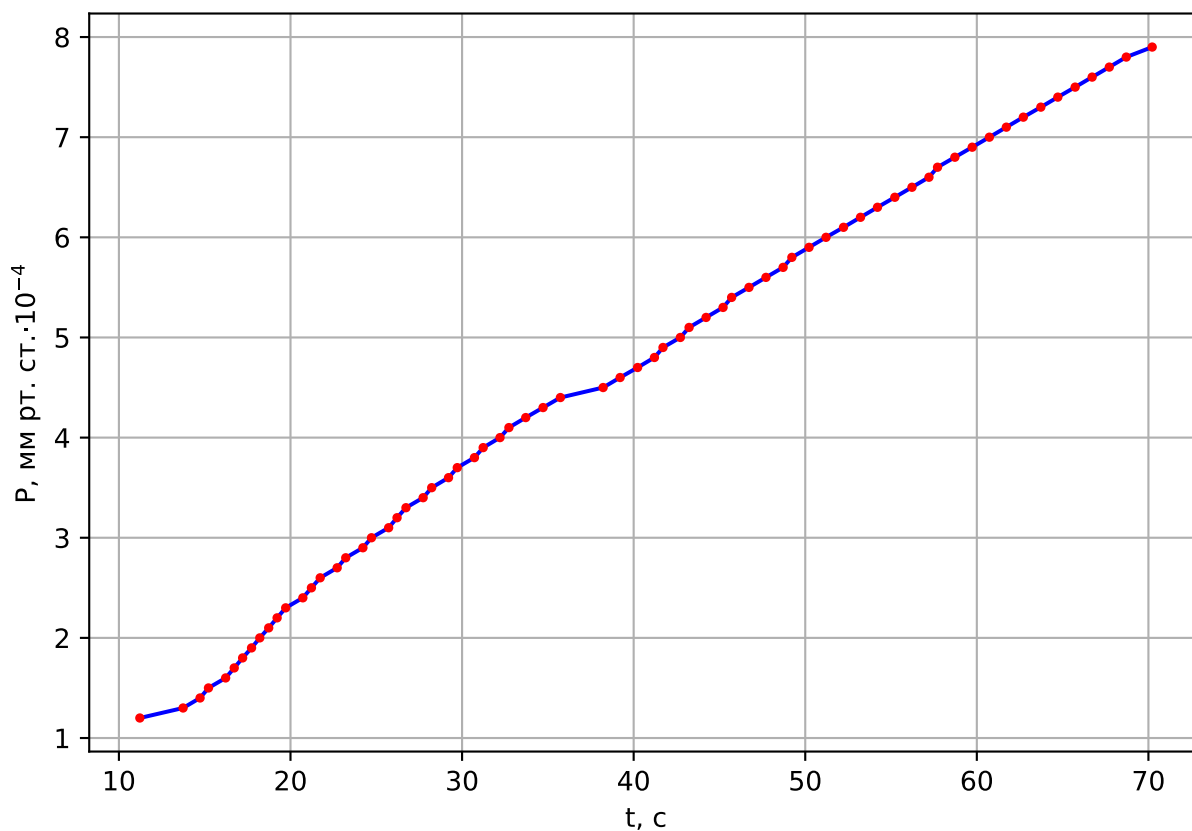


10. Далее был открыт кран  $K_5$ , что создало таким образом искусственную течь (высоковакуумная часть установки была соединена через капилляр с форвакуумной). Вакуум стал ухудшаться, и через 5 минут достиг установившегося значения  $P_{уст} = 2,7 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. При этом со стороны форвакуумной части давление составляло  $P_{фв} = 8,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.
11. Обозначим как  $Q_1$  сумму всех натеканий, кроме натекания через искусственную течь. Тогда при закрытом капилляре выполняется  $P_{пред}W = Q_1$ , а при открытом –  $P_{уст}W = Q_1 + \frac{(PV)_{кап}}{dt}$ . Отсюда получаем

