

# Отчет о выполненной лабораторной работе 2.3.1

Котляров Михаил, Б01-402

## 1 Введение

**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.

**Оборудование:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термодарным, и ионизационным; источник питания; видекамера телефона.

## 2 Экспериментальная установка

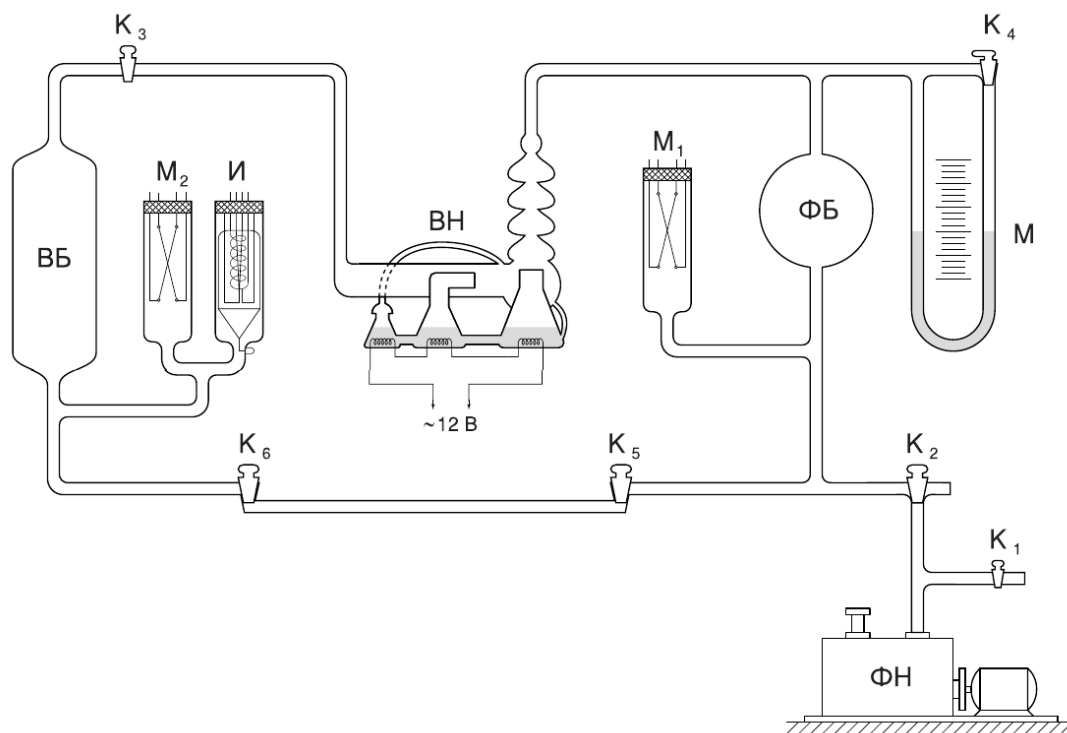


Рис 1. Схема экспериментальной установки.

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термодарных манометров ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов (Рис. 1).

**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).

**Термодарный 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 спаия возрастает. При вакууме  $\sim 10^{-3}$  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).

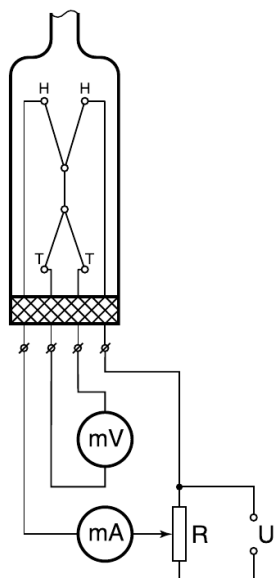


Рис 2. Схема термопарного манометра.

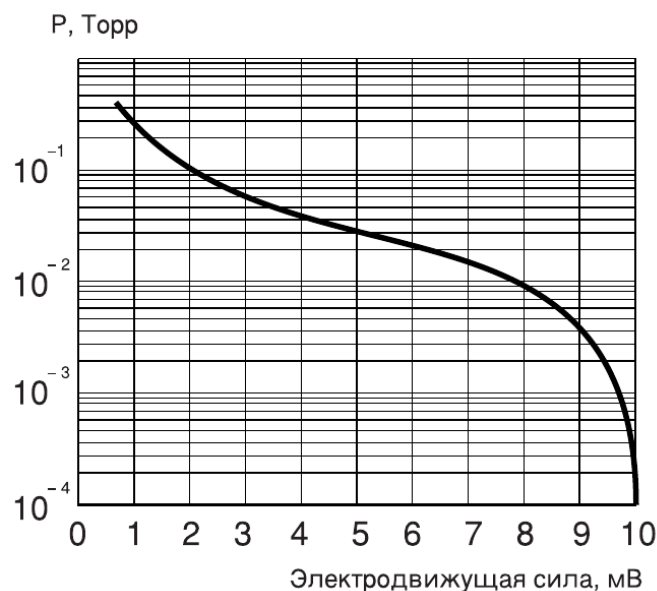


Рис3. Градуировочная кривая термопарного манометра.

