

# Отчёт о выполненной лабораторной работе

## *Получение и измерение вакуума (2.3.1)*

Каплин Артём Б01-402

5 мая 2025

## 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, термopарным, и ионизационным; источник питания; видеокамера телефона..

## 2 Экспериментальная установка

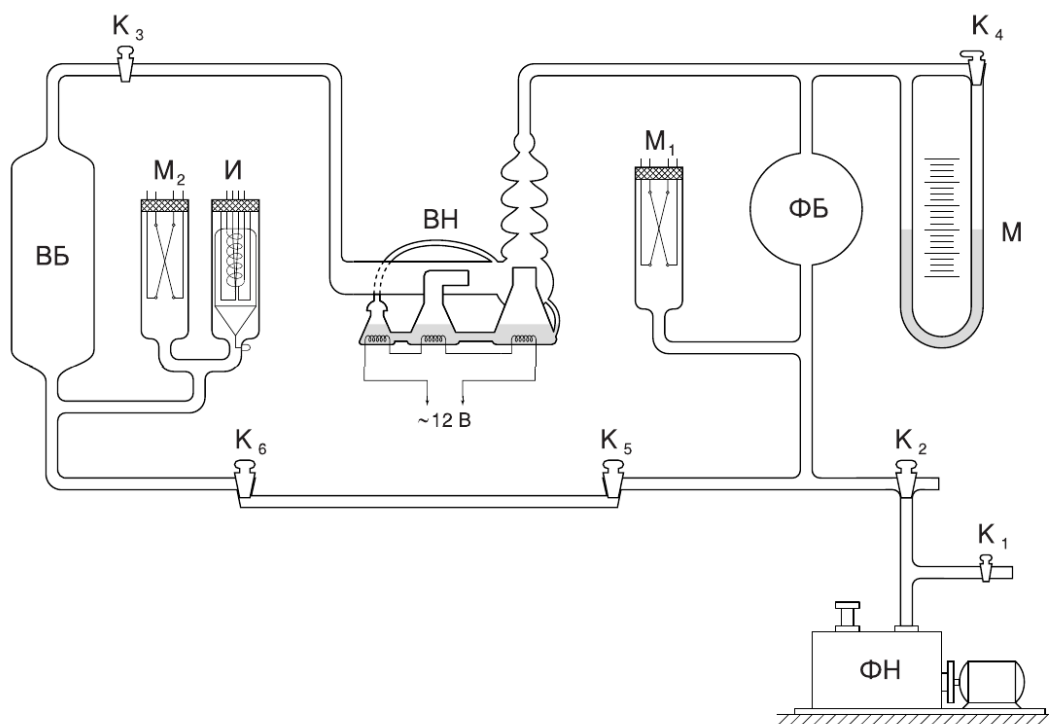
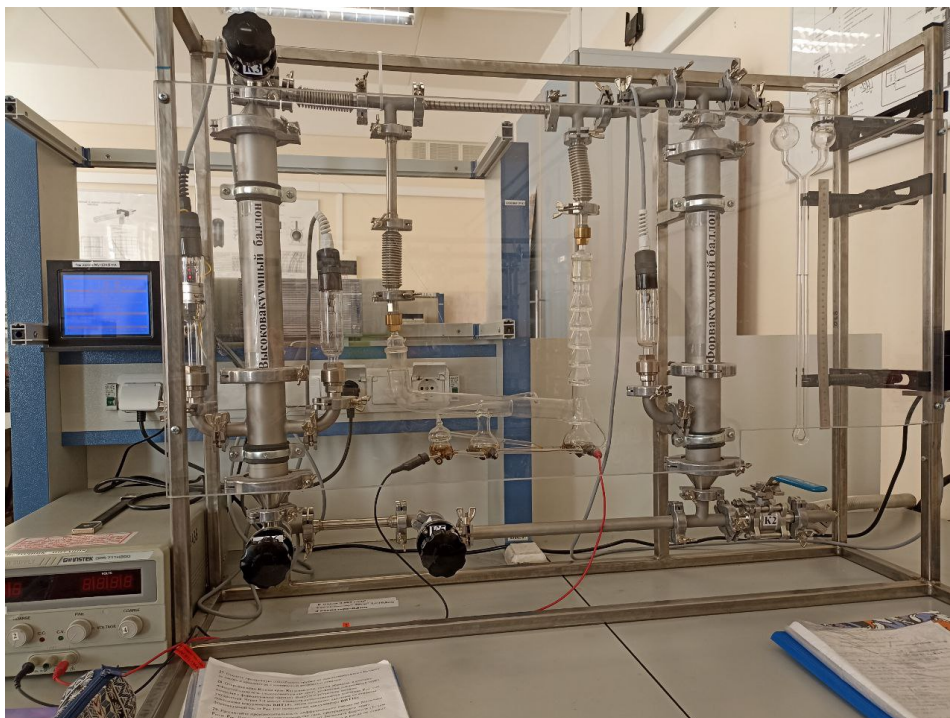


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

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



**Масляный манометр:** Представляет собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, обладающим весьма низким давлением насыщенных паров. Так как плотность масла мала,  $\rho = 0,885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ , то при помощи манометра можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких торр).

