

Обработка экспериментальных данных

1. Загрузим данные из [файла](#).
2. Зная объём «запертого» в сильфоне воздуха $V_c = 265$ мл, определим, пользуясь законом Бойля-Мариотта, полный объём установки, высоковакуумной части (камера К), форвакуумной магистрали и самого насоса ТМН.

$$p_0 V_c + p_{\text{пред}} V_K = p_1 (V_c + V_K),$$

$$V_K = V_c \cdot \frac{p_0 - p_1}{p_1 - p_{\text{пред}}} = 955 \text{ мл},$$

где $p_0 = 10^3$ мбар - это атмосферное давление, $p_1 = 2,2 \cdot 10^2$ мбар, $p_{\text{пред}} = 3,5$ мбар.

Относительные ошибки значений давлений (по паспортам приборов): $\delta_{p_1} = 0,05$; $\delta_{p_{\text{пред}}} = 0,15$.

$$\sigma_{V_K} = V_K \sqrt{\delta_{p_1}^2 + \delta_{p_{\text{пред}}}^2} = 151 \text{ мл}.$$

$$V_K = (955 \pm 151) \text{ мл}$$

Аналогично:

$$p_1 (V_c + V_K) + p_{\text{пред}} V_{\text{маг+нас}} = p_2 (V_c + V_K + V_{\text{маг+нас}}),$$

где $p_2 = 1,7 \cdot 10^2$ мбар.

Получаем:

$$V_{\text{маг+нас}} = (V_c + V_K) \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_{\text{пред}}} = 366 \text{ мл}.$$

Относительные ошибки: $\delta_{p_1} = \delta_{p_2} = 0,05$; $\delta_{p_{\text{пред}}} = 0,15$.

$$\sigma_{\text{маг+нас}} = V_{\text{маг+нас}} \sqrt{\delta_{p_1}^2 + \delta_{p_2}^2 + \delta_{p_{\text{пред}}}^2 + \left(\frac{\sigma_{V_K}}{V_K}\right)^2} = 84 \text{ мл}.$$

$$V_{\text{маг+нас}} = (366 \pm 84) \text{ мл}$$

Тогда общий объём установки: $V_{\text{уст}} = V_c + V_K + V_{\text{маг+нас}} = (265 + 955 + 366) \text{ мл} = 1586 \text{ мл}.$

$$\sigma_{V_{\text{уст}}} = V_{\text{уст}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_K}}{V_K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_{\text{маг+нас}}}}{V_{\text{маг+нас}}}\right)^2} = 342 \text{ мл}.$$

$$V_{\text{уст}} = (1586 \pm 342) \text{ мл}$$

3. Оценим эффективную скорость откачки системы форвакуумным насосом в области, где она почти постоянна: из файла возьмем данные зависимости давления в камере К от времени откачки насосом ДН. По зависимости $\ln P(t)$ (график 1) определим постоянную времени откачки τ в диапазоне давлений 10 – 100 мбар.

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{t}{\tau};$$

Используя МНК, получаем следующие значения:

$$k = -\frac{1}{\tau} = -0,058 \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma_k = 0,002 \text{ с}^{-1}.$$

