

# Отчет по лабораторной работе №2.2.1 Исследование взаимной диффузии газов

Бичина Марина группа Б04-005 1 курса ФЭФМ

22.03.2021

# 1 Аннотация

## Цель работы:

1. регистрация зависимости концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности при разных начальных давлениях смеси газов
2. определение коэффициента диффузии по результатам измерений

## Оборудование:

1. измерительная установка
2. форвакуумный насос
3. баллон с газом (He)
4. манометр
5. источник питания
6. магазин сопротивлений
7. гальванометр
8. секундомер

# 2 Теоретическая часть

*Диффузией* называют самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга, происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. При перемешивании молекул разного сорта говорят о *взаимной (концентрационной) диффузии*.

Диффузия в системе, состоящей из двух компонентов  $a$  и  $b$ , подчиняется закону Фика: плотности потока компонентов  $j_{a,b}$  (количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени) пропорциональны градиентам их концентраций  $\nabla n_{a,b}$ , что в одномерном случае можно записать как:

$$j_a = -D_{ab} \frac{\partial n_a}{\partial x}, \quad j_b = -D_{ba} \frac{\partial n_b}{\partial x} \quad (1)$$

где  $D_{ab} = D_{ba} = D$  - коэффициент взаимной диффузии компонентов

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Давление  $P$  и температура  $T$  в условиях опыта предполагаются неизменными:  $P = (n_{He} + n_B)k_B$ ,  $T = const$ , где  $n_{He}, n_B$  - концентрации диффундирующих газов. Поэтому для любых изменений концентраций справедливо  $\Delta n_B = \Delta n_{He}$ . Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов (остановимся на гелии)

Приведём теоретическую оценку для коэффициента диффузии. В работе концентрация гелия, как правило, мала ( $n_{He} \ll n$ ). Кроме того, атомы гелия существенно легче молекул, составляющих воздух ( $\mu_{He} \ll \mu_{N_2}, \mu_{O_2}$ ), значит и их средняя тепловая скорость велика по сравнению с остальными частицами. Поэтому перемешивание газов в работе можно приближенно описывать как диффузию примеси лёгких частиц

гелия на практически стационарном фоне воздуха. Коэффициент диффузии в таком приближении равен:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad (2)$$

где  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$  – средняя тепловая скорость частиц примеси,  $\lambda = \frac{1}{n_0\sigma}$  – их длина свободного пробега,  $n_0$  – концентрация рассеивающего фона,  $\sigma$  – сечение столкновения частиц примеси с частицами фона.

В общем случае необходимо учитывать диффузию каждого из компонентов. Более подробное рассмотрение показывает, что для бинарной смеси формула (2) сохраняется, если:

1. Под  $\lambda$  понимать величину  $\lambda = \frac{1}{n_\Sigma\sigma}$ , где  $n_\Sigma = n_{He} + n_B = \frac{P}{k_B T}$  – полная концентрация частиц
2. Под  $\langle v \rangle$  понимать среднюю относительную скорость частиц разных сортов.

Таким образом, теория предсказывает, что коэффициент диффузии бинарной смеси обратно пропорционален давлению в системе, и не зависит от пропорций компонентов, что и предлагается проверить в работе экспериментально ( $D \propto \frac{1}{P}$ )

Для исследования взаимной диффузии используется установка, изображенная на рисунке 1. Два сосуда с примерно одинаковыми объемами  $V_1 \approx V_2 \equiv V$  соединены трубкой длины  $l$  и сечения  $S$ . Сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии концентрации каждого из компонентов в обоих сосудах с течением времени выравниваются.