**Термопарный манометр:** Чувствительным элементом манометра является термопара, заключенная в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на (Рис. 5). 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  $\sim 10^{-3}$  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).

**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 термопарно-

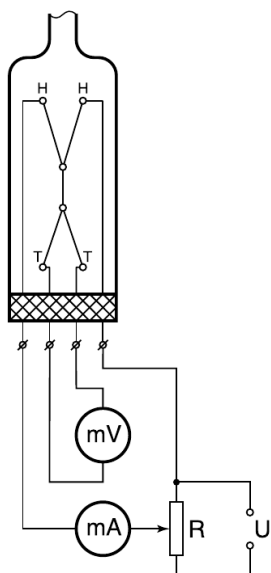


Рис. 2: Схема термпарного манометра.

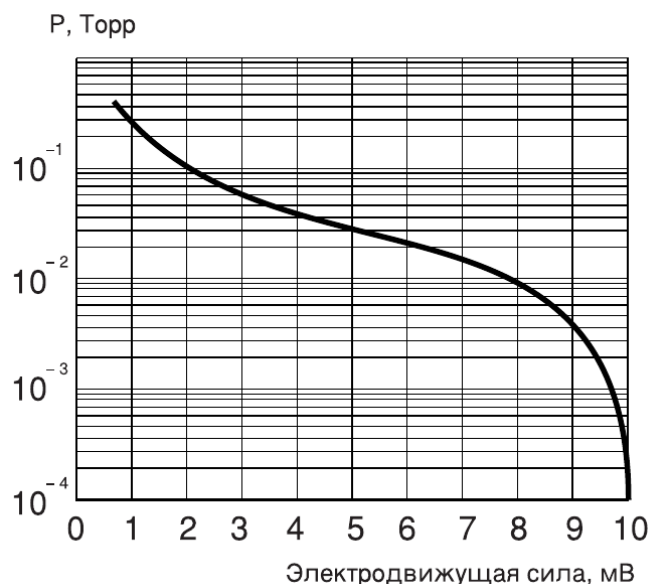


Рис. 3: Градуировочная кривая термпарного манометра.

му 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.

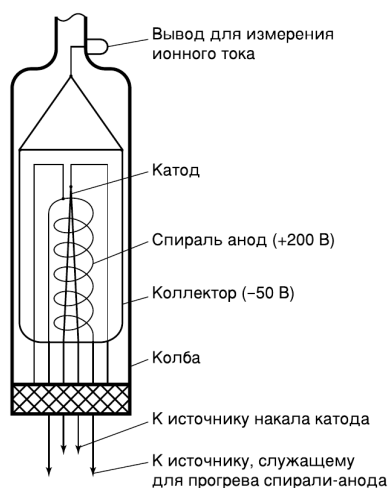


Рис. 4: Схема ионизационного манометра.

**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. ??) (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.

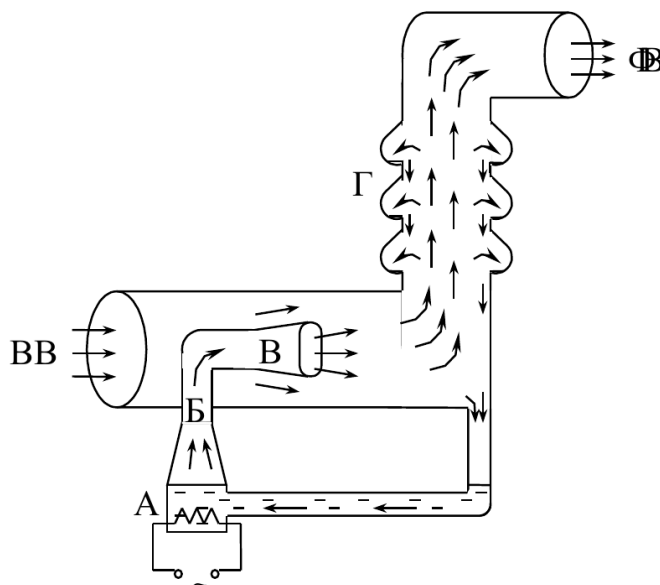


Рис. 5: Схема одной ступени диффузионного насоса.