$$\tau = -\frac{1}{k} = 17,2 \text{ с};$$

$$\sigma_\tau = \tau \cdot \frac{\sigma_k}{|k|} = 0,6 \text{ с};$$

$\tau = (17,2 \pm 0,6) \text{ с}$

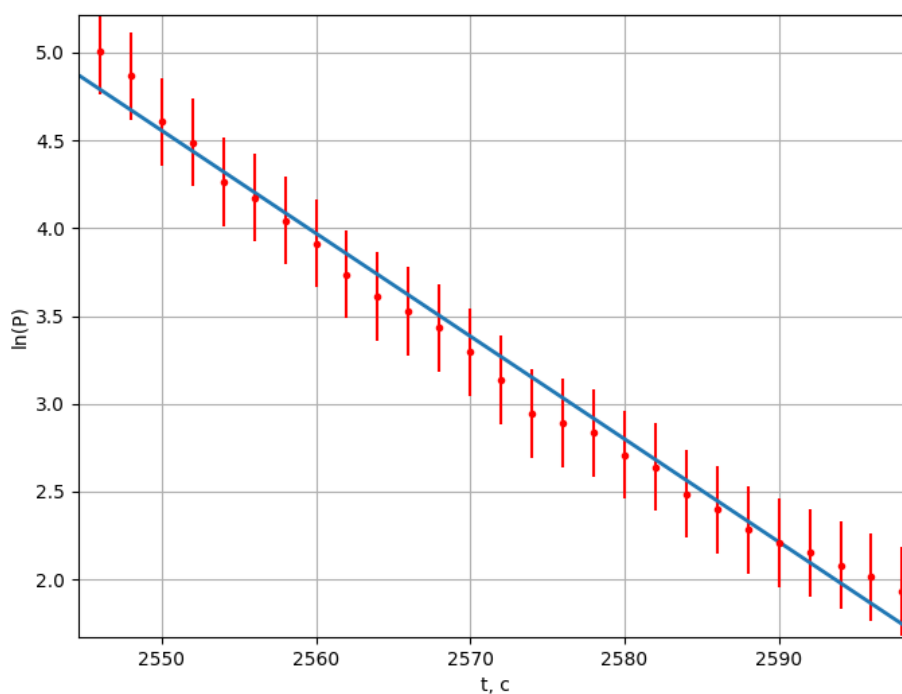


График 1. По оси абсцисс - время в секундах от начала работы.

Зная объём камеры К установки $V_K = 955$ мл, рассчитаем эффективную скорость её откачки S_0 :

$$S_0 = \frac{V_K}{\tau} = \frac{955}{17,2} \frac{\text{мл}}{\text{с}} = 55 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

$$\sigma_{S_0} = S_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_K}}{V_K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2} = 9 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

$$\boxed{S_0 = (55 \pm 9) \frac{\text{мл}}{\text{с}}}$$

Определим суммарную пропускную способность U :

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U},$$

где $S_H = 139 \frac{\text{мл}}{\text{с}}$ - скорость откачки по паспортным данным насоса.

Отсюда получаем:

$$U = \frac{S_H S_0}{S_H - S_0} = 92 \frac{\text{мл}}{\text{с}};$$

$$\sigma_U = U \cdot \frac{\sigma_{S_0}}{S_0} = 15 \frac{\text{мл}}{\text{с}};$$

$$\boxed{U = (92 \pm 15) \frac{\text{мл}}{\text{с}}}$$

4. Оценим эффективную скорость откачки системы турбомолекулярным насосом в области, где она почти постоянна: из файла возьмем данные зависимости давления в камере К от времени откачки насосом ТМН. По зависимости $\ln P(t)$ (график 2) определим постоянную времени откачки τ в диапазоне давлений $10^{-5} - 10^{-3}$ мбар.

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{t}{\tau};$$

Пользуясь МНК, получаем следующие значения:

$$k = -\frac{1}{\tau} = -0,027 \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma_k = 0,002 \text{ с}^{-1}.$$