Рассмотрим этот процесс. Решение задачи упрощается, если сделать несколько допущений:

1. Пренебрежем объемом соединительной трубки, поскольку он мал по сравнению с объемами сосудов
2. Концентрацию газов в каждом из сосудов будем считать постоянной по всему объему сосуда
3. Предположим, что процесс выравнивания концентраций происходит в основном благодаря диффузии в трубке

Тогда диффузионный поток в любом сечении трубки одинаков, поэтому  $J = -DS(\partial n/\partial x)$  не меняется вдоль трубки, следовательно:

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad (3)$$

Обозначим через  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  изменения в объемах  $V$  за время  $\Delta t$ . Тогда  $V_1 \Delta n_1$  равно изменению количества компонента в объеме  $V_1$ , а  $V_2 \Delta n_2$  – изменению этого компонента в  $V_2$ . Из закона сохранения вещества  $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$ . Тогда получим:

$$V \frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}, \quad V \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad (4)$$

Вычтя уравнения друг из друга, найдем:

$$\frac{n_1}{dt} - \frac{dn_2}{dt} = -\frac{n_1 - n_2}{l} DS \left( \frac{2}{V} \right) \quad (5)$$

Интегрируя, получим:

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{(-t/\tau)} \quad (6)$$

где  $(n_1 - n_2)_0$  – разность концентраций в начальный момент времени,

$$\tau = \frac{V}{2} \frac{l}{SD} \quad (7)$$

– постоянная времени процесса, определяемая геометрией установки и величиной коэффициента диффузии  $D$ .

Для проверки применимости квазистационарного течения убедимся, что время  $\tau$  много больше характерного времени диффузии одной частицы вдоль трубки длиной  $l$ :  $t_{\text{диф}} \sim \frac{l^2}{D} \ll \tau$ .

Для измерения концентраций применяются датчики теплопроводности  $D_1$  и  $D_2$  (см. рис. 1) и используется зависимость теплопроводности газовой смеси от её состава. Тонкая проволока радиуса  $r_{\text{пр}}$ , протянутая вдоль оси цилиндра радиуса  $R_{\text{ц}}$ , нагревается током. Тепло от проволоки к стенке цилиндра передаётся главным образом вследствие теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра. Количество тепла переданного стенке цилиндра в единицу времени, определяется по формуле

$$Q = \kappa \frac{2\pi L}{\ln(R_{\text{ц}}/r_{\text{пр}})} (T_1 - T_2) \quad (8)$$

где  $\kappa$  - теплопроводность,  $L$  - длина нити,  $T_1, T_2$  - температуры проволоочки и стенки. При  $Q = \text{const}$  температура проволоки и её сопротивление определяются теплопроводностью газа и, следовательно, его составом. Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема, представленная на рисунке 2 (см. описание установки).

При разности концентраций, равной 15%, поправка к линейному закону не превышает 0,5%, что для наших целей достаточно.

В процессе диффузии разность концентраций убывает по экспоненциальному закону.

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (9)$$

По тому же закону изменяются во времени показания гальванометра:

$$U = U_0 e^{-t/\tau} \quad (10)$$

Измеряя экспериментально зависимость  $U(t)$ , можно получить характерное время процесса  $\tau$ , откуда определить коэффициент диффузии  $D$ .

## 2.1 Описание установки:

Установка состоит из двух сосудов  $V_1 \approx V_2 \equiv V$ , соединенных краном  $K_3$ , форвакуумного насоса, манометра  $M$  и системы напуска гелия, включающей в себя краны  $K_6, K'_6, K_7$ . Дополнительный кран  $K'_6$  служит для вакуумной изоляции установки от системы подачи гелия. Для подачи воздуха в установку служит кран  $K_5$ . Сосуды  $V_1$  и  $V_2$  и порознь и вместе можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны  $K_1, K_2, K_4, K_5$ . Манометр  $M$  регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или другой сосуды. Краны  $K_4, K_5$  и  $K'_6$  обладают повышенной вакуумплотностью и хорошо изолируют установку от протечек.