**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. 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 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.

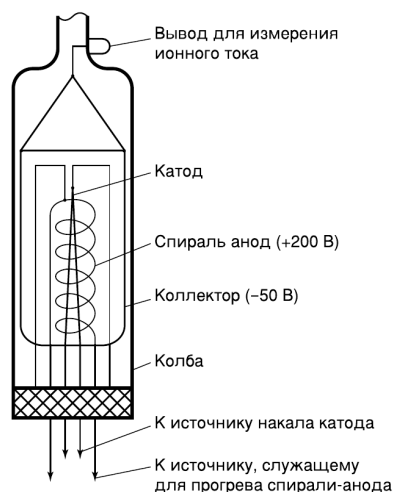


Рис 4. Схема ионизационного манометра.

**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 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.

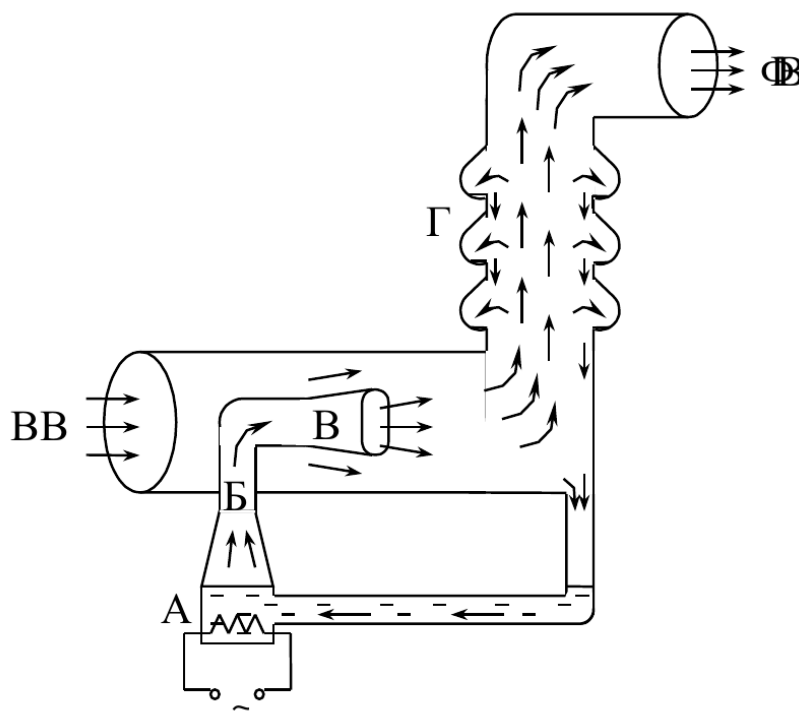


Рис 5. Схема одной ступени диффузионного насоса.

### 3 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 ёмкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через  $Q_n$  - количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне - через течи, через  $Q_{\text{н}}$  - поток газа, поступающего из насоса назад в откачивающую систему. Будем измерять их в единицах  $PV$ . Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_{\text{н}})dt. \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума (давление  $P_{\text{пр}}$ )

$$\frac{dP}{dt} = 0,$$

так что

$$PW = Q_d + Q_n + Q_{\text{н}}. \quad (2)$$

Из этого уравнения получаем

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{\text{пр}}}.$$

Обычно  $Q_{\text{н}}$  постоянно, а  $Q_d$  и  $Q_n$  слабо зависят от времени. Считая скорость откачки  $W$  постоянной, уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}})e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где  $\tau = \frac{V}{W}$  является мерой эффективности откачки системы.

Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума справедлива формула

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

Пренебрежем давлением  $P_1$  у конца обращенного к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении  $P = P_2$ . Пропускная способность трубы

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

Для пропускной способности отверстия имеем формулу

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

### 4 Приборы и данные

- Вакуумметр Мерадат-ВИТ19ИТ2, тип первичного преобразователя ПМИ-2, погрешность в диапазоне  $1 \cdot 10^{-4}$  Па до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па 35% от измеряемой величины.
- Вакуумметр Мерадат-ВИТ16Т4, тип первичного преобразователя ПМТ-2, погрешность в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3}$  торр до 0,2 торр 30% от измеряемой величины.
- Масляной манометр (плотность масла  $\rho = 0,885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ), погрешность измеряющей линейки 1 мм.
- Источник питания GPR-711Н30D, погрешность измерения  $\pm(0,5\% + 2.)$ .
- Термогигрометр с функцией отображения давления testo 622, погрешность измерения давления 3 гПа, температуры - 0,4 °C, влажности - 2% в диапазоне от 0 до 90 %.

### 5 Выполнение

Начальные параметры окружающей среды

$$t = 22,2^\circ \text{C},$$

$$P_0 = 99,00 \text{ кПа},$$

$$\varphi = 41,6\%.$$

## 5.1 Измерение объема баллонов

1. Ход выполнения Перед началом работы убедимся, что кран  $K_2$  закрыт, а остальные открыты. Откроем кран  $K_2$  на 1-2 минуты, чтобы воздух заполнил всю установку. Закроем краны  $K_5$  и  $K_6$ . В этих кранах запирается  $V_{56} = 50 \text{ см}^3$  воздуха при атмосферном давлении. Закроем кран  $K_2$  и включим форвакуумный насос. В течение двух минут насос будет откачивать сам себя. Затем откроем кран  $K_2$  и начнем откачку установки. После откачки закроем кран  $K_2$ , тем самым отсоединив установку от форвакуумного насоса. Давление на манометре ВИТ16  $P_{\text{бак}} = 1,8 \cdot 10^{-2}$  торр. Закроем кран  $K_3$ , отсоединив высоковакуумную часть от форвакуумной. Закроем кран  $K_4$  для подготовки масляного манометра к измерениям. Откроем кран  $K_5$ , распространив запертый в капилляре 5-6 атмосферный воздух по всей форвакуумной части. Установившееся давление зафиксируем на манометре.

$$h_1 = 11,6 \pm 0,1 \text{ см}, \quad h_2 = 37,9 \pm 0,1 \text{ см}, \quad \Delta h' = 26,3 \pm 0,2 \text{ см}.$$

Откроем кран  $K_3$ , заполнив высоковакуумную часть воздухом. Зафиксируем давление на масляном манометре.

$$h_3 = 16,4 \pm 0,1 \text{ см}, \quad h_4 = 33,3 \pm 0,1 \text{ см}, \quad \Delta h'' = 16,9 \pm 0,2 \text{ см}.$$

Закроем кран  $K_4$ . Теперь рассчитаем объем форвакуумной  $V_{\text{фв}}$  и высоковакуумной  $V_{\text{вв}}$  частей с помощью закона Бойля-Мариотта

$$P_1 V_1 = P_2 V_2.$$

$$P_0 V_{56} = (V_{56} + V_{\text{фв}}) \rho_{\text{масло}} g \Delta h',$$

$$V_{\text{фв}} = V_{56} \left( \frac{P_0}{\rho_{\text{масло}} g \Delta h'} - 1 \right) = 0,05 \cdot \left( \frac{99000}{885 \cdot 9,81 \cdot 0,263} - 1 \right) \approx 2,118 \text{ л},$$

$$V_{\text{вв}} = V_{56} \left( \frac{P_0}{\rho_{\text{масло}} g \Delta h''} - 1 \right) - V_{\text{фв}} = 0,05 \cdot \left( \frac{99000}{885 \cdot 9,81 \cdot 0,169} - 1 \right) - 2,118 \approx 1,206 \text{ л},$$

$$\begin{aligned} \sigma_{V_{\text{фв}}} &= (V_{\text{фв}} + V_{56}) \cdot \sqrt{\left( \frac{V_{\text{фв}}}{V_{\text{фв}} + V_{56}} \frac{\sigma_{V_{56}}}{V_{56}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_P}{P} \right)^2} = \\ &= \sqrt{(0,004)^2 + (0,002)^2 + (0,017)^2 + (0,007)^2} = 0,018 \text{ л}, \\ \sigma_{V_{\text{вв}}} &= 0,060 \text{ л}, \end{aligned}$$

2. Итого значения для объемов  $V_{\text{фв}} = 2,118 \pm 0,018$  ( $\varepsilon_{\text{фв}} = 0,87\%$ ),  $V_{\text{вв}} = 1,206 \pm 0,060$  ( $\varepsilon_{\text{вв}} = 5,00\%$ ).

