

Работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Андрей Киркича, Б01-202

Цель работы: измерить объёмы форвакуумной и высоковакуумной частей установки, определить скорость откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

В работе используются: вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

Теоретические сведения

- Классы вакуумных установок:
 1. Низковакуумные ($p \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ торр)
 2. Высоковакуумные ($p \sim 10^{-4} - 10^{-7}$ торр)
 3. Сверхвысокого вакуума ($p \sim 10^{-8} - 10^{-11}$ торр)
- Низкий вакуум переходит в высокий, когда длина свободного пробега молекул становится сравнима с размерами установки, сверхвысокий вакуум характеризуется крайней важностью процесса адсорбции и десорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

Экспериментальная установка

Установка изготовлена из стекла и состоит форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термопарных манометров (M_1 и M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов. Также в состав установки входят вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением) или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

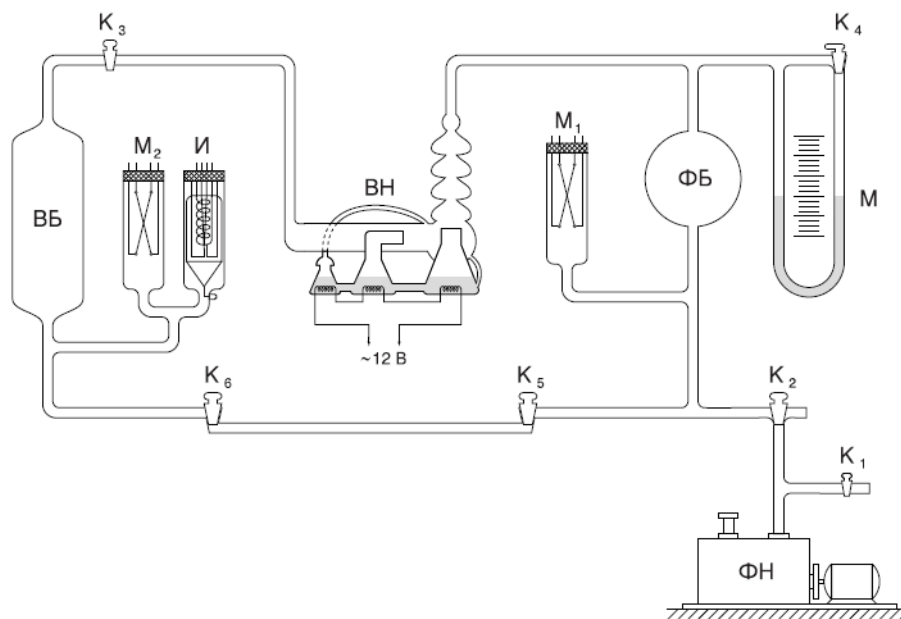


Рисунок 1: схема экспериментальной установки

Краны:

- K₁ - заполнение форвакуумного насоса и вакуумной установки воздухом
- K₂ - соединение форвакуумного насоса с установкой или атмосферой
- K₃ - отделение высоковакуумной части установки от форвакуумной
- K₄ - соединение между собой колен масляного манометра
- K₅ и K₆ - соединение капилляра с форвакуумной и высоковакуумной частями установки. Суммарный объём обоих кранов 50 см³. Диаметр капилляра 0.9 мм, длина 300 мм.

Форвакуумный насос:

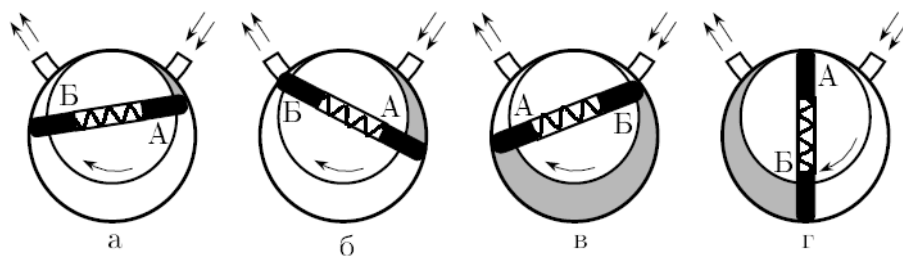


Рисунок 2: схема работы форвакуумного насоса

В цилиндрической полости размещён ротор так, что он постоянно соприкасается своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости.