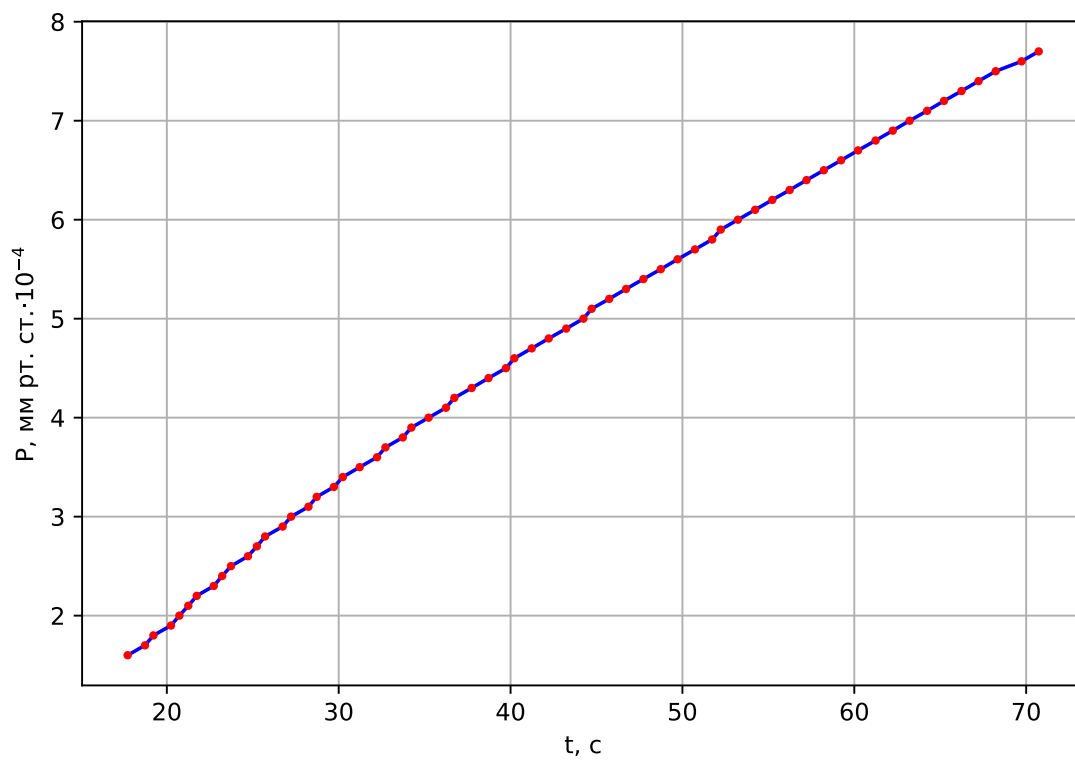
$$W = \frac{C_{тр}P_{фв}}{P_{уст} - P_{пред}} = 327,0 \text{ см}^3/\text{с}$$

## Вывод

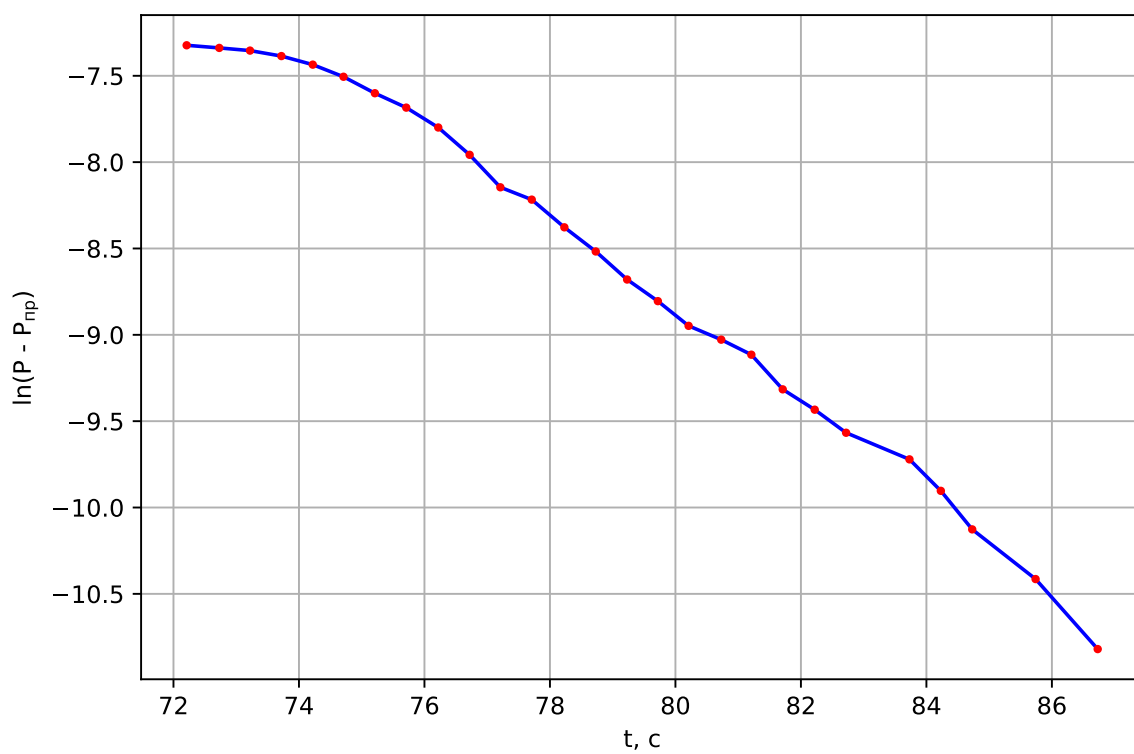
В результате выполнения работы был получен высокий вакуум ( $P = 1,2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.), получены зависимости давления от времени при ухудшении и улучшении вакуума, а также исследована одна из главных особенностей экспериментальной установки – скорость откачки воздуха. При расчёте через улучшение вакуума  $W_1 = 282 \text{ см}^3/\text{с}$ , а при расчёте после создания искусственной течи  $W_2 = 327 \text{ см}^3/\text{с}$ . Полученные результаты достаточно близки и выглядят реалистично.