## 5.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

3. Откроем все краны и откачаем всю систему до давления  $\sim 1 \cdot 10^{-2}$  торр. После этого приступим к откачке высоковакуумного баллона с помощью диффузионного насоса. Выставим на источнике питания ток  $I = 0,6$  А, подождем приблизительно 5 минут, чтобы масло прогрелось, а затем постепенно установим ток 1,27 А. Дождемся давления  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  торр и запустим ионизационный манометр. После того, как давление достигнет  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  торр, проведем дегазацию.

Выждав установленное время дегазации, давление достигло  $P_{\text{пр}} = (8,30 \pm 2,91) \cdot 10^{-5}$  торр. Теперь будем фиксировать изменение давления от времени с помощью видеокамеры телефона. Для этого закроем кран  $K_3$ , отключив тем самым откачку высоковакуумного баллона. Будем фиксировать ухудшение вакуума до давления  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ , а затем опять откроем кран  $K_3$  и будем фиксировать улучшение. Проведем этот опыт два раза.

По полученным данным построим зависимость  $P(t)$ . Также для экспоненциального участка при улучшении давления построим график зависимости  $\ln(P - P_{\text{пр}})$ .

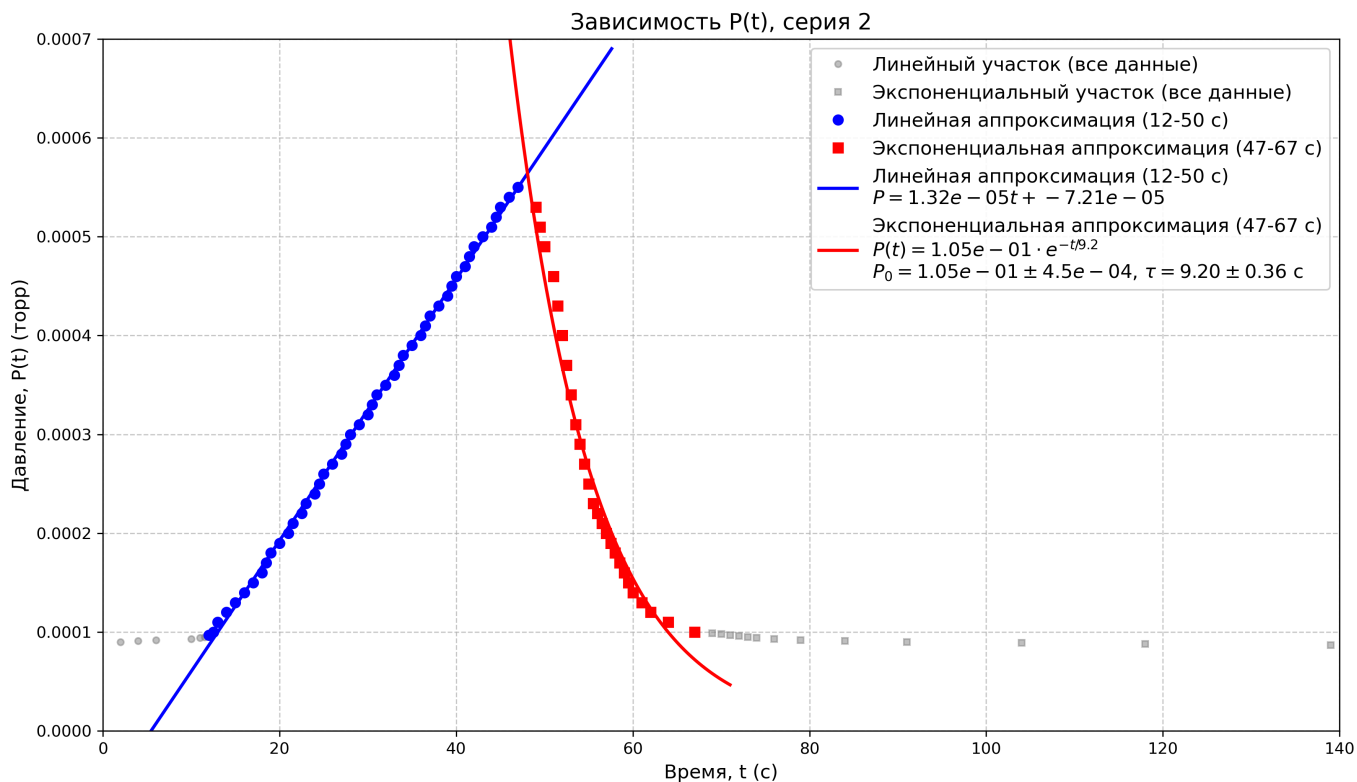


График 1. График зависимости давления от времени  $P(t)$  для первой серии

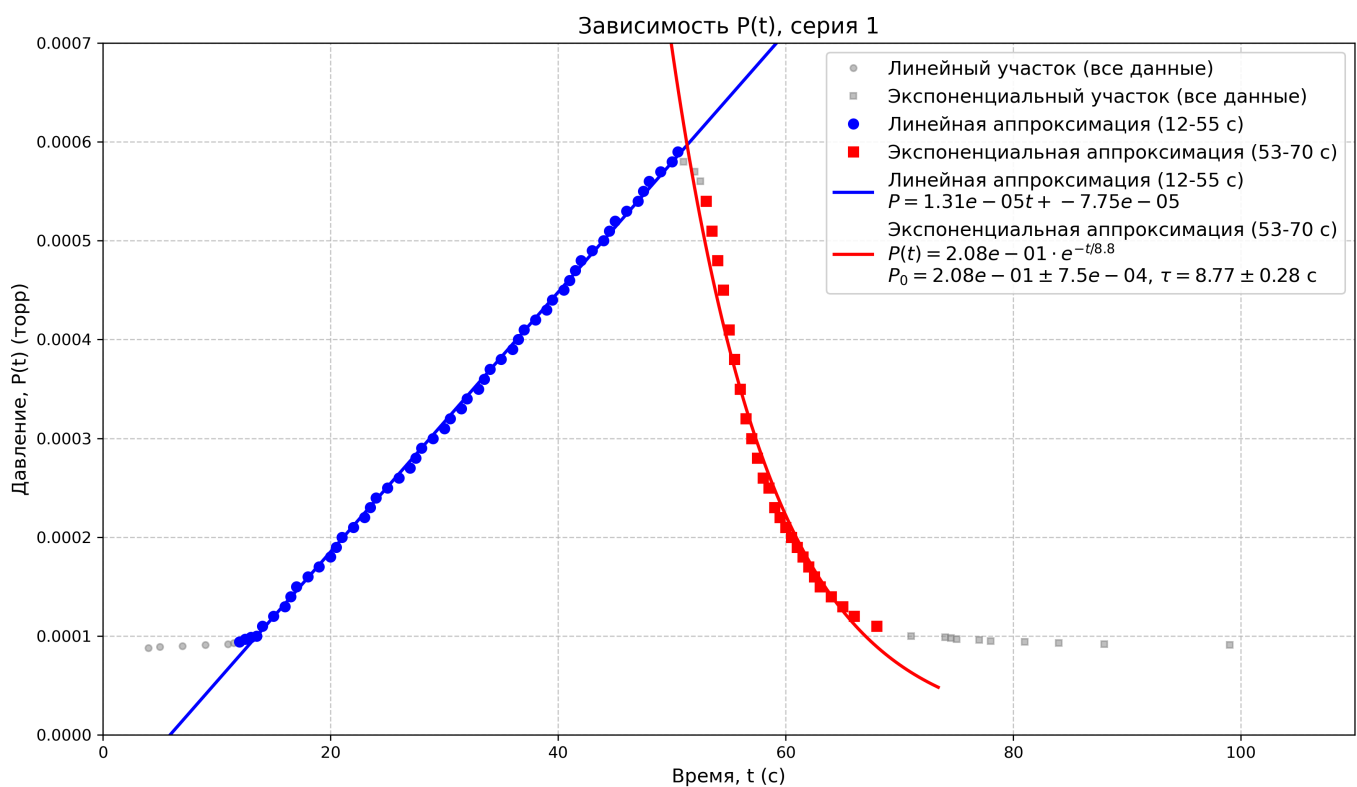


График 2. График зависимости давления от времени  $P(t)$  для второй серии

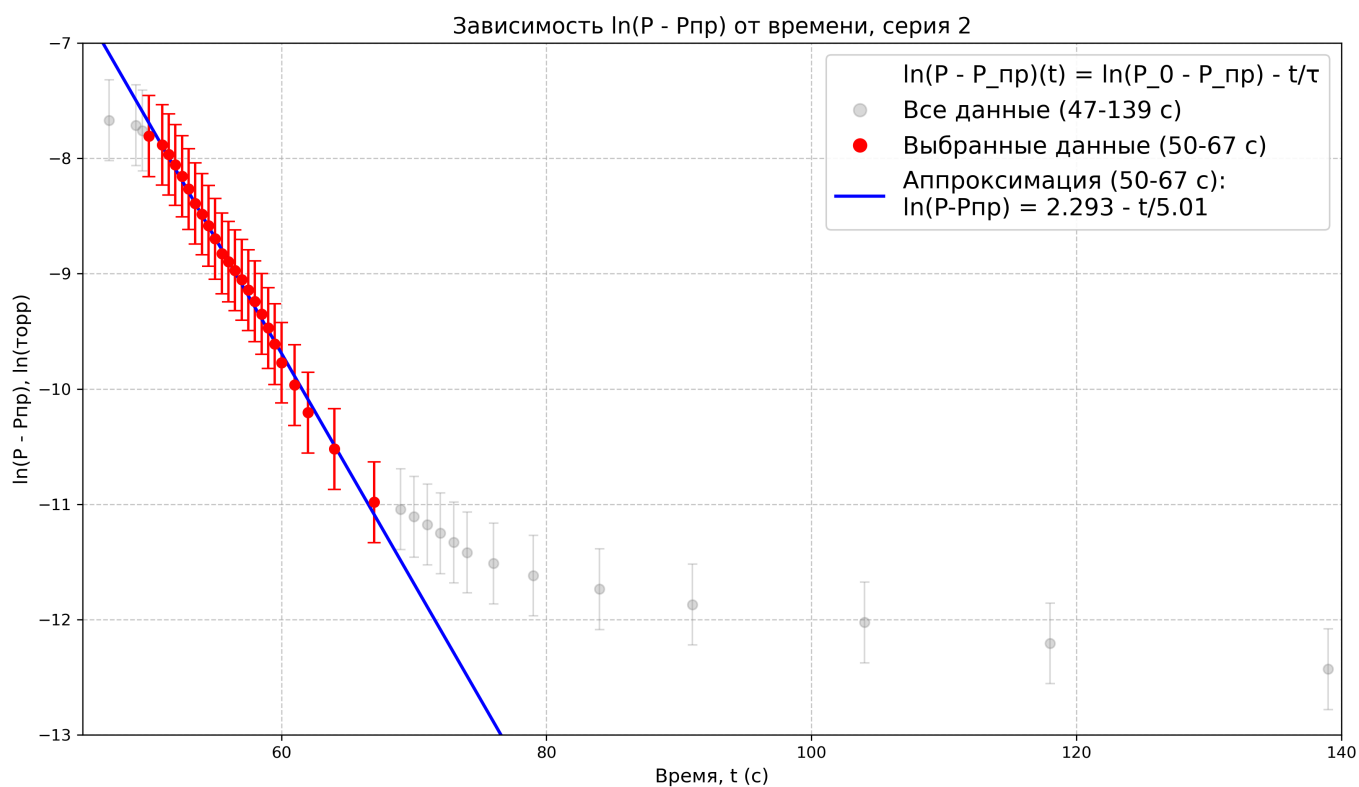


График 3. График зависимости логарифма разности давления и предельного давления от времени  $\ln(P - P_{пр})$  для первой серии