Диффузионный насос:

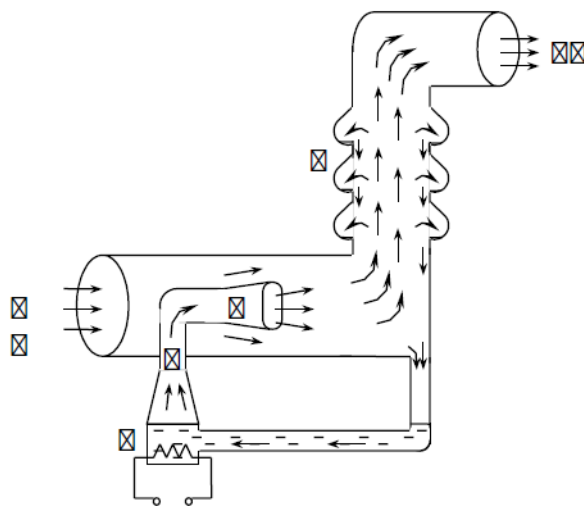


Рисунок 3: схема работы диффузионного насоса

Действие основано на диффузии молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Наиболее эффективно работает при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом и стенками трубы. В нашей установки диффузионный насос имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное, другое - горизонтальное.

Масляный манометр:

Это U-образная трубка, до половины наполненная вязким маслом. Плотность масла $\rho = 0.9 \text{ г/см}^3$ мала, поэтому с помощью этого манометра можно измерить лишь небольшие разности давлений.

Термопарный манометр:

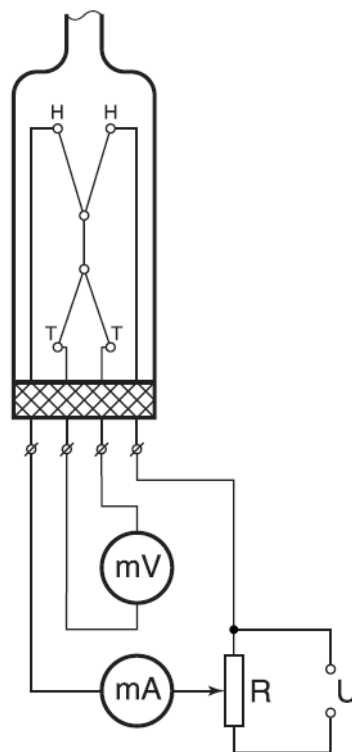


Рисунок 4: схема термопарного манометра

Чувствительным элементом является платинородиевая термопара.

Ионизационный манометр:

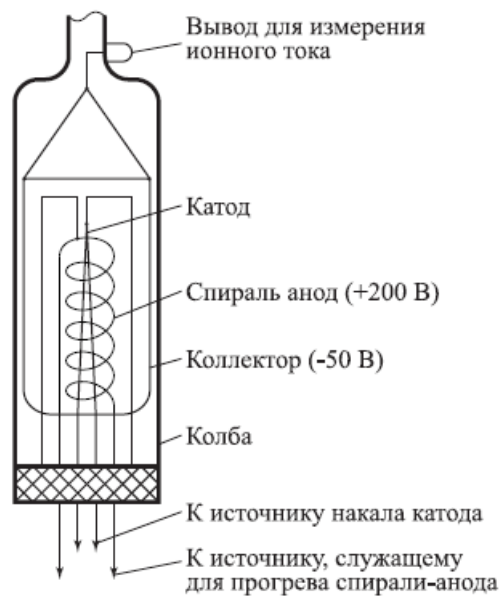


Рисунок 5: схема ионизационного манометра

Представляет собой трёхэлектродную лампу. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и может служить мерой давления.

Процесс откачки

Производительность насоса определяется скоростью откачки W (л/с) - объёмом газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени.

Разделим систему на две части: откачанный объём (в состав которого включим используемые для работы части установки) и насос, к которому, кроме самого насоса, отнесём трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объёма.