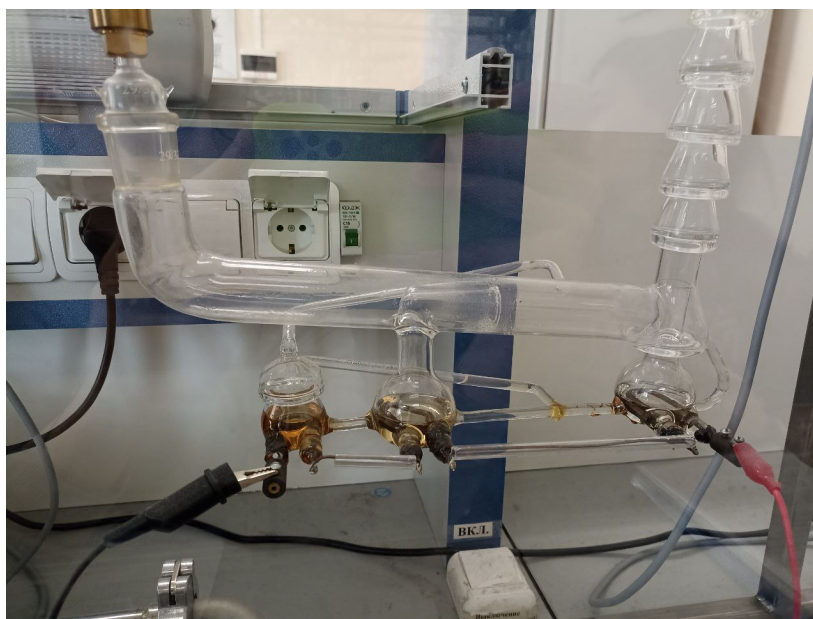


Рис. 6: Фото диффузионного насоса.

### 3 Теоретическая часть

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  $Q_{и}$  - количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне - через течи, через  $Q_n$  - поток газа, поступающего из насоса назад в откачивающую систему. Будем измерять их в единицах  $PV$ . Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

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

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

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

так что

$$PW = Q_d + Q_{и} + Q_n. \quad (2)$$

Из этого уравнения получаем

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{пр}}.$$

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

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

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

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

Для пропускной способности отверстия имеем формулу

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

## 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.
- Источник питания GPR-711Н30D, погрешность измерения  $\pm(0,5\% + 2.)$
- Масляной манометр, погрешность измеряющей линейки 1 мм, плотность масла  $\rho = 0,885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .
- 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 Ход работы

### 5.1 Оценка объема форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Зафиксируем начальные параметры окружающей среды:

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

$$P_0 = 99,00 \text{ кПа},$$

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

2. Через открытые краны К1 и К2 впускаем в систему атмосферный воздух.
3. Перекрываем К5 и К6, запирая в объеме  $V_{\text{зап}} = 50 \text{ см}^3$  воздуха.
4. После этого закрываем К1 и К2, включаем форвакуумный насос. Через К2 подключаем установку к насосу и откачиваем до давления  $1,8 \cdot 10^{-2}$  торр.
5. Отключаем установку от насоса, повернув ручку К2, и вновь открываем К1.
6. Закрываем К3, изолируя высоковакуумную (ВВ) часть от форвакуумной (ФВ).
7. Перекрываем кран К4.
8. Открываем К5 и считываем уровни масла с обеих сторон манометра, чтобы определить давление  $P_1$ . Результаты заносим в таблицу.

$h_1, \text{ см}$	$h_2, \text{ см}$	$h_3, \text{ см}$	$h_4, \text{ см}$
$11,6 \pm 0,1$	$37,9 \pm 0,1$	$16,4 \pm 0,1$	$33,3 \pm 0,1$

Таблица 1: Результаты измерений уровней масла и давления

9. Теперь рассчитаем объем форвакуумной  $V_{\text{ФВ}}$  и высоковакуумной  $V_{\text{ВВ}}$  частей с помощью закона Бойля-Мариотта.

$$\Delta h' = h_2 - h_1 = 26,3 \pm 0,2 \text{ см} \quad \Delta h'' = h_4 - h_3 = 16,9 \pm 0,2 \text{ см}.$$

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

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

$$\sigma_{V_{\text{фв}}} = (V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}}) \cdot \sqrt{\left( \frac{V_{\text{фв}}}{V_{\text{фв}} + V_{\text{зап}}} \frac{\sigma_{V_{\text{зап}}}}{V_{\text{зап}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\rho}}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_P}{P} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,004)^2 + (0,002)^2 + (0,017)^2 + (0,007)^2} = 0,018 \text{ л},$$

$$\sigma_{V_{\text{вв}}} = 0,060 \text{ л},$$

10. В итоге получаем вот такие объёмы:  $V_{\text{фв}} = 2,118 \pm 0,018$  ( $\varepsilon_{\text{фв}} = 0,87\%$ ),  $V_{\text{вв}} = 1,206 \pm 0,060$  ( $\varepsilon_{\text{вв}} = 5,00\%$ )