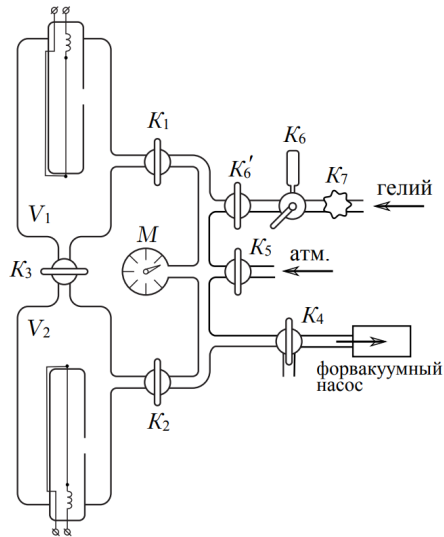


Рис. 1: Установка для исследования взаимной диффузии газов

В силу того, что в сосуд требуется подавать малое давление гелия, кран  $K_6$  снабжен дозатором. Подробный разрез крана  $K_6$  приведен на рисунке 3.

На рисунке 2 приведена схема электрического соединения  $D_1$  и  $D_2$  – сопротивления проволок датчиков парциального давления, которые составляют одно плечо моста. Второе плечо моста составляют сопротивления  $r_1$ ,  $R_1$ ,  $r_2$ ,  $R_2$ ,  $r_1 \ll R_1$ ,  $r_2 \ll R_2$ ,  $R_1$  и  $R_2$  спаренные, их подвижные контакты находятся на общей оси. Оба они используются для грубой регулировки моста. Точная балансировка моста выполняется потенциометром  $R$ . Последовательно с гальванометром  $\Gamma$ , стоящим в диагонали моста, поставлен магазин сопротивлений  $M_R$ . Когда мост балансируют, магазин сопротивлений выводят на ноль.

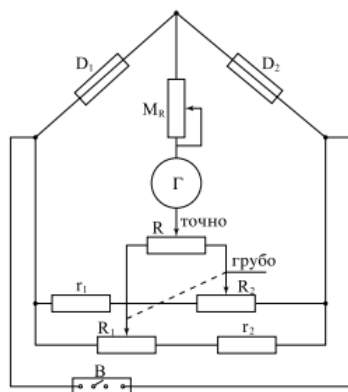


Рис. 2: Мостовая схема с датчиками теплопроводности для измерения разности концентраций газов

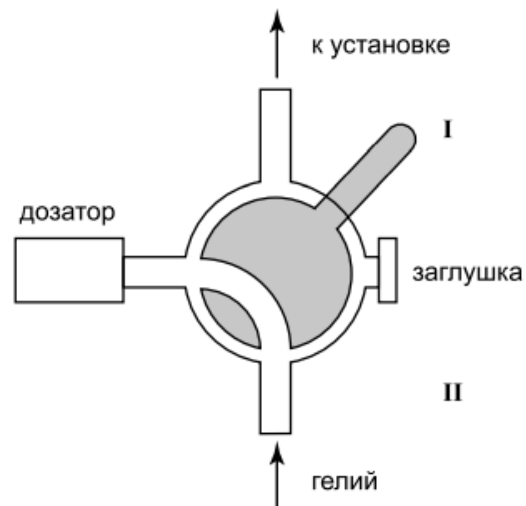


Рис. 3: Кран  $K_6$

## 2.2 Контрольные вопросы:

1. Показать, что в условиях опыта концентрацию газов можно считать постоянной по всему объему сосуда  $V_1$  (и  $V_2$ )  
Концентрацию газа в сосуде  $V_1$  можно считать равной концентрации в сосуде  $V_2$ , поскольку по условию мы напускаем в них одинаковое давление. В условиях эксперимента газы идеальные  $\implies$  мы можем воспользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона  $PV = \frac{N}{N_a}RT$ ;  $P = \frac{\frac{N}{V}RT}{N_a}$ ;  $P = \frac{nRT}{N_a}$
2. Через какое время после открытия крана  $K_3$  диффузионный поток в трубке можно считать одинаковым во всем сечении трубки?  
Через время, равное  $t = 3\tau$ , когда разница в концентрациях будет достаточно мала
3. Каким будут результаты опыта, если воздух и гелий поменять местами (например, исходное давление гелия  $P = 40$  торр, а воздуха  $P = 4$  торр)?  
Коэффициент взаимной диффузии уменьшится, поскольку скорость движения частиц воздуха в несколько раз меньше, чем гелия
4. Почему следует ожидать, что график зависимости  $D$  от  $1/P$  должен иметь вид прямой линии?  
 $D$  зависит от длины свободного пробега  $\lambda$ ,  $\lambda$  обратно зависит от концентрации частиц ( $\lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n}$ ), а из уравнения Менделеева-Клапейрона давление прямо пропорционально концентрации  $P = \frac{nRT}{N_a}$