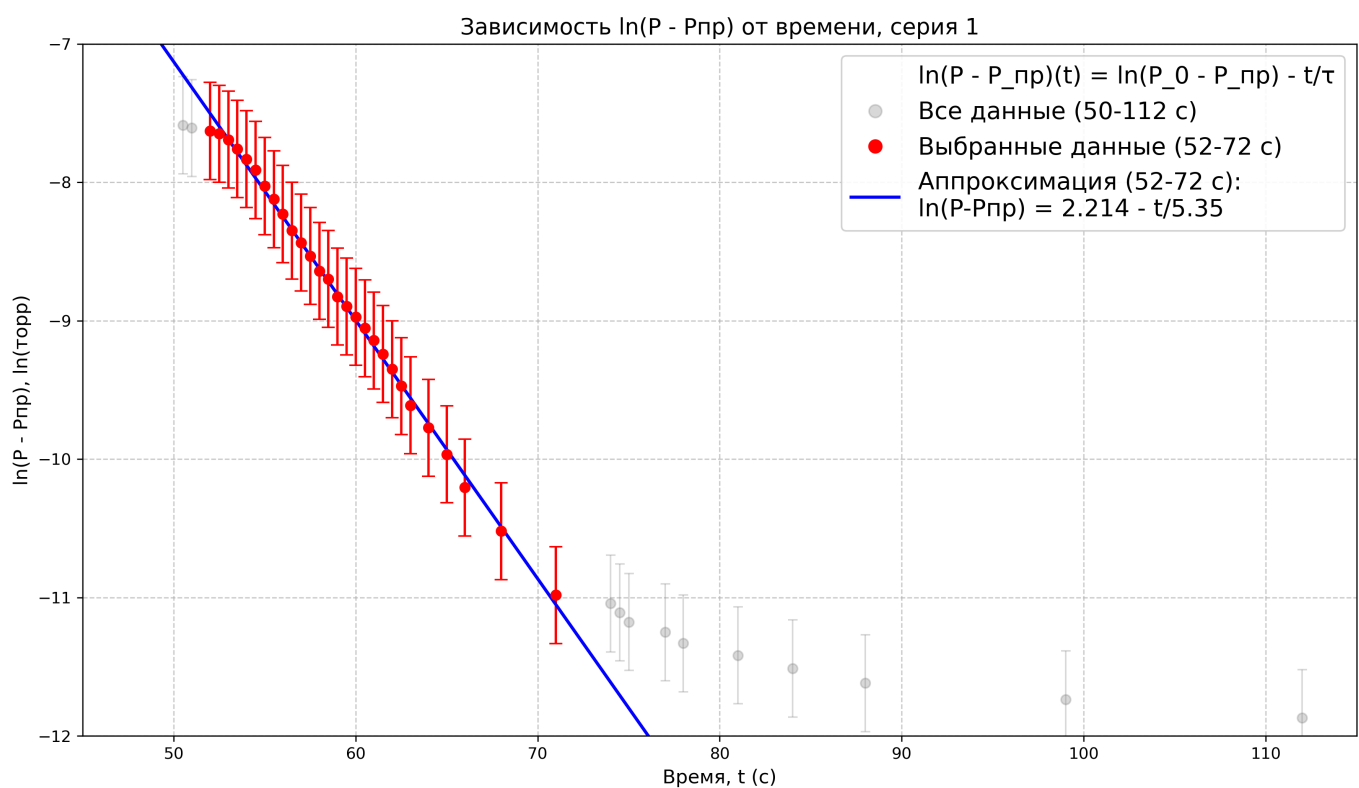


График 4. График зависимости логарифма разности давления и предельного давления от времени  $\ln(P - P_{пр})$  для второй серии

Получившиеся параметры прямых

$$k_1^{lin} = (1.324 \pm 0,006) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}},$$

$$k_2^{lin} = (1.314 \pm 0,005) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}},$$

$$\frac{1}{k_1^{exp}} = \tau_1 = (5,01 \pm 0,07) \text{ с},$$

$$\frac{1}{k_2^{exp}} = \tau_2 = (5,35 \pm 0,05) \text{ с},$$

$$\tau = \bar{\tau} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = (5,18 \pm 0,06) \text{ с}.$$

4. Рассчитаем скорость откачки  $W$

$$W = \frac{V_{\text{вв}}}{\tau} = \frac{1,206}{5,18} = 0,233 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$\sigma_W = W \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_{\text{вв}}}}{V_{\text{вв}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tau}}{\tau}\right)^2} = 0,233 \cdot \sqrt{(0,05)^2 + (0,01)^2} = 0,012 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$\varepsilon_W = 5,14\%.$$

5. Оценим величину потока газа  $Q_{\text{н}}$ , поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Воспользуемся уравнением

$$V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}}) dt.$$

В качестве  $k = \frac{dP}{dt}$  возьмем  $\bar{k} = \frac{k_1^{lin} + k_2^{lin}}{2} = (1,319 \pm 0,006) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}}$ . Зная также, что  $PW = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}$ , получим

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}} W - k V_{\text{вв}} = 8,30 \cdot 10^{-5} \cdot 0,233 - 1,319 \cdot 10^{-5} \cdot 1,206 = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}.$$

Посчитаем погрешность

$$\begin{aligned} \sigma_{Q_{\text{н}}} &= \sqrt{(\sigma_{P_{\text{пр}}} W)^2 + (P_{\text{пр}} \sigma_W)^2 + \sqrt{(\sigma_{V_{\text{вв}}} k)^2 + (V_{\text{вв}} \sigma_k)^2}} = \\ &= 10^{-3} \cdot \sqrt{(6,762)^2 + (0,992)^2 + \sqrt{(0,793)^2 + (0,067)^2}} = 7,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Исходя из этого можно сделать вывод, что таким методом можно оценить только приблизительный порядок величины.