## 5.2 Достижение высокого вакуума и определение скорости откачки

11. Открываем все краны и производим предварительную откачку системы до давления порядка  $1 \cdot 10^{-2}$  торр.
12. Подаём ток  $I = 0,6$  А на диффузионный насос и ждём около 5 минут для прогрева масла. Затем плавно увеличиваем ток до 1,27 А.
13. После достижения давления порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  торр включаем ионизационный манометр.
14. При снижении давления до  $1 \cdot 10^{-4}$  торр начинаем дегазацию.
15. После установленного времени дегазации достигаем предельного давления:

$$P_{\text{пр}} = (8,30 \pm 2,91) \cdot 10^{-5} \text{ торр}.$$

16. Закрываем кран  $K_3$ , отключая откачку высоковакуумной части, и с помощью видеокамеры фиксируем рост давления до  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  торр.
17. Затем вновь открываем  $K_3$  и наблюдаем восстановление вакуума. Повторяем этот цикл дважды.
18. По полученным данным строим зависимость давления от времени  $P(t)$ .
19. Для участка восстановления вакуума (экспоненциальный спад) строим график зависимости  $\ln(P - P_{\text{пр}})$ . Все графики представлены в приложении работы.
20. В результате аппроксимации линейных участков графиков зависимости давления от времени были получены следующие значения скоростей изменения давления:

$$k_1^{\text{lin}} = (1,312 \pm 0,005) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}}, \quad k_2^{\text{lin}} = (1,323 \pm 0,006) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}}.$$

Для экспоненциальных участков восстановления вакуума рассчитаны соответствующие постоянные времени:

$$\tau_1 = \frac{1}{k_1^{\text{exp}}} = (5,84 \pm 0,16) \text{ с}, \quad \tau_2 = \frac{1}{k_2^{\text{exp}}} = (5,85 \pm 0,17) \text{ с}.$$

Среднее значение постоянной времени, учитывающее оба эксперимента, составляет:

$$\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = (5,85 \pm 0,17) \text{ с}.$$

21. Зная объём исследуемой области установки  $V_{\text{вв}} = 1,206$  л, рассчитаем эффективную скорость откачки:

$$W = \frac{V_{\text{вв}}}{\tau} = \frac{1,206}{5,85} = 0,206 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Погрешность определения  $W$ :

$$\sigma_W = W \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_{\text{вв}}}}{V_{\text{вв}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tau}}{\tau}\right)^2} = 0,206 \cdot \sqrt{(0,05)^2 + (0,03)^2} = 0,012 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_W = 5,83\%.$$

22. Для оценки потока газа  $Q_{\text{н}}$ , возвращающегося из насоса в систему, используем выражение:

$$V_{\text{вв}} \frac{dP}{dt} = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}.$$

В качестве средней скорости изменения давления используем:

$$\bar{k} = \frac{k_1^{\text{lin}} + k_2^{\text{lin}}}{2} = (1,318 \pm 0,006) \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр}}{\text{с}}.$$

С учётом уравнения баланса потоков  $PW = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}$ , выражаем:

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}} W - \bar{k} V_{\text{вв}} = 8,30 \cdot 10^{-5} \cdot 0,206 - 1,319 \cdot 10^{-5} \cdot 1,206 = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}.$$

Расчёт полной погрешности:

$$\sigma_{Q_{\text{н}}} = \sqrt{(\sigma_{P_{\text{пр}}} W)^2 + (P_{\text{пр}} \sigma_W)^2 + \sqrt{(\sigma_{V_{\text{вв}}} \bar{k})^2 + (V_{\text{вв}} \sigma_{\bar{k}})^2}} = 7,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Таким образом, метод позволяет лишь приблизительно оценить порядок величины  $Q_{\text{н}}$ .

### 5.3 Метод введения искусственной течи

В ходе эксперимента была создана искусственная течь с помощью открытия крана  $K_5$ . Через 3–5 минут были зафиксированы установившиеся давления:

- Давление в системе:  $P_{\text{уст}} = (1,60 \pm 0,56) \cdot 10^{-4}$  торр
- Давление со стороны форвакуумной части:  $P_{\text{фв}} = (5,40 \pm 1,62) \cdot 10^{-3}$  торр
- Остаточное предельное давление:  $P_{\text{пр}} = (8,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$  торр

Размеры капилляра, используемого в системе:

$$r = (0,80 \pm 0,10) \text{ мм}, \quad L = (10,8 \pm 0,1) \text{ см}$$

Рассчитаем по данным формулам:



$$C_{\text{кап}} = \frac{4}{3} \frac{(r)^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} = 5,76 \cdot 10^{-7} \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

$$\sigma_{C_{\text{кап}}} = C_{\text{кап}} \cdot \sqrt{\left(\frac{3\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} = 2,16 \cdot 10^{-7} \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

Расчёт производительности вакуумной системы:

$$W = \frac{C_{\text{кап}}(P_{\text{фв}} - P_{\text{уст}})}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} = 0,04 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Оценка погрешности:

$$\sigma_W = C_{\text{кап}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{фв}}} \cdot \frac{\sigma_{P_{\text{фв}}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{уст}}} \cdot \frac{\sigma_{P_{\text{уст}}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{пр}}} \cdot \frac{\sigma_{P_{\text{пр}}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial C_{\text{кап}}} \cdot \frac{\sigma_{C_{\text{кап}}}}{C_{\text{кап}}}\right)^2}$$

$$= 3,77 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}^3}{\text{с}}, \quad \varepsilon_W = 96\%$$

**Вывод:** полученное значение производительности  $W \approx 0,04 \frac{\text{л}}{\text{с}}$  сопровождается большой относительной погрешностью, что свидетельствует о низкой точности метода искусственной течи.