## 3 Ход работы:

1. Ознакомимся со схемой установки. Перепишем параметры установки:

$$V_1 = V_2 = V = 775 \pm 10 \text{ см}^3, \quad \frac{L}{S} = 5,3 \pm 0.1 \text{ см}^{-1}$$

проверим, что краны  $K_4$ ,  $K_5$   $K'_6$  закрыты перед началом откачки.

2. Включим питание электрической схемы установки. Откроем краны  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ . Поскольку манометр измеряет разность давления внутри резервуаров с атмосферным в  $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$  необходимо записать показание манометра при полностью откачанном сосуде  $P_0 = 99,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$  (оно равно атмосферному) и в дальнейшем постоянно вычитать из него показания прибора, тем самым будет найдено давление внутри установки.
3. Очистим установку от всех газов, которые в ней есть. Для этого откроем кран  $K_4$ . Включим форвакуумный насос и соединим его с установкой, повернув ручку крана  $K_5$  длинным концом рукоятки влево (на установку). Откачаем установку до давления  $\approx 0.1$  торр, что достигается непрерывной работой насоса в течение 3–5 минут. Для прекращения откачки ручку крана  $K_5$  поставим длинным концом вверх, выключим насос
4. Напустим в установку воздух до рабочего давления (вначале  $P \approx 40$  торр), открыв кран  $K_5$ , чтобы сбалансировать мост на рабочем давлении. Сбалансируем мост.

5. Заполним установку рабочей смесью согласно порядку предложенному в указании к работе: в сосуде  $V_2$  должен быть воздух, а в сосуде  $V_1$  — смесь воздуха с гелием.
6. Проведём измерения. Для этого откроем кран  $K_3$ , заснимем на видео процесс падения напряжения на гальванометре на 40 – 50%. Будем продолжать аналогичные измерения при различных значениях  $P_{\text{раб}}$  в интервале 40 – 200 торр. Результаты измерений сведены в таблицы ниже:

**Данные при  $P_{\Sigma} = 40$  торр:**

$t, \text{ c}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$v, \text{ мВ}$	1356	1355	1344	1329	1300	1268	1237	1207	1180	1158	1124	1098
$t, \text{ c}$	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$v, \text{ мВ}$	1072	1045	1028	997	969	946	924	902	880	858	839	819
$t, \text{ c}$	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180
$v, \text{ мВ}$	799	778	759	741	722	705	688	669	653	638	620	607

**Данные при  $P_{\Sigma} = 80$  торр:**

$t, \text{ c}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$v, \text{ мВ}$	901	899	887	874	868	848	834	819	808	797	783	772	760	747
$t, \text{ c}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
$v, \text{ мВ}$	737	727	716	706	694	684	679	666	656	646	636	625	616	609
$t, \text{ c}$	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
$v, \text{ мВ}$	599	592	584	575	566	557	549	542	539	528	518	511	503	498

**Данные при  $P_{\Sigma} = 120$  торр:**

$t, \text{ c}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$v, \text{ мВ}$	777	773	766	757	749	740	731	723	714	706	699	692	685	677
$t, \text{ c}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
$v, \text{ мВ}$	669	662	656	647	642	633	627	622	614	607	603	596	589	586
$t, \text{ c}$	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
$v, \text{ мВ}$	580	573	568	563	554	550	544	539	534	528	525	520	516	508