$$\tau = -\frac{1}{k} = 37,0 \text{ с};$$

$$\sigma_\tau = \tau \cdot \frac{\sigma_k}{|k|} = 2,8 \text{ с};$$

$$\boxed{\tau = (37,0 \pm 2,8) \text{ с}}$$

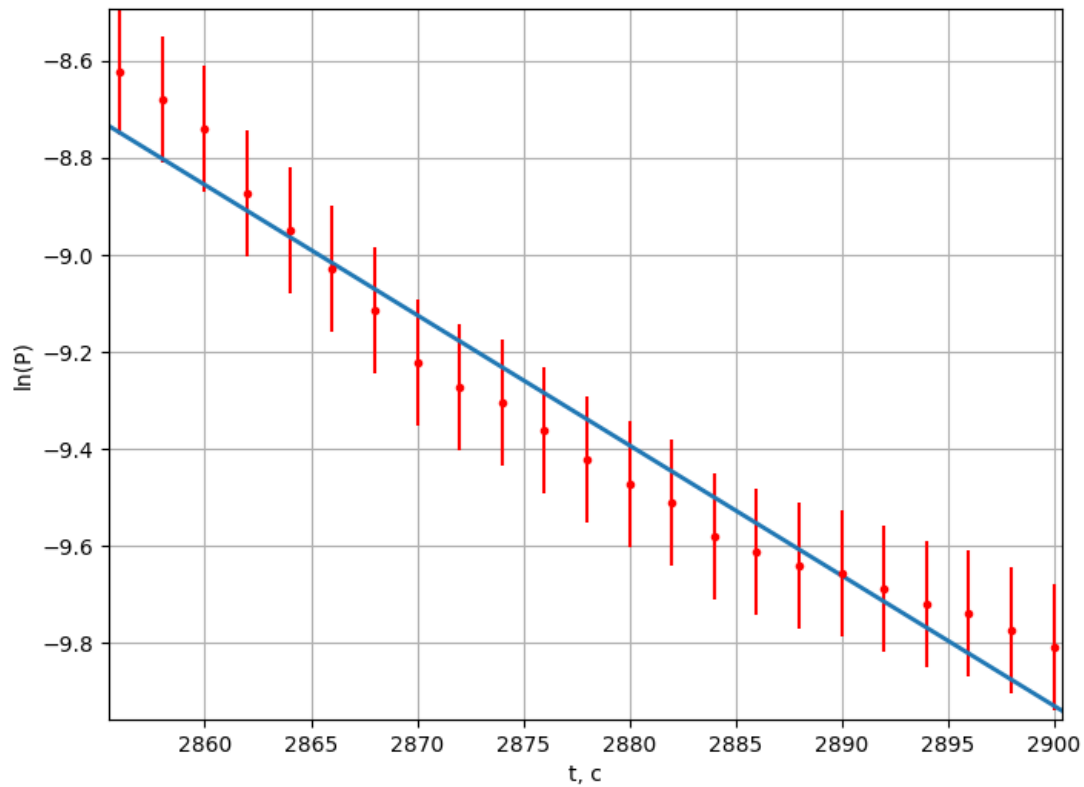


График 2. По оси абсцисс - время в секундах от начала работы.

Зная объём камеры К установки $V_K = 955$ мл, рассчитаем эффективную скорость её откачки S_0 :

$$S_0 = \frac{V_K}{\tau} = \frac{955}{37} \frac{\text{мл}}{\text{с}} = 26 \frac{\text{мл}}{\text{с}};$$

$$\sigma_{S_0} = S_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_K}}{V_K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2} = 2 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

$$S_0 = (26 \pm 2) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$$

Определим суммарную пропускную способность U :

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U},$$

где $S_H = 67000 \frac{\text{мл}}{\text{с}}$ - скорость откачки по паспортным данным насоса.

Отсюда получаем:

$$U = \frac{S_H S_0}{S_H - S_0} \approx 26 \frac{\text{мл}}{\text{с}};$$

$$\sigma_U = U \cdot \frac{\sigma_{S_0}}{S_0} = 2 \frac{\text{мл}}{\text{с}};$$

$$U = (26 \pm 2) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$$

Сравним экспериментальные данные с расчетными значениями:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R_{\text{отв}}^2 \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}},$$

где $R_{\text{отв}}$ - радиус отверстия. В нашем случае $R_{\text{отв}} \sim 1$ см.

Тогда:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,01^2 \sqrt{\frac{8 \cdot 8,314 \cdot 293}{3,14 \cdot 0,029}} = 36,3 \frac{\text{мл}}{\text{с}}.$$

Как видим, рассчитанные и полученные значения достаточно близки.

5. Определим уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН. Из файла возьмем данные зависимости давления в камере К от времени натекания после перекрытия откачки шиббером ШЗ.