- $Q_{\text{д}}$ - количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объёма в единицу времени
- $Q_{\text{и}}$ - количество газа, проникающего в единицу времени в этот объём извне - через течи
- W - скорость откачки насоса, будем считать при этом, что насос сам является источником газа
- $Q_{\text{н}}$ - поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему

$$-VdP = (PW - Q_{\text{д}} - Q_{\text{н}} - Q_{\text{и}})dt$$

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

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

$$P_{\text{пр}}W = Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}$$

Тогда

$$Q = \frac{\Sigma Q_i}{P_{\text{пр}}}$$

В наших условиях все члены можно считать постоянными. Проинтегрируем первое уравнение:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}})e^{-\frac{W}{V}t}$$

где P_0 - начальное давление

P_0 велико по сравнению с $P_{\text{пр}}$, поэтому можно записать, что:

$$P - C_{\text{тр}} = P_0 e^{-\frac{W}{V}t}$$

Закон сложения пропускных способностей при последовательном соединении элементов:

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

где W - скорость откачки системы, $W_{\text{н}}$ - скорость откачки насоса, i - пропускные способности элементов системы

Течение газа через трубу

Для газа, протекающего через трубу в кнудсеновском режиме (в условиях высокого вакуума) справедливы формулы:

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

$$C_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$$

$$C_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4}$$

Результаты измерений и обработка данных

1. Определение объёма форвакуумной и высоковакуумной частей установки

$p_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст = 2,67 Па - начальное давление, полученное в установке

$p_{\text{атм}} = 100.15$ кПа - атмосферное давление

$V_{\text{зап}} = 50$ см³ - объём запертого в установке атмосферного воздуха

Ниже приведены высоты столбов масла в масляном манометре при разделении высоковакуумной и форвакуумной частей установки.

- $h_1 = (38.5 \pm 0.1)$ см

- $h_2 = (12.0 \pm 0.1)$ см

Отсюда можно найти разность давлений, полученную в результате высвобождения запертого атмосферного воздуха в форвакуумную часть установки:

$$\Delta p = \rho g \Delta h = (2301 \pm 18) \text{ Па}$$

Тогда

$$p_{\text{фв}} = p_0 + \Delta p = (2303 \pm 18) \text{ Па}$$

Затем используем закон Бойля-Мариотта для нахождения объёма форвакуумной части:

$$V_{\text{фв}} = \frac{p_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{p_{\text{фв}}} = (2.174 \pm 0.017) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Аналогично после соединения форвакуумной и высоковакуумной частей с помощью трубки:

- $h_3 = (34.0 \pm 0.1) \text{ см}$
- $h_4 = (17.0 \pm 0.1) \text{ см}$

$$\Delta p = (1476 \pm 18) \text{ Па}$$

$$p_{\text{вв}} = (1479 \pm 18) \text{ Па}$$

$$V_{\text{вв}} = \frac{p_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{p_{\text{вв}}} - V_{\text{фв}} = (1.21 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

2. Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

Установка откачивалась форвакуумным насосом. Были включены термopарные вакууметры.

$I = 0.6 \text{ А}$ - ток в лампах

$p = 3 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$ - давление в высоковакуумном баллоне

Затем был закрыт кран K_6 , началась высоковакуумная откачка, включён ионизационный манометр, достигнуто предельное давление.

$$p_{\text{пр}} = (4.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$$

предельное давление в высоковакуумной части установки после работы ионизационного манометра и дегазации

После измерения предельного давления были проведены опыты по нахождению скорости откачки. Вакуум был ухудшен, а затем восстанавливался. Данные для построения графиков и сами графики зависимости давления от времени представлены ниже.

№1		№2	
t, с	p, 10^{-5} мм рт.ст.	t, с	p, 10^{-5} мм рт.ст.
0	58.0	0	44.0
1	54.0	1	37.0
2	44.0	2	30.0
3	37.0	3	25.0
4	31.0	4	23.0
5	28.0	5	20.0
6	24.0	6	17.0
7	18.0	7	14.0
8	16.0	8	12.0
9	14.0	9	10.0
10	12.0	10	9.4
11	11.0	11	8.9
12	9.7	12	7.9
13	8.8	13	7.3
14	8.1	14	7.1
15	7.6	15	6.7
16	7.1	16	6.4
17	6.8	17	6.1
18	6.5	18	5.9
19	6.2	19	5.7
20	6.0	20	5.5
21	5.9	21	5.5
22	5.7	22	5.3

Таблица 1: данные, показывающие зависимость давления от времени при улучшении вакуума

Масштаб по оси ординат - логарифмический, чтобы можно было найти показатель степени в формуле для давления $-\frac{W}{V}$ как коэффициент наклона k аппроксимирующей прямой. Аппроксимация производилась программно по методу наименьших квадратов только по части значений, так как наблюдалась тенденция к изменению характера зависимости при низких значениях давления.