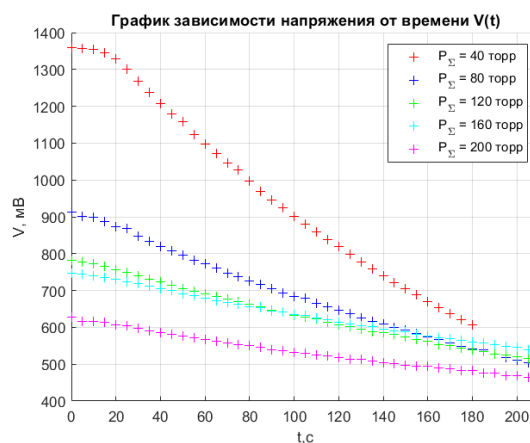
**Данные при  $P_{\Sigma} = 160$  торр:**

$t, \text{ c}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$v, \text{ мВ}$	744	741	735	730	724	718	712	706	700	692	686	679	673	668
$t, \text{ c}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
$v, \text{ мВ}$	663	657	653	645	641	634	632	626	621	614	610	604	602	596
$t, \text{ c}$	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
$v, \text{ мВ}$	591	587	581	576	571	569	565	561	557	552	549	545	540	537

Данные при  $P_{\Sigma} = 200$  торр:

$t, \text{ с}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$v, \text{ мВ}$	616	616	613	607	604	598	591	585	580	577	571	567	562	557
$t, \text{ с}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
$v, \text{ мВ}$	554	550	547	540	537	533	530	525	523	518	514	513	508	504
$t, \text{ с}$	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
$v, \text{ мВ}$	502	498	494	494	490	487	483	482	477	476	470	468	464	464

По полученным данным построим графики зависимости  $V(t)$ , чтобы определить, какими значениями нам стоит пренебречь (рисунок 4)



Видим, что при  $P_{\Sigma} = 40$  торр и при  $P_{\Sigma} = 80$  торр первые 3 значения не соответствуют общей тенденции графика  $\Rightarrow$  при построении зависимости от  $\ln V(t)$  мы не будем включать эти точки в график

- Для каждого из давлений построим графики, откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат - логарифм от показаний гальванометра.

График будем строить, воспользовавшись методом наименьших квадратов

$$y = a + bx$$

:

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad a = \langle y \rangle - b * \langle x \rangle \quad (11)$$

Погрешность в этом случае можно найти по формуле:

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2}; \quad \sigma_a \approx \sigma_b \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (12)$$



**График зависимости  $\ln V(t)$   $P_{\Sigma} = 40$  торр:** Построим график зависимости  $\ln V(t)$  Здесь  $x \Rightarrow t, y \Rightarrow \log V$ . Для этого сперва определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_1$  при данном значении давления:

$$\langle t \rangle = 82,5$$

$$\langle \log V \rangle = 6,8154$$

$$\langle t^2 \rangle = 921,25$$

$$\langle \log V^2 \rangle = 46,5079$$

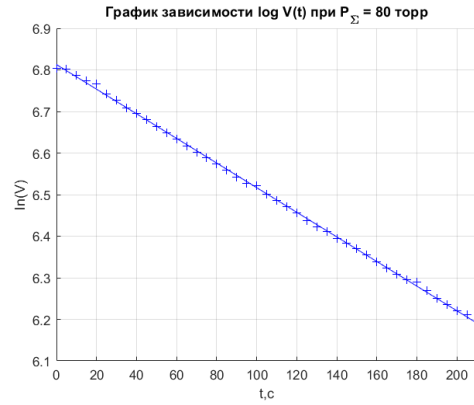
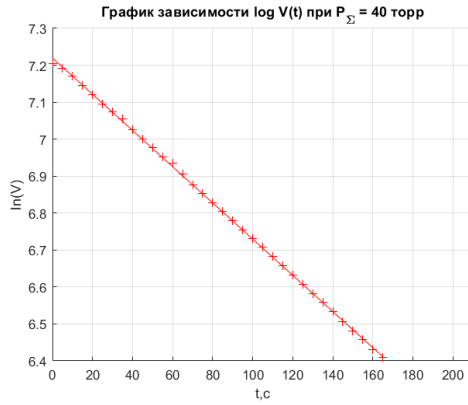
$$\langle t * \log V \rangle = 550,4822$$

Всего бралось  $N = 34$  точек для аппроксимации.