## 6 Обсуждения и результаты

- Объёмы форвакуумного и высоковакуумного резервуаров были определены с хорошей точностью:

$$V_{\text{фв}} = 2,118 \pm 0,018 \text{ л} \quad (\varepsilon_{\text{фв}} = 0,87\%), \quad V_{\text{вв}} = 1,206 \pm 0,060 \text{ л} \quad (\varepsilon_{\text{вв}} = 5,00\%)$$

- На графиках наблюдается линейный рост давления при поступлении воздуха и экспоненциальное уменьшение давления при откачке.

На основании графиков 3 и 4 получено значение характерного времени откачки:

$$\tau = (5,85 \pm 0,17) \text{ с}$$

- Скорость откачки  $W$  была рассчитана двумя методами: первый — по улучшению вакуума, второй — по созданной искусственной течи. Результаты сведены в таблицу ниже:

Метод	$W, \frac{\text{л}}{\text{с}}$	$\sigma_W, \frac{\text{л}}{\text{с}}$	$\varepsilon_W, \%$
1	0,206	0,012	5,8
2	0,039	0,038	96,1

Таблица 2: Результаты определения скорости откачки двумя методами

Метод 1 оказался достаточно надёжным: относительная погрешность составляет около 6 %. Метод 2 демонстрирует высокую неопределённость (погрешность почти равна самой величине), что связано с сильным влиянием ошибок измерения радиуса трубки, от которого результат зависит в кубе. Его можно использовать лишь для приближённой оценки.

- Оценка обратного потока газа из насоса дала значение:

$$Q_{\text{н}} = (1,2 \pm 7,6) \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

При этом большая величина погрешности указывает на ориентировочный характер результата.

## 7 Выводы

Были вычислены с помощью вакуумной установки, манометров и закона Бойля-Мариотта объемы 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.