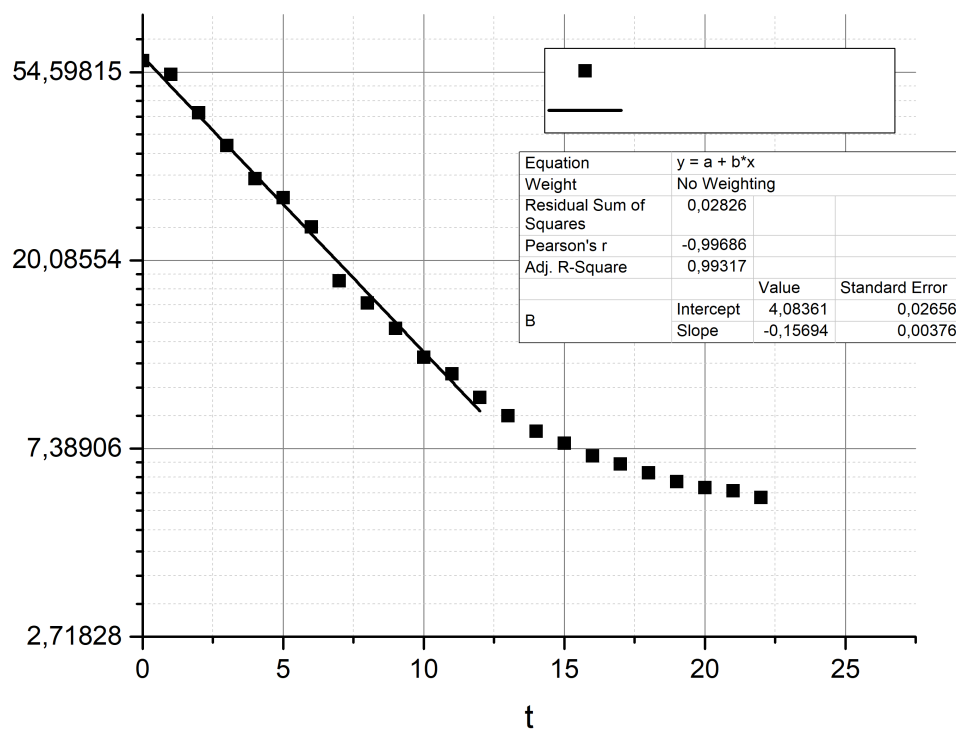


Рисунок 6: график зависимости давления от температуры в логарифмическом масштабе по оси ординат

$$W = -k \cdot V_{BB}$$

$$k_1 = (-0.157 \pm 0.004) \rightarrow W_1 = (1.90 \pm 0.15) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$k_2 = (-0.150 \pm 0.005) \rightarrow W_2 = (1.82 \pm 0.14) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