Найдем константу:

$$b_1 = \frac{550,4822 - 82,5 * 6,8154}{921,25 - 82,5^2} = -0,0049$$

$$\sigma_{b_1} = \frac{1}{\sqrt{34}} \sqrt{\frac{46,5079 - 6,8154^2}{921,25 - 82,5^2} - 0,0049^2} = 0,1 * 10^{-3}$$



**График зависимости  $\ln V(t)$   $P_{\Sigma} = 80$  торр:** Определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_2$  при данном значении давления:

$$\langle t \rangle = 102,5$$

$$\langle \log V \rangle = 6,5093$$

$$\langle t^2 \rangle = 14179$$

$$\langle \log V^2 \rangle = 42,4037$$

$$\langle t * \log V \rangle = 656,3320$$

Всего бралось  $N = 42$  точек для аппроксимации.

Найдем константу:

$$b_2 = \frac{656,3320 - 102,5 * 6,5093}{14179 - 102,5^2} = -0,00296$$

$$\sigma_{b_2} = \frac{1}{\sqrt{42}} \sqrt{\frac{42,4037 - 6,5093^2}{14179 - 102,5^2} - 0,00296^2} = 0,1 * 10^{-3}$$

**График зависимости  $\ln V(t)$   $P_{\Sigma} = 120$  торр:** Определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_3$  при данном значении давления:

$$\langle t \rangle = 105$$

$$\langle \log V \rangle = 6,4460$$

$$\langle t^2 \rangle = 14875$$

$$\langle \log V^2 \rangle = 41,5676$$

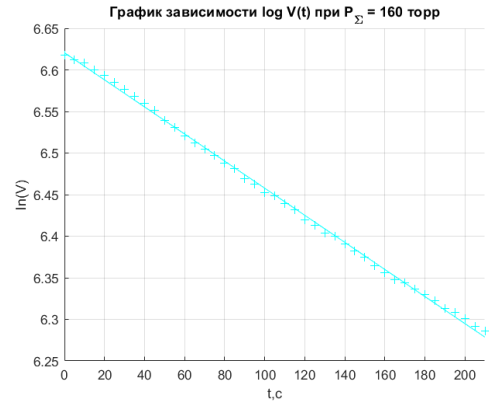
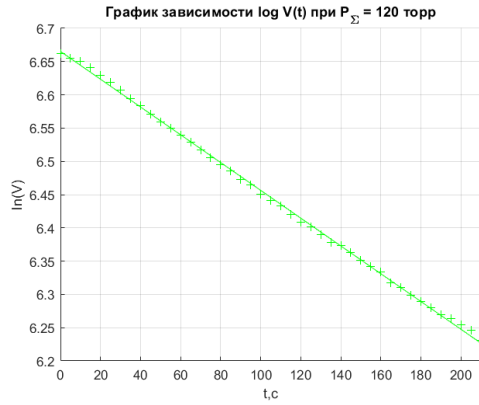
$$\langle t * \log V \rangle = 668,7896$$

Всего бралось  $N = 43$  точек для аппроксимации.

Найдем константу:

$$b_3 = \frac{668,7896 - 105 * 6,4460}{14875 - 105^2} = -0,00209$$

$$\sigma_{b_3} = \frac{1}{\sqrt{43}} \sqrt{\frac{41,5676 - 6,4460^2}{14875 - 105^2} - 0,00209^2} = 0,1 * 10^{-3}$$



**График зависимости  $\ln V(t)$   $P_{\Sigma} = 160$  торр:** Определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_4$  при данном значении давления:

$$\langle t \rangle = 105$$

$$\langle \log V \rangle = 6,4496$$

$$\langle t^2 \rangle = 14875$$

$$\langle \log V^2 \rangle = 41,6076$$

$$\langle t * \log V \rangle = 670,9393$$

Всего бралось  $N = 43$  точек для аппроксимации.

Найдем константу:

$$b_4 = \frac{670,9393 - 105 * 6,4496}{14875 - 105^2} = -0,00163$$

$$\sigma_{b_4} = \frac{1}{\sqrt{43}} \sqrt{\frac{41,6076 - 6,4496^2}{14875 - 105^2} - 0,00163^2} = 0,2 * 10^{-3}$$

**График зависимости  $\ln V(t)$   $P_{\Sigma} = 200$  торр:** Определим константы, необходимые для подсчета коэффициента  $b_5$  при данном значении давления:

$$\langle t \rangle = 105$$

$$\langle \log V \rangle = 6,2788$$

$$\langle t^2 \rangle = 14875$$

$$\langle \log V^2 \rangle = 39,4309$$

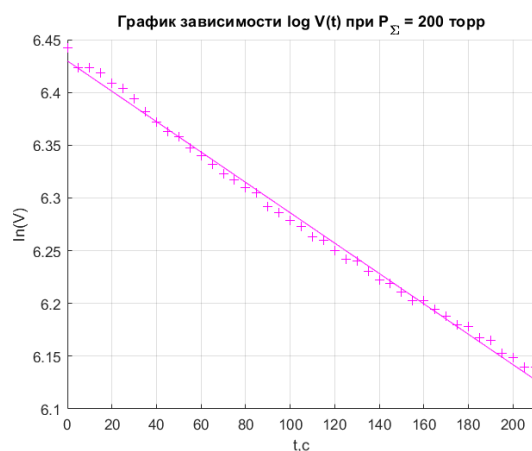
$$\langle t * \log V \rangle = 653,7311$$

Всего бралось  $N = 43$  точек для аппроксимации.

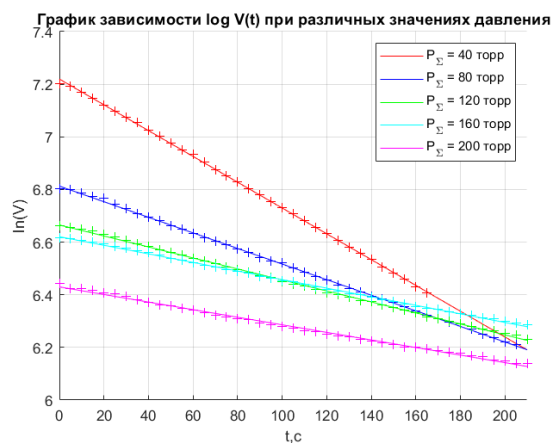
Найдем константу:

$$b_5 = \frac{653,7311 - 105 * 6,2788}{14875 - 105^2} = -0,0014$$

$$\sigma_{b_5} = \frac{1}{\sqrt{43}} \sqrt{\frac{39,4309 - 6,2788^2}{14875 - 105^2} - 0,0014^2} = 0,2 * 10^{-3}$$



Построим сводный график:



По угловым коэффициентам экспериментальных прямых и известным параметрам установки рассчитаем коэффициенты взаимной диффузии и их погрешности при выбранных давлениях по формулам:

$$D = -\frac{1}{2} V b \frac{L}{S} \quad (13)$$

$$\sigma_D = D \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L/S}}{L/S}\right)^2} \quad (14)$$

где  $b$  - коэффициенты наклонов прямых

$$D_1 = \frac{1}{2} 775 * 0,0049 * 5,3 = 10,0634, \quad \sigma_{D_1} = 10,0634 * \sqrt{1 * 10^{-8} + 1,665 * 10^{-4} * 3,56 * 10^{-4}} = 0,3$$

$$D_2 = \frac{1}{2} 775 * 0,00296 * 5,3 = 6,0791, \quad \sigma_{D_2} = 6,0791 * \sqrt{1 * 10^{-8} + 1,665 * 10^{-4} * 3,56 * 10^{-4}} = 0,2$$

$$D_3 = \frac{1}{2} 775 * 0,00209 * 5,3 = 4,2923, \quad \sigma_{D_3} = 4,2923 * \sqrt{1 * 10^{-8} + 1,665 * 10^{-4} * 3,56 * 10^{-4}} = 0,1$$

$$D_4 = \frac{1}{2} 775 * 0,00163 * 5,3 = 3,3476, \quad \sigma_{D_4} = 3,3476 * \sqrt{4 * 10^{-8} + 1,665 * 10^{-4} * 3,56 * 10^{-4}} = 0,08$$

$$D_5 = \frac{1}{2} 775 * 0,0014 * 5,3 = 2,8752, \quad \sigma_{D_5} = 2,8752 * \sqrt{4 * 10^{-8} + 1,665 * 10^{-4} * 3,56 * 10^{-4}} = 0,07$$