## 8 Приложение

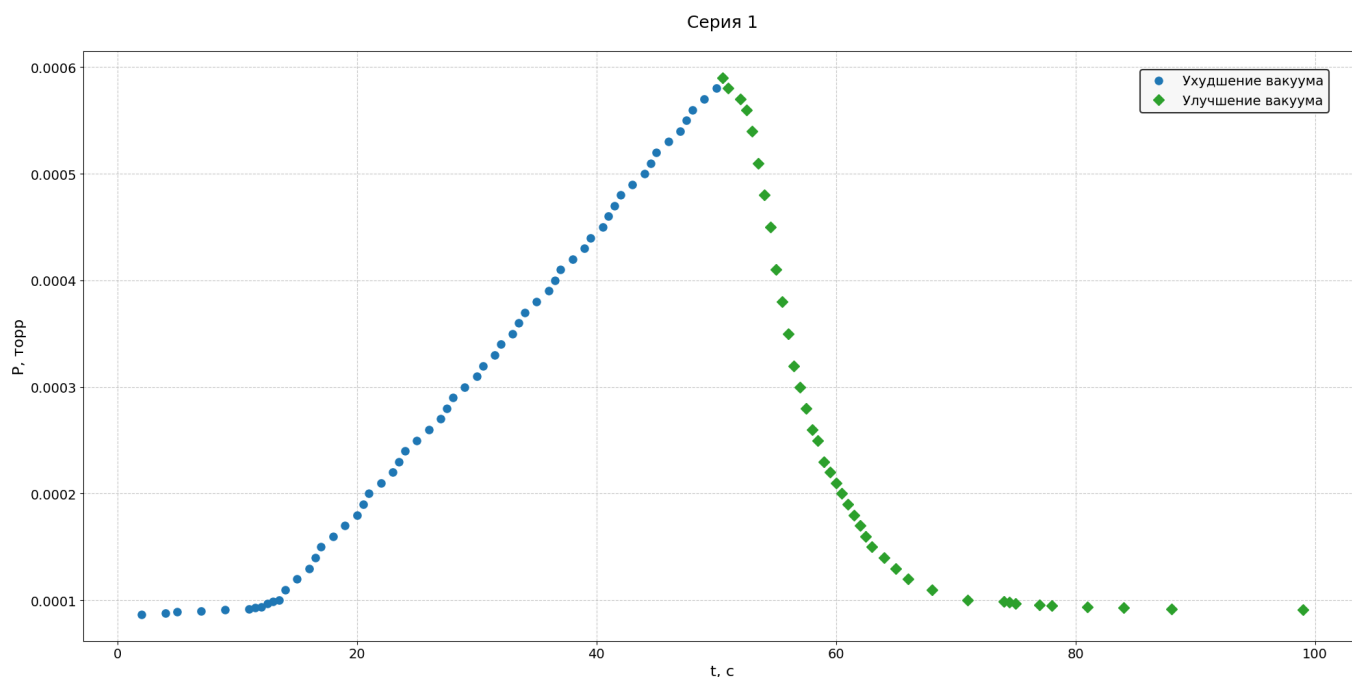


Рис. 7: Первая серия опыта

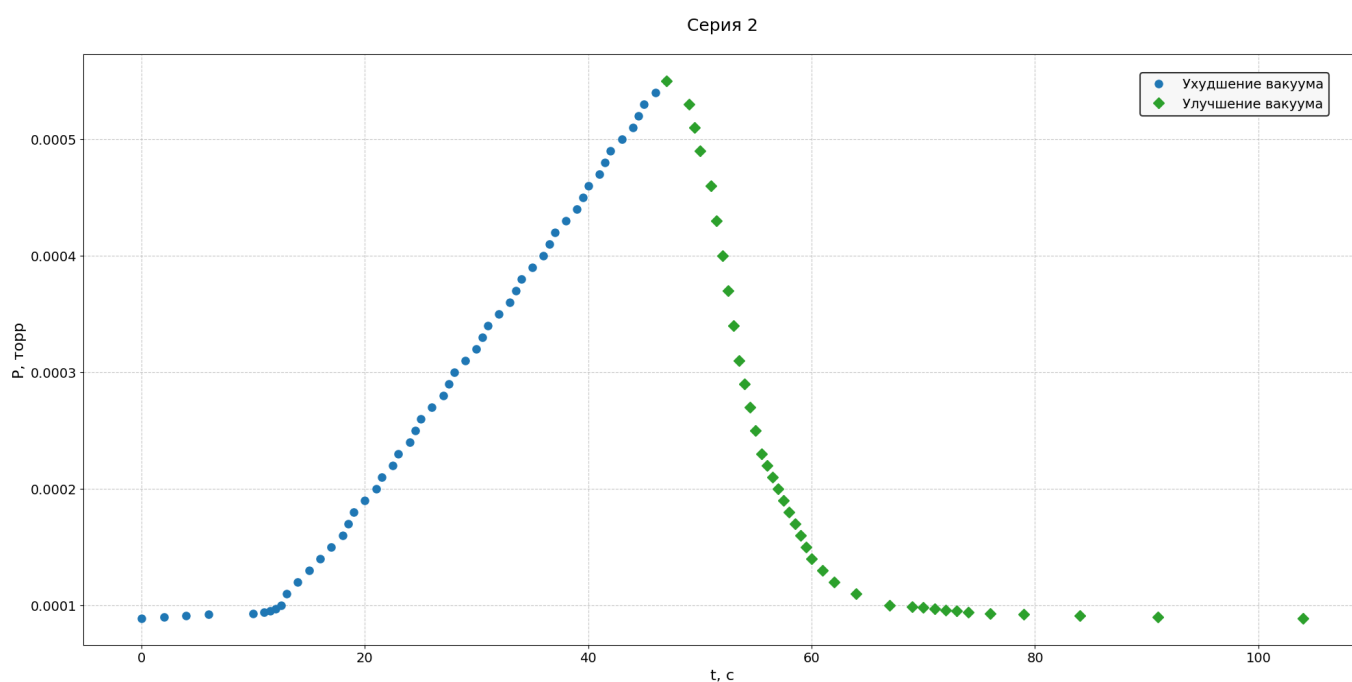


Рис. 8: Вторая серия опыта