Таким образом,

$$W = (1.86 \pm 0.15) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

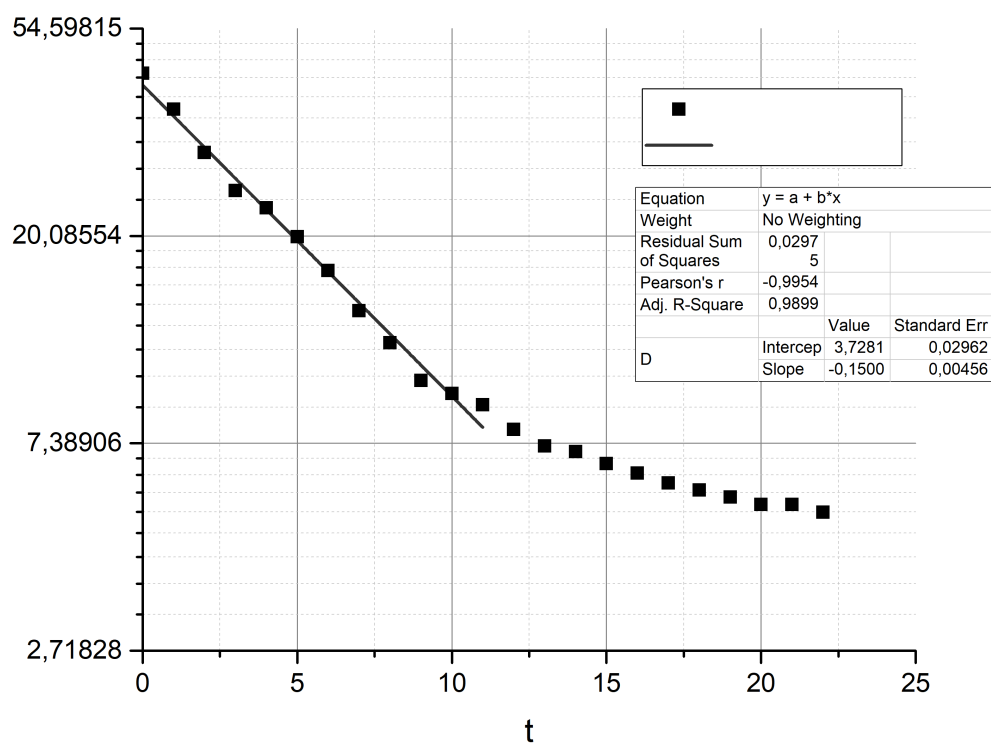


Рисунок 7: график зависимости давления от температуры в логарифмическом масштабе по оси ординат

Затем была найдена величина потока Q_n : был перекрыт кран K_3 и при помощи ионизационного вакуумметра и секундомера снимались значения давления с течением времени. Данные для построения графиков и сами графики зависимости давления от времени представлены ниже.

Зависимость давления от температуры при ухудшении вакуума - прямая пропорциональная.

$$\Delta p_1 = (40.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$$

$$\Delta t_1 = 84 \text{ с}$$

$$\Delta p_2 = (39.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$$

$$\Delta t_2 = 84 \text{ с}$$

№1		№2	
t, с	p, 10 ⁻⁵ мм рт.ст.	t, с	p, 10 ⁻⁵ мм рт.ст.
21	15.0	0	5.9
24	17.0	3	7.3
27	18.0	6	8.7
30	19.0	9	10.0
33	21.0	12	11.0
36	22.0	15	13.0
39	23.0	18	14.0
42	25.0	21	15.0
45	26.0	24	16.0
48	28.0	27	18.0
51	29.0	30	19.0
54	30.0	33	21.0
57	32.0	36	22.0
60	33.0	39	24.0
63	35.0	42	25.0
66	36.0	45	26.0
69	37.0	48	28.0
72	39.0	51	29.0
75	40.0	53	30.0
78	41.0	57	32.0
81	43.0	60	33.0
84	44.0	63	35.0
87	46.0	66	36.0
90	47.0	69	37.0
93	49.0	72	39.0
96	50.0	75	40.0
99	52.0	78	42.0
102	53.0	81	43.0
105	55.0	84	45.0

Таблица 2: данные, показывающие зависимость давления от времени при ухудшении вакуума

$$V_{\text{вв}} \Delta p = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) \Delta t$$

$$Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} = \frac{V_{\text{вв}} \Delta p}{\Delta t}$$

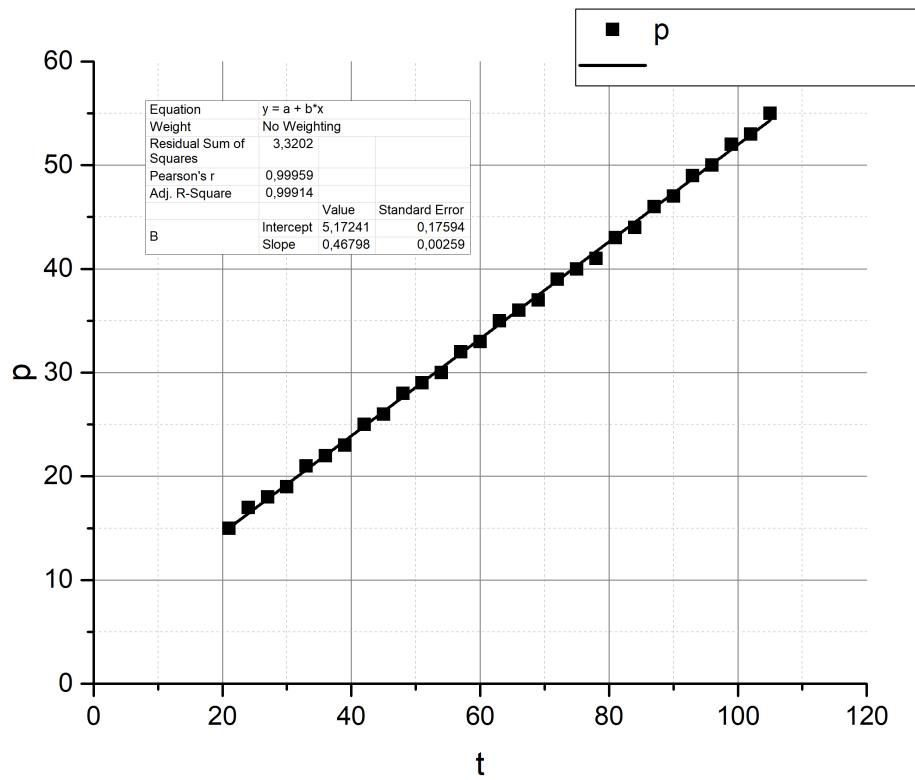


Рисунок 8: график зависимости давления от температуры

$$Q_H = p_{np}W - (Q_d + Q_{и}) = p_{np}W - \frac{V_{BB}\Delta p}{\Delta t}$$

$$Q_{H_1} = (2.7 \pm 1.7) \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

$$Q_{H_2} = (2.9 \pm 1.7) \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

Тогда

$$Q_H = (2.8 \pm 1.7) \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

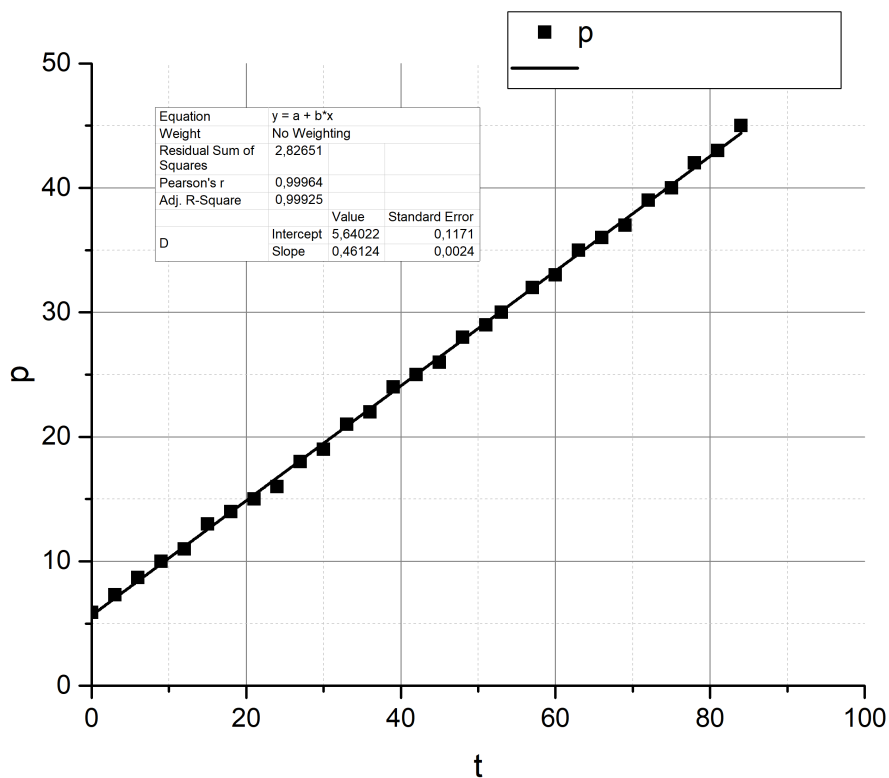


Рисунок 9: график зависимости давления от температуры

Для расчёта пропускной способности трубки используются следующие величины:

$L = 10.8$ см - длина трубки

$r = 0.4$ см - радиус трубки

$T = (298 \pm 1)$ К - температура в комнате

$$C_{\text{тр}} = (5.80 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

Скорость откачки составляет 32% от полученной пропускной способности трубки.

Последней задачей работы стало определение производительности насоса. Бы-

ла создана искусственная течь (открыт кран K_6), и вакуум ухудшился.