Результаты сведены в таблицу:

P, торр	40	80	120	160	200
D, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	10,0634	6,0791	4,2923	3,3476	2,8752
$\sigma_D$ , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,3	0,2	0,1	0,08	0,07

По полученным данным для коэффициента D, построим график зависимости D(1/P), пользуясь МНК:

$$b = \frac{\langle D * 1/P \rangle - \langle 1/P \rangle \langle D \rangle}{\langle (1/P)^2 \rangle - \langle 1/P \rangle^2}, \quad a = \langle D \rangle - b \langle 1/P \rangle$$

$$\langle 1/P \rangle = 1,142 * 10^{-2}$$

$$\langle D \rangle = 5,333$$

$$\langle (1/P)^2 \rangle = 1,829 * 10^{-4}$$

$$\langle D^2 \rangle = 35,29$$

$$\langle D * (1/P) \rangle = 7,983 * 10^{-2}$$

$$N = 5$$

$$b = \frac{7,983 * 10^{-2} - 1,142 * 10^{-2} * 5,333}{1,829 * 10^{-4} - (1,142 * 10^{-2})^2} = 358,48 \quad a = 5,333 - 358,48 * 1,142 * 10^{-2} = 1,24$$

Найдем точку пересечения прямой  $x = 1/748$  и  $y = 1,24 + 358,48x$  Получим значение коэффициента взаимной диффузии:

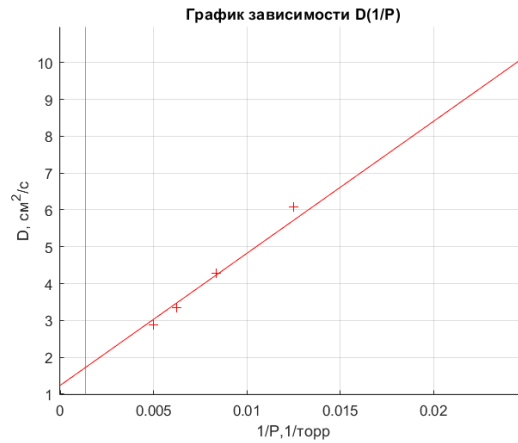
$$D = 1,24 + 358,48 * (1/748) \approx 1,72 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Оценим погрешность:

$$\sigma_b = \frac{1}{\sqrt{5}} \sqrt{\frac{35,29 - 5,333^2}{1,829 * 10^{-4} - 1,142 * 10^{-2}} - 358,48^2} = 11$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{1,829 * 10^{-4} - (1,142 * 10^{-2})^2} = 0,08$$

$$\sigma_D = D \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2} = 1,72 \sqrt{\left(\frac{11}{358,48}\right)^2 + \left(\frac{0,08}{1,24}\right)^2} \approx 0,1$$



## 4 Вывод:

1. Подтвердили линейную зависимость  $\ln V(t)$
2. Установили линейную зависимость  $D(1/P)$
3. Рассчитали коэффициенты взаимной диффузии при
  - $P_{\Sigma} = 40$  торр, равное  $D_1 = 10,1 \pm 0,3 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
  - $P_{\Sigma} = 80$  торр, равное  $D_2 = 6,1 \pm 0,2 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
  - $P_{\Sigma} = 120$  торр, равное  $D_3 = 4,3 \pm 0,1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
  - $P_{\Sigma} = 160$  торр, равное  $D_4 = 3,35 \pm 0,08 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
  - $P_{\Sigma} = 200$  торр, равное  $D_1 = 2,88 \pm 0,07 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
4. Получили численное значение коэффициента взаимной диффузии при давлении  $P = 748$  торр, равное  $D = 1,7 \pm 0,1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$