Зависимость  $P(t)$ , Серия 1

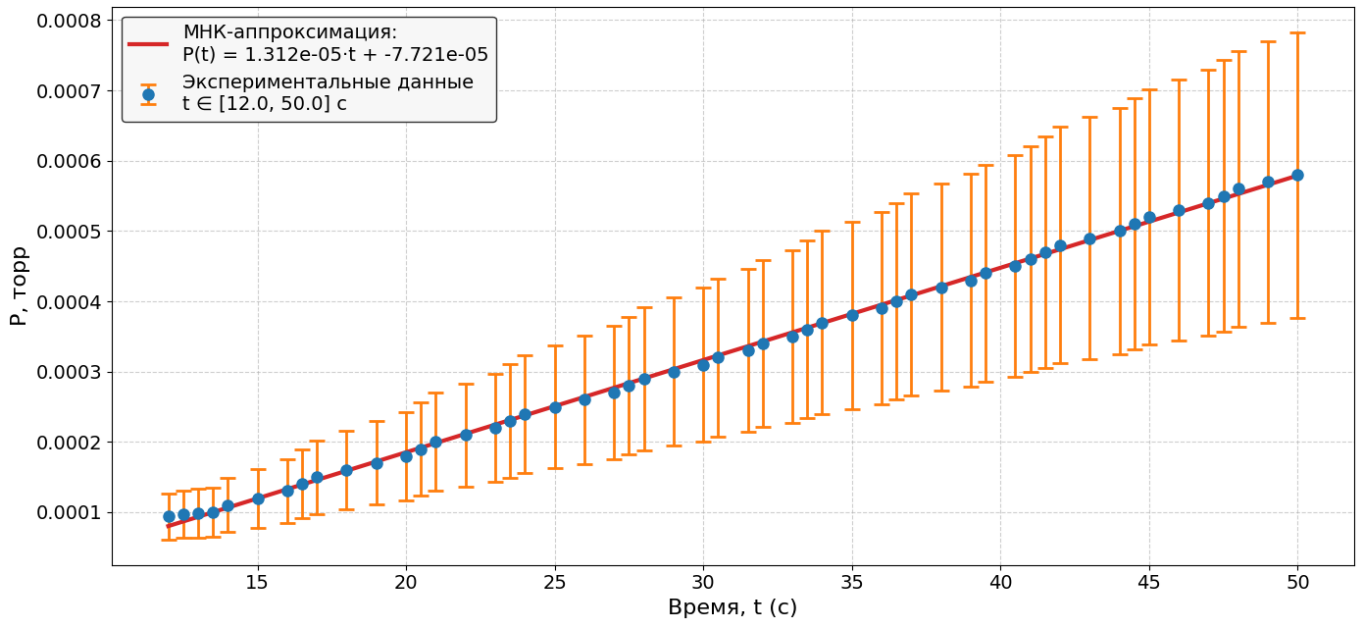


Рис. 9: Ухудшение вакуума

Зависимость  $P(t)$ , Серия 2

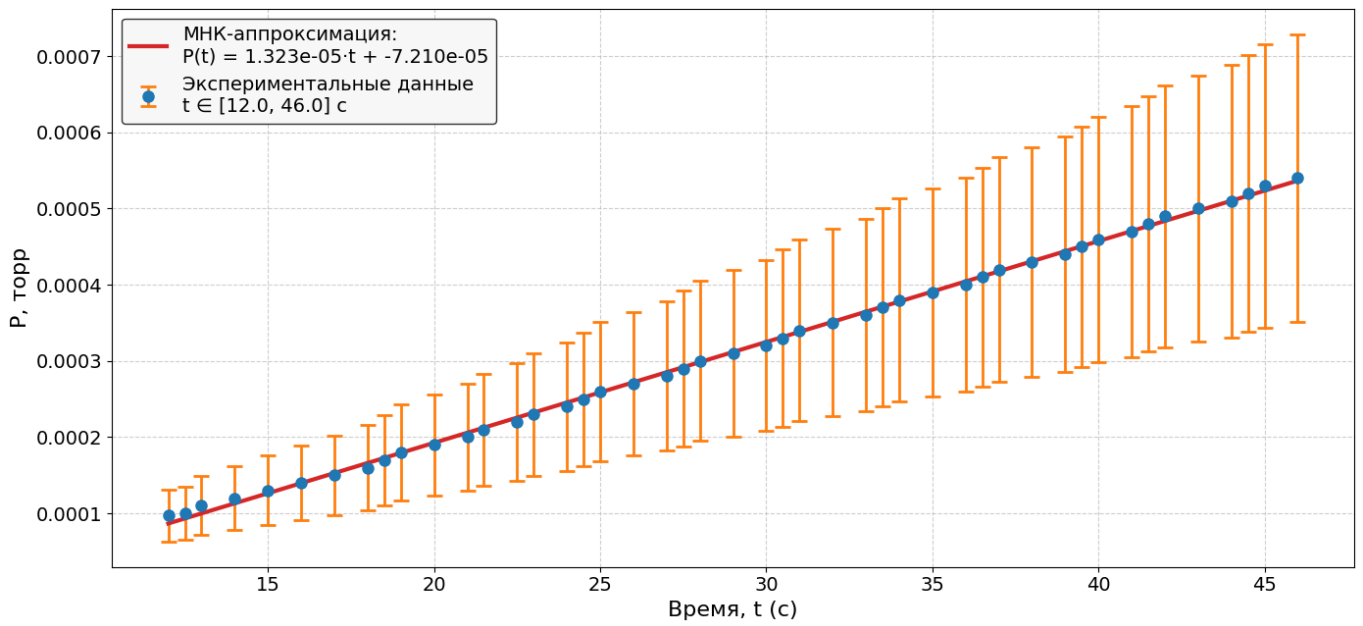