$p_{\text{уст}} = 1.1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. - установившееся давление

$p_{\text{фв}} = 3.0 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. - давление со стороны форвакуумной части

$$p_{\text{пр}}W = Q_1, \quad p_{\text{уст}}W = Q_1 + \frac{d(pV)}{dt}$$

Учитывая приведённое выше соотношение, получим:

$$W = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu} \frac{p_{\text{фв}} - p_{\text{уст}}}{p_{\text{уст}} - p_{\text{пр}}}} = (1.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

3. Расчёт погрешностей

Следующие величины считаем константами без погрешности:

- $p_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.
- $p_{\text{атм}} = 100.15$ кПа
- $V_{\text{зап}} = 50$ см³
- $g = 9.81$ м/с²
- $\pi = 3.14$
- $R = 8.31$ Дж/К · моль
- $\mu = 29$ г/моль
- $r = 0.4$ см
- $L = 10.8$ см
- $\rho = 885$ кг/м³

$$\sigma(T) = 1 \text{ К}$$

$$\sigma(h) = 0.1 \text{ см}$$

$$\sigma(\Delta h) = 0.2 \text{ см}$$

$$\sigma(\Delta p) = \rho g \cdot \sigma(\Delta h) = 18 \text{ Па}$$

$$\begin{aligned}
\sigma(p_{\text{фв}}) &= \sigma(p_{\text{вв}}) = \sigma(\Delta p) = 18 \text{ Па} \\
\sigma(V_{\text{фв}}) &= \frac{p_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{p_{\text{фв}}^2} \cdot \sigma(p_{\text{фв}}) = 0.017 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\
\sigma(V_{\text{вв}}) &= \sigma(V_{\text{фв}}) + \frac{p_{\text{атм}} V_{\text{зап}}}{p_{\text{вв}}^2} \cdot \sigma(p_{\text{вв}}) = 0.05 \cdot 10^{-3} \\
\sigma(p_{\text{пр}}) &= \sigma(p_{\text{уст}}) = \sigma(\text{прибора}) = 0.1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.} \\
\sigma(k) &\text{ - по методу наименьших квадратов считается программно} \\
\sigma(W) &= \sigma(k) \cdot V_{\text{вв}} - k \cdot \sigma(V_{\text{вв}}) \\
\sigma(\Delta p(\text{при ухудшении вакуума})) &= 0.2 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.} \\
\Delta t &= 2 \text{ с} \\
\Delta Q_{\text{н}} &= \sigma(p_{\text{пр}}) \cdot W + \sigma(W) \cdot p_{\text{пр}} + \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \sigma(V_{\text{вв}}) + \frac{V_{\text{вв}}}{\Delta t} \cdot \sigma(\Delta p) + \frac{V_{\text{вв}} \cdot \Delta p}{\Delta t^2} \cdot \sigma(\Delta t) \\
C_{\text{тр}} &= \frac{4}{3} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \sqrt{\frac{2\pi R}{\mu}} \cdot \frac{\sigma(T)}{2\sqrt{T}} \\
\sigma(W(\text{второй способ})) &= \frac{4}{3} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \sqrt{\frac{2\pi R}{\mu}} \cdot \frac{p_{\text{фв}} - p_{\text{уст}}}{p_{\text{уст}} - p_{\text{пр}}} \cdot \frac{\sigma(T)}{2\sqrt{T}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \cdot \frac{1}{p_{\text{уст}} - p_{\text{пр}}} \cdot \\
2\sigma(p_{\text{пр}}) &+ \frac{4}{3} \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \cdot \frac{p_{\text{фв}} - p_{\text{уст}}}{(p_{\text{уст}} - p_{\text{пр}})^2} \cdot 2\sigma(p_{\text{пр}}) \\
\text{Погрешность среднего арифметического} &\text{ считается как среднее арифметическое погрешностей}
\end{aligned}$$

Вывод

Объём форвакуумной части установки - $(2.174 \pm 0.017) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
 Объём высоковакуумной части установки - $(1.21 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
 Предельное давление, полученное в установке - $(4.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст}$
 Скорость откачки системы - $(1.86 \pm 0.15) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Это значение не совпадает со скоростью откачки, полученной теоретически $((1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с})$. Это может быть связано с изменениями температуры внутри установки, вызванными работой приборов, а также плохой герметичностью установки. Возможна также некорректная работа манометров.