Рассчитаем натекание $Q_{\text{н}}$:

$$Q_{\text{н}} = V_{\text{К}} \frac{P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}}}{\Delta t} = 955 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3} - 3,9 \cdot 10^{-5}}{472} \frac{\text{мл} \cdot \text{мбар}}{\text{с}} \approx 0,006 \frac{\text{мл} \cdot \text{мбар}}{\text{с}}.$$

$$Q = P_1 S_0 \sim 10 \cdot 55 \frac{\text{мл} \cdot \text{мбар}}{\text{с}} = 550 \frac{\text{мл} \cdot \text{мбар}}{\text{с}}.$$

Как мы видим, для заданного выше диапазона давлений условие $Q_{\text{н}} \ll Q$ выполняется.

6. Исследуем зависимость мощности турбины ТМН от давления в камере К при создании искусственной течи. Из файла возьмите данные зависимости мощности турбины ТМН от давления в камере К. Построим графики $W(P)$ при увеличении течей (график 3) и их уменьшении (график 4).

а) Используем МНК и получаем:

Коэффициент наклона $k = 5506 \frac{\text{Вт}}{\text{мбар}}$

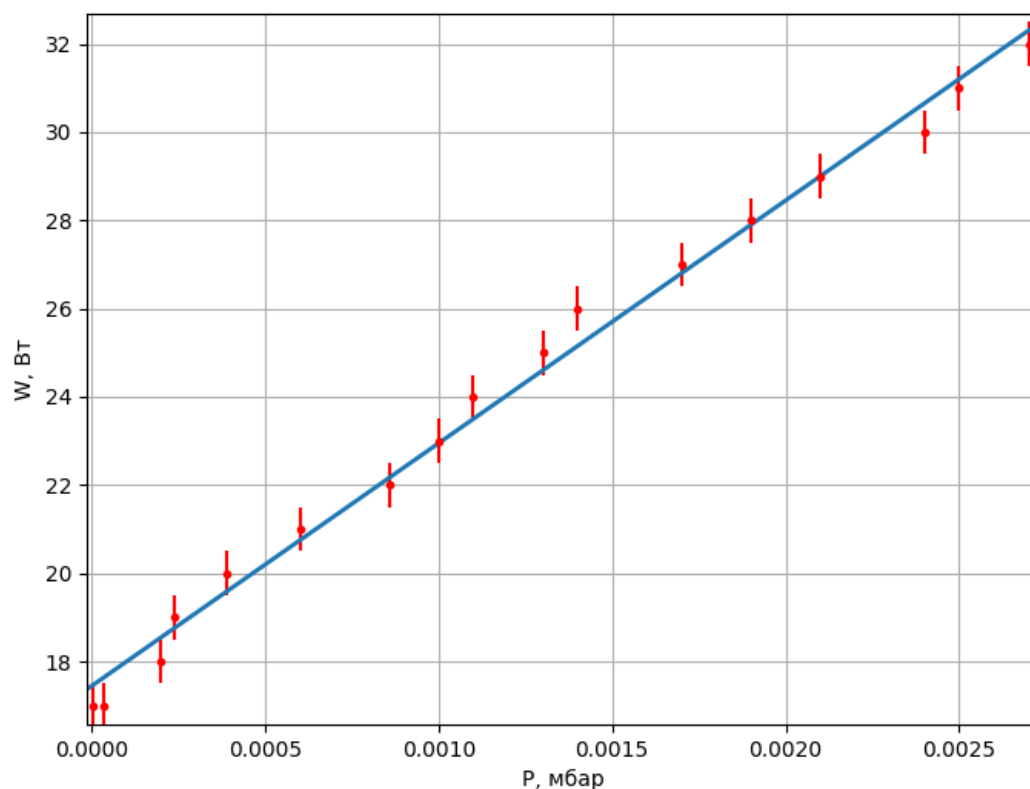


График 3

б) Аналогично:

Коэффициент наклона $k = 6225 \frac{\text{Вт}}{\text{мбар}}$

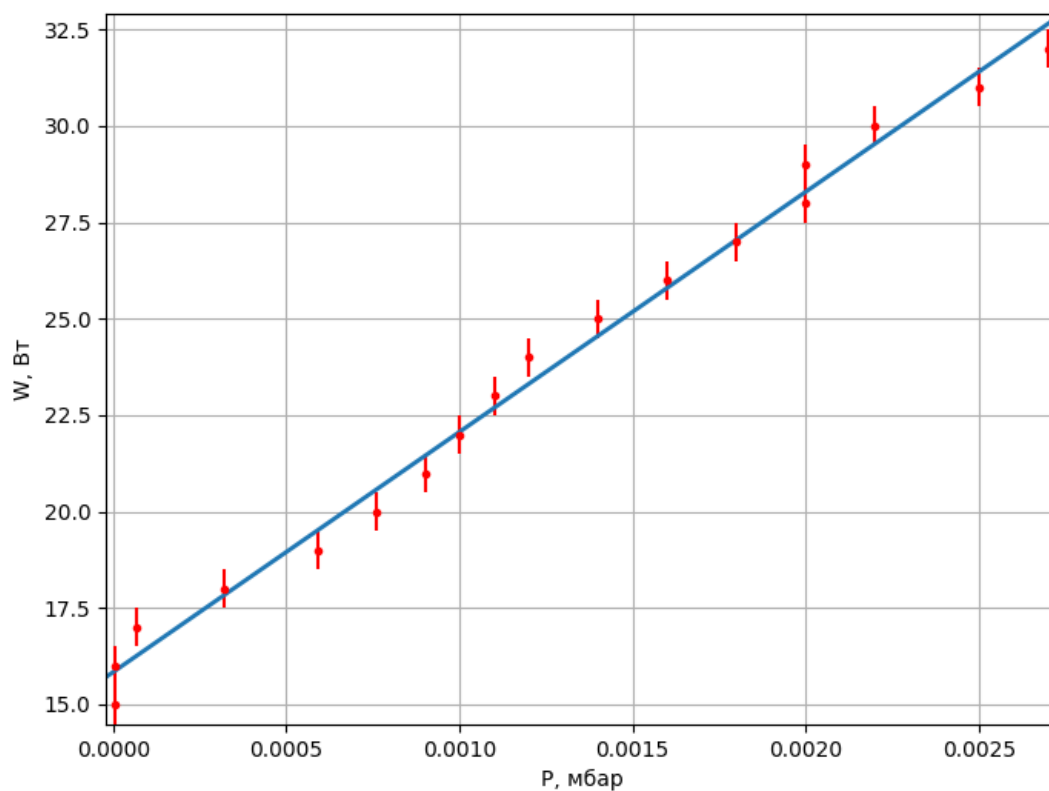


График 4

7. Оценим число Кнудсена для предельных давлений при форвакуумной и высоковакуумной откачке.

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{d} \sim \frac{kT}{\sqrt{2}\pi r^2 P \sqrt{V_K}},$$

где $r \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м - размер молекулы воздуха.

Для форвакуумной откачки получаем $\text{Kn} \sim 10^{-3}$ - гидродинамический режим течения.

Для высоковакуумной откачки - $\text{Kn} \sim 10^3$ - кнудсеновский режим течения.

Вывод

В работе были рассмотрены способы получения и измерения вакуума. В ней были найдены объемы высоковакуумной части установки - $V_K = (955 \pm 151)$ мл, форвакуумной магистрали и ТМН - $V_{\text{маг+нас}} = (366 \pm 84)$ мл. Также были рассчитаны эффективные скорости откачки и пропускные способности: ДН - $S_0 = (55 \pm 9) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$, $U = (92 \pm 15) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$; ТМН - $S_0 = (26 \pm 2) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$, $U = (26 \pm 2) \frac{\text{мл}}{\text{с}}$. Ошибки связаны с неточностью измерений и несовершенством техники измерений.