Рис. 10: Ухудшение вакуума

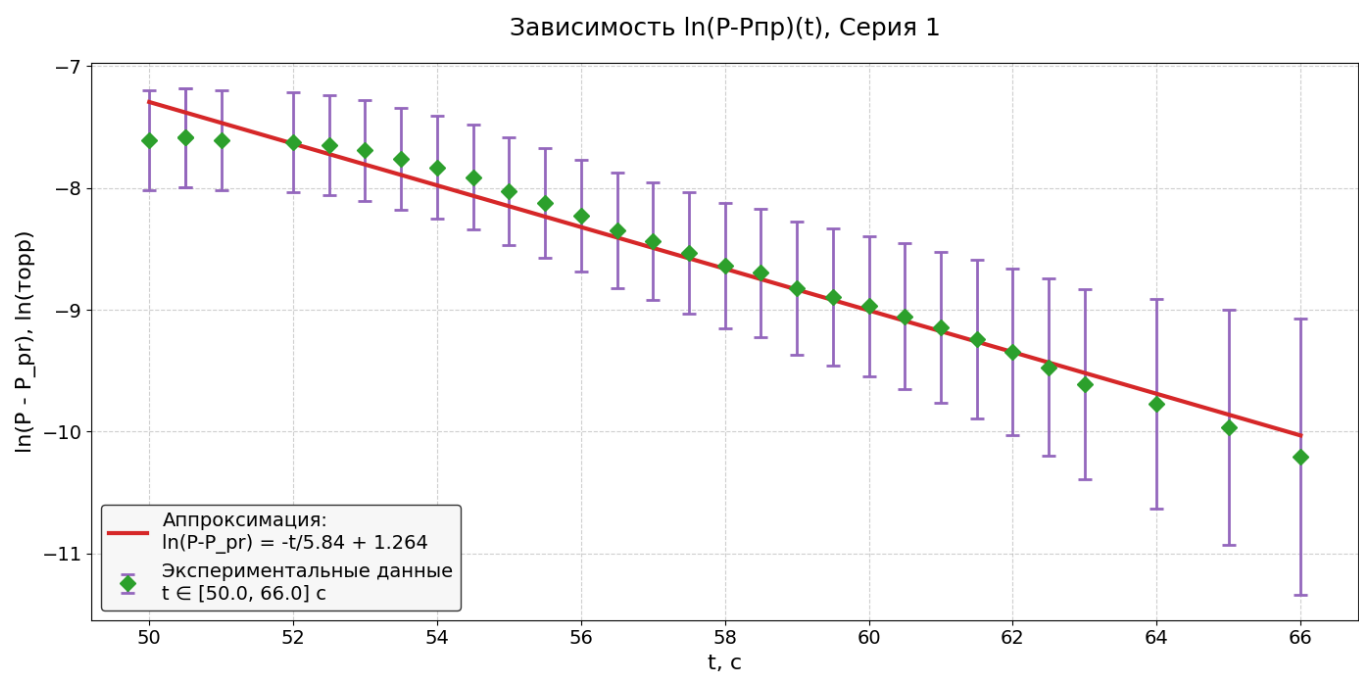


Рис. 11: Улучшение вакуума

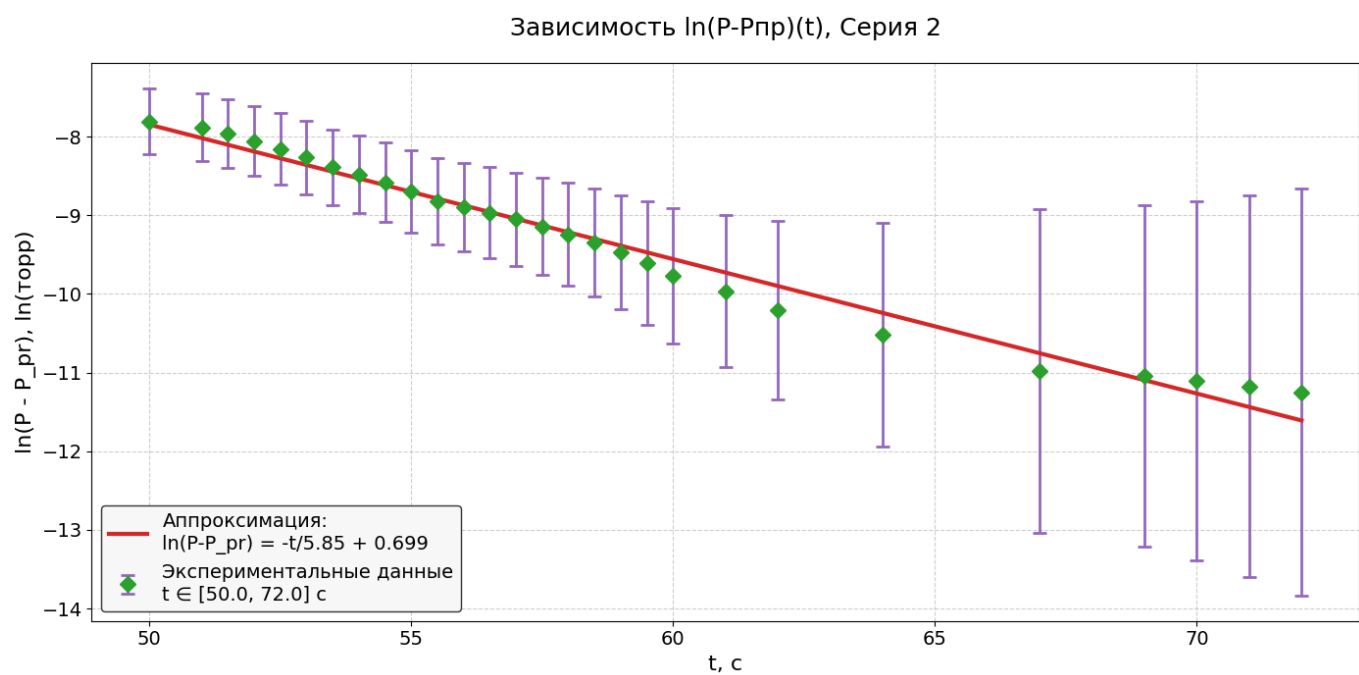


Рис. 12: Улучшение вакуума