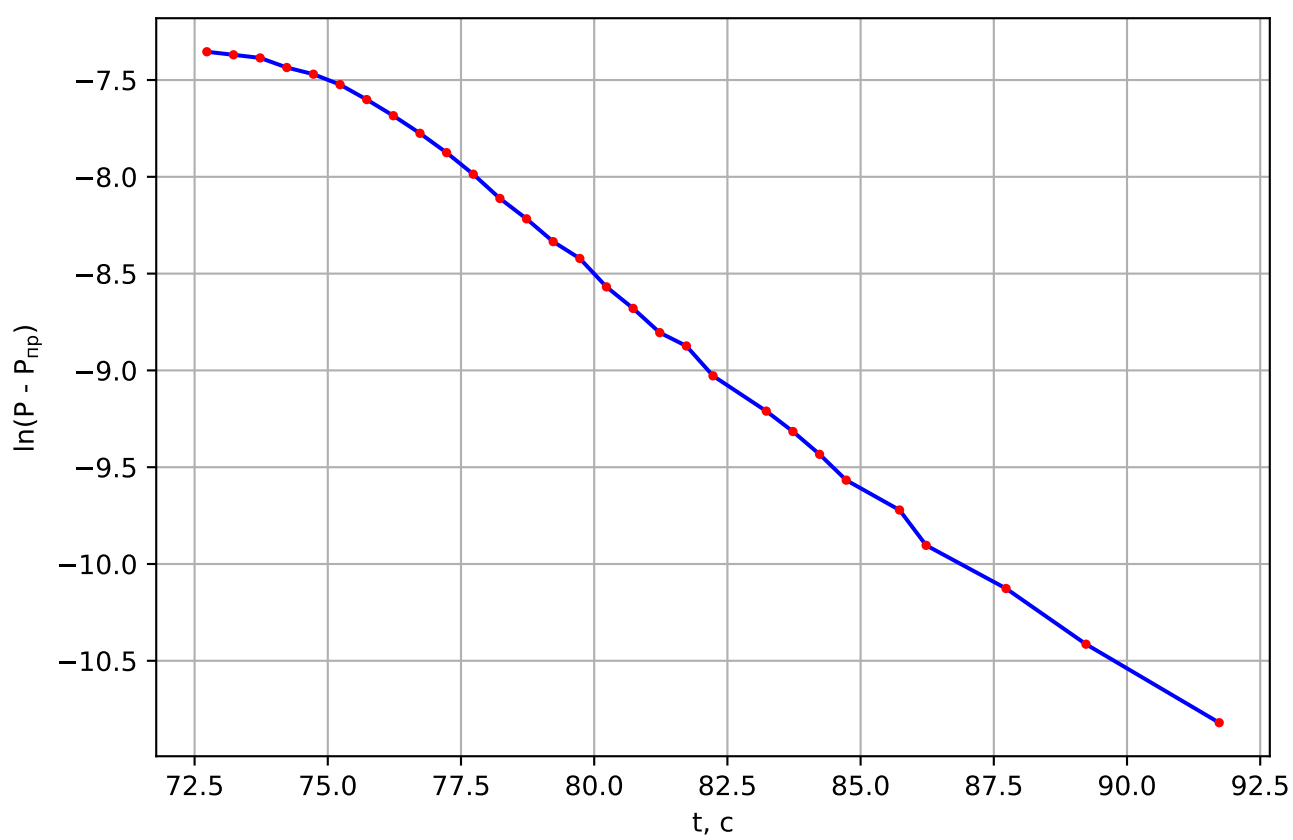
Ухудшение вакуума (первый опыт)



Ухудшение вакуума (второй опыт)



Улучшение вакуума (первый опыт)



Улучшение вакуума (второй опыт)