### 5.3 Метод введения искусственной течи

6. Откроем кран  $K_5$  и введем в систему искусственную течь. Через 3-5 минут измерим установившееся давление.  $P_{\text{уст}} = (1,60 \pm 0,56) \cdot 10^{-4}$ . Также зафиксируем давление со стороны форвакуумной части.

$P_{\text{фв}} = (5,40 \pm 1,62) \cdot 10^{-3}$ . С помощью соотношений  $P_{\text{пр}} W = Q_1$ ,  $P_{\text{уст}} W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}$  а также формулы (4), исключив  $W Q_1$  найдем скорость откачки системы  $W$ . Размеры капилляра  $r = 0,8 \pm 0,1$  мм,  $L = 10,8 \pm 0,1$  см.

$$C_{\text{кап}} = \frac{4}{3} \frac{(0,8 \cdot 10^{-3})^3}{10,8 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,1415 \cdot 8,31 \cdot (273 + 22,2)}{29 \cdot 10^{-3}}} = 5,76 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$\sigma_{C_{\text{кап}}} = C_{\text{кап}} \sqrt{\left(\frac{3\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} =$$

$$= 5,76 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{(0,375)^2 + (0,009)^2 + (0,001)^2} = 2,16 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$W = \frac{C_{\text{кап}}(P_{\text{фв}} - P_{\text{уст}})}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = \frac{2,16 \cdot 10^{-7} \cdot (5,4 \cdot 10^{-3} - 1,6 \cdot 10^{-4})}{1,6 \cdot 10^{-4} - 8,3 \cdot 10^{-5}} = 3,92 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 0,04 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$\begin{aligned} \sigma_W &= C_{\text{кап}} \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{фв}}} \frac{\sigma P_{\text{фв}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{уст}}} \frac{\sigma P_{\text{уст}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{пр}}} \frac{\sigma P_{\text{пр}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial C_{\text{кап}}} \frac{\sigma C_{\text{кап}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2} = \\ &= 5,76 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{(2)^2 + (5)^2 + (3)^2 + (3)^2} = 3,77 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \end{aligned}$$

$$\varepsilon_W = 96\%.$$

Таким образом величина  $W \approx 0,04 \frac{\text{л}}{\text{с}}$  получена с огромной погрешностью, что говорит о неточности такого метода измерения.



## 6 Результаты и обсуждения

1. Вычисленные объёмы форвакуумного и высоковакуумного баллонов получены с хорошей точностью.  $V_{\text{фв}} = 2,118 \pm 0,018$  ( $\varepsilon_{\text{фв}} = 0,87\%$ ),  $V_{\text{вв}} = 1,206 \pm 0,060$  ( $\varepsilon_{\text{вв}} = 5,00\%$ ).
2. По графикам 1-4 отчетливо видно, что давление растёт линейно со временем при просачивании воздуха, а откачка идет по экспоненте.  
С помощью графиков 3-4 получили характерное время откачки  $\tau = (5,18 \pm 0,06)$  с.
3. С помощью двух методов мы определили скорость откачки  $W$ : по улучшению вакуума (метод 1) и по введению искусственной течи (метод 2).

Метод	$W, \frac{\text{л}}{\text{с}}$	$\sigma_W, \frac{\text{л}}{\text{с}}$	$\varepsilon_W, \%$
1	0,233	0,012	5,1
2	0,039	0,038	96,1

Сравнение результатов измерения скорости откачки разными методами

Первый метод оказался довольно точным, погрешность составила всего 5 %. Второй метод не подходит для измерений с большой точностью, а только для грубой оценки. Погрешность радиуса дает больший вклад, т.к. зависимость от куба, поэтому погрешность почти равна самой величине.

4. Оцененное значение для потока газа  $Q_{\text{н}} = (3,5 \pm 7,6) \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$  также получено исключительно оценочно, о этом можно судить исходя из погрешности.

## 7 Выводы

Были вычислены с помощью вакуумной установки, манометров и закона Бойля-Мариотта объёмы форвакуумного и высоковакуумного баллонов. С помощью двух методов определили скорость откачки насоса. Построили графики зависимостей  $P(t)$  и  $\ln(P - P_{\text{пр}})$ . Оценили значение для потока газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему.