

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа фотоники, электроники и молекулярной физики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Автор:  
Макаров Лев Евгеньевич  
Б04-306

# 1 Введение

## 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

## В работе используются:

- измерительная установка
- форвакуумный насос
- баллон с газом (гелий)
- манометр
- источник питания
- магазин сопротивлений
- гальванометр
- секундомер

# 2 Теоретические сведения

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

В системе, состоящей из двух компонентов, плотность потока вещества в результате взаимной диффузии описывается законом Фика:

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

где  $D_{ab} = D_{ba} = D$  – коэффициент взаимной диффузии компонентов,  $j_{ab}$  – плотности потока частиц соответствующего сорта (количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени).

В работе исследуется диффузия примеси лёгкого газа (гелия) на фоне воздуха, поэтому концентрация воздуха в опыте значительно больше концентрации гелия, и её относительное изменение незначительно. В процессе работы будет описываться только диффузия примеси гелия на стационарном фоне воздуха.

Проведём теоретическую оценку величины коэффициента взаимной диффузии. В работа мала концентрация гелия, более того, масса атомов гелия много меньше массы молекул, составляющих воздух. При таких условиях перемешивание газов в эксперимента можно рассматривать как диффузию гелия на стационарном фоне воздуха. Тогда коэффициент диффузии приблизительно равен

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина свободного пробега частиц гелия,  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$  – их средняя тепловая скорость. В общем случае необходимо считать  $\lambda = \frac{1}{n_{\Sigma}\sigma}$ , где  $n_{\Sigma} = n_{He} + n_B = \frac{P_{\Sigma}}{kT}$  – полная концентрация частиц,  $\sigma$  – среднее сечение столкновения частиц гелия с воздухом. Также  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \mu}}$  – средняя относительная. Таким образом, теоретическая оценка предполагает, что коэффициент диффузии не зависит от пропорция элементов, а обратно пропорционален давлению  $D \propto \frac{1}{P_{\Sigma}}$ .

Рассмотрим процесс выравнивания концентрации в установке, она зависит от координат и времени во всей установке. Объём соединительной трубки мал по сравнению с с объёмами сосудов. Поэтому концентрации газов можно считать постоянной по всему объёму сосудов; считаем, что процесс выравнивания происходит только за счёт диффузии в трубке и является стационарным (так как считаем стационарным поток частиц). Величина этого стационарного потока  $J = -DS \frac{\partial n}{\partial x}$ , и он одинаковый во всём сечении трубки, тогда  $n(x)$  – линейная функция координаты и  $\frac{dn}{dx} = \frac{\Delta n}{l}$  ( $l$  – длина трубки), получаем

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

Предположим, что установился линейный профиль концентрации и полученное соотношение справедливо в любой момент времени. Получаем квазистационарное приближение зависимости концентраций  $n_1$  и  $n_2$  от времени.

Через  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  обозначим изменения концентрации в объёмах  $V_1$  и  $V_2$  за время  $\Delta t$ . Тогда  $V_1 \Delta n_1$  – изменение количества компонента в объёме  $V_1$ , а  $V_2 \Delta n_2$  – изменение количества этого компонента в объёме  $V_2$ . По закону сохранения вещества следует, что  $V_1 \Delta n_1 + V_2 \Delta n_2 = const$ , поэтому  $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$ . Эти изменения происходят вследствие диффузии, поэтому

$$V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2 = J \Delta t = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \Delta t \quad (4)$$

Делим равенство на  $\Delta t$

$$V_1 \frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}, V_2 \frac{dn_2}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad (5)$$

Делим первое уравнение на  $V_1$ , второе на  $V_2$ , вычтем равенства друг из друга:

$$\frac{dn_1}{dt} - \frac{dn_2}{dt} = -\frac{n_1 - n_2}{l} DS \left( \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (6)$$

Введём новую переменную  $\Delta n = n_1 - n_2$ , проинтегрируем уравнение, получим

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{(-t/\tau)} \quad (7)$$

где  $\Delta n_0$  – разность концентраций примеси в начальный момент времени, а

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} \quad (8)$$

Видим, что разность концентраций убывает по экспоненциальному закону и тем быстрее, чем меньше  $\tau$  – величина, определяемая геометрическими параметрами установки и величиной коэффициента диффузии.

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

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  $r$ , протянутая вдоль оси цилиндра радиуса  $R$ , 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

$$Q = \kappa \frac{2\pi L}{\ln(R/r)} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

где  $\kappa$  - теплопроводность,  $L$  - длина нити,  $T_1, T_2$  - температуры проволоочки и стенки. При  $Q = const$  температура проволоки и её сопротивление определяются теплопроводностью газа и, следовательно, его составом. Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема, представленная на рис. 2 (см. пункт 4).

В процессе диффузии разность концентраций убывает по экспоненциальному закону. 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  $D$ .

### 3 Оборудование и экспериментальные погрешности

Секундомер:  $\sigma_s = 0,003$  с

Гальванометр:  $\sigma_v = 0.0003$  мВ

#### Экспериментальная установка

Общий вид конструкции установки приведён на рис. 1. Установка состоит из двух сосудов  $V_1$  и  $V_2$ , соединённых краном  $K_3$ , форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем Т, манометра М и системы напуска гелия, состоящей из кранов  $K_6, K'_6, K_7$ . Кран  $K_5$  позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. Сосуды  $V_1$  и  $V_2$  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 с течением времени выравниваются. Между форвакуумным насосом и краном  $K_5$  вставлен предохранительный баллон, защищающий кран и установку при неправильной её эксплуатации от попадания форвакуумного масла из насоса. Сосуды  $V_1$  и  $V_2$  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 М регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или иной сосуды. Кран  $K_4$  изолирует форвакуумный насос от установки. Для подачи воздуха в установку служит кран  $K_5$ . Дополнительный кран  $K'_6$  служит для вакуумной изоляции установки от системы подачи гелия. Краны  $K_4, K_5, K'_6$  обладают повышенной вакуумплотностью и хорошо изолируют установку от протечек.

Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема, представленная на рис. 2.

Здесь  $D_1, D_2$  - датчики теплопроводности, расположенные в сосудах  $V_1$  и  $V_2$ . Сопротивления  $R_1, R_2, R$  служат для установки прибора на нуль (балансировка моста). В одну из диагоналей моста включен гальванометр, к другой подключается небольшое постоянное напряжение. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  спарены (их подвижные контакты находятся на общей оси) и изменяются одновременно при повороте ручки грубой регулировки. Точная балансировка выполняется потенциометром  $R$ . Балансировку необходимо проводить перед каждым экспериментом заново: при этом установка заполняется чистым газом (воздухом без гелия) при давлении, близком «рабочему» (при котором затем будут проводиться измерения).

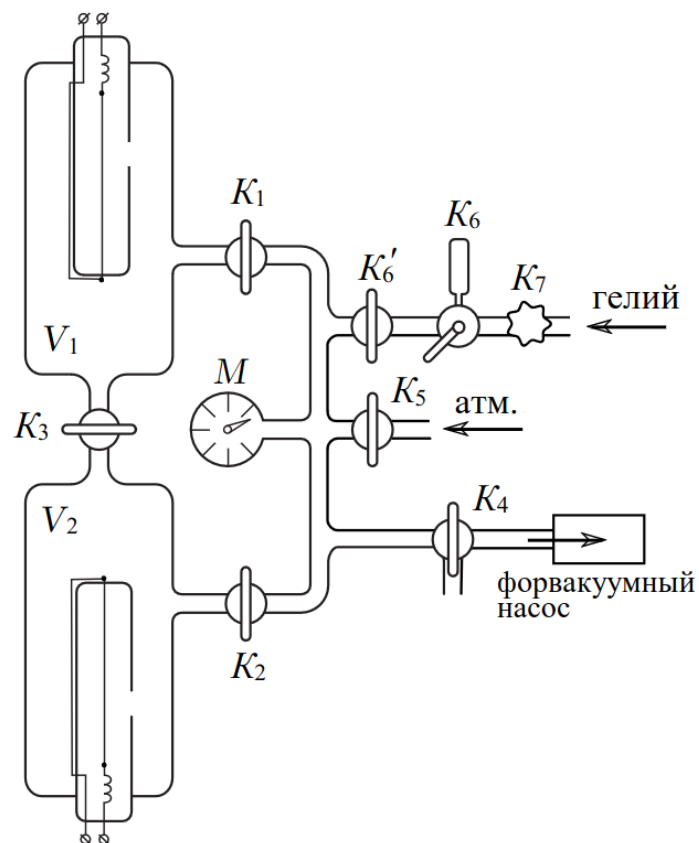


Рис. 1: Установка для исследования взаимной диффузии газов

Мост балансируется при заполнении сосудов (и датчиков) одной и той же смесью. При заполнении сосудов смесями различного состава возникает «разбаланс» моста. При незначительном различии в составах смесей показания гальванометра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций примеси:  $U \propto \Delta\kappa \propto \Delta n$

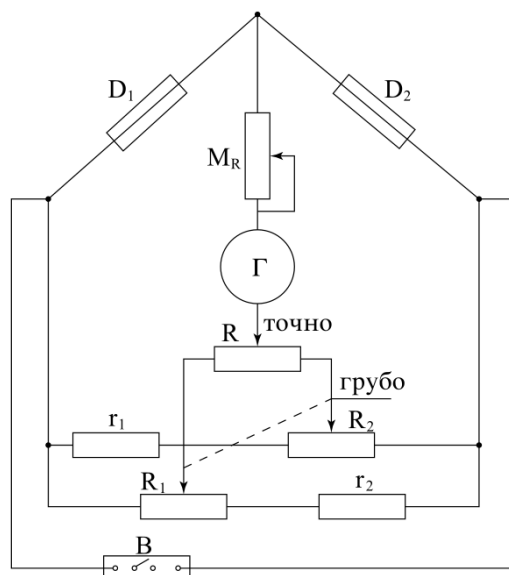


Рис. 2: Мостовая схема с датчиками теплопроводности для измерения разности концентраций газов

Гелий содержится в баллоне (не изображен на рис. 1) под давлением, превышающим атмосферное. Для предотвращения избыточного расхода гелия и его неконтролируемого проникновения в установку предусмотрен металлический кран (K7), отделяющий её от баллона с гелием. Его

открывают только на время непосредственного заполнения установки гелием, остальное время он должен быть закрыт. Для подачи малых порций гелия предусмотрен двухходовый кран с дозатором (рис. 3). При повороте рычажка Р в положение I гелий в небольшом количестве поступает в дозатор (если открыт К7), а при повороте Р в положение II порция из дозатора поступает в установку.

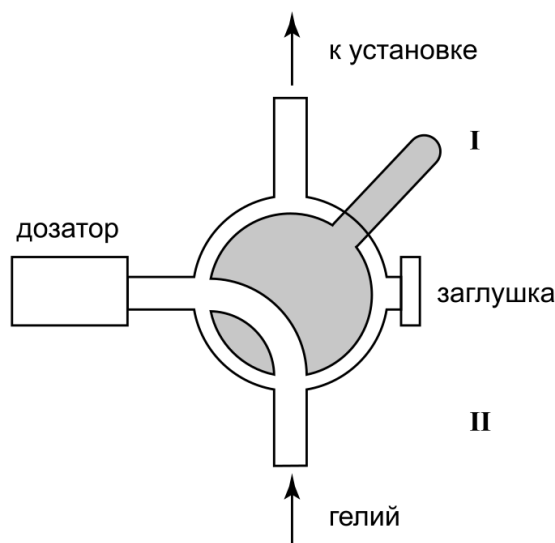


Рис. 3: Кран  $K_6$

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Знакомство с установкой

Познакомимся с установкой: изучим положение каждого крана на установке и всё остальное оборудование. Используется установка типа В (рис. 1). Проверим, что компьютер включен и работает исправно.

Для данной установки известны следующие параметры:

$$V_1 = (775 \pm 10) \text{ см}^3, \quad V_2 = (775 \pm 10) \text{ см}^3, \quad l/S = (5,3 \pm 0,1) \text{ 1/см} \quad (11)$$

### 4.2 Подготовка оборудования

Включим питание для всех приборов. Откроем краны К1, К2, К3. Убедимся, что кран К7 плотно закрыт.

Подсоединим установку в форвакуумному насосу. Откачаем её до давления  $\sim 0,1$  торр, для этого насос должен работать в течение 3 минут. После откачки выключим насос.

### 4.3 Балансировка измерительного моста

Запустим в установку рабочее давление (в данном случае  $P_\Sigma = 40$  торр). Изолируем объёмы  $V_1$  и  $V_2$  (закроем краны К1 и К2). Теперь сбалансируем измерительный мост с помощью переключателей грубо/точно так, чтобы напряжение на гальванометре было по модулю менее 0,1 мВ.

## 4.4 Подготовка рабочих смесей

Приготовим рабочие смеси для измерений. Для этого

1. откачаем установку до  $\sim 0,1$  торр
2. Изолируем объём  $V_2$ , закрыв краны K1 и K2
3. Напусти в установку  $P_{He} = 0,2P_{\text{раб}}$  (в данном случае  $\sim 8$  торр или 1 деление на вакуометре)
4. Перекроем подачу гелия и откачаем газ из патрубков (не забыв перекрыть кран K1)
5. Откроем кран K2 и запустим в установку воздуха на  $P_B = 1,675P_{\text{раб}}$  (в данном случае 67 торр или 9 делений вакуометра)
6. Уравняем давление в сосудах  $V_1$  и  $V_2$ , открыв краны K1 и K2 и подождав 30 секунд.
7. Запишем получившееся значение рабочего давления  $P_{\Sigma} = 41_3$  торр

## 4.5 Измерения при процессе диффузии

Запустим программу для сбора данных на компьютере, вобъём туда рабочее значение давления. Теперь откроем кран K3, подождём 2-3 секунды и запустим процесс измерения. Измеряем до тех пор, пока значение на гальванометре не упадёт на 50 %. После измерения сохраним данные в папку (данные в здесь не представлены ввиду большого количества точек).

## 4.6 Прочие измерения

Проведём измерения, аналогичные пунктам 4.2-4.5, только для рабочих давлений в 80, 120 и 160 торр.

## 4.7 Проверка независимости коэффициента диффузии от пропорций компонентов

Данный пункт работы не выполнялся.

## 4.8 Проверка выполнения законы (7)

Для проверки выполнения закона (7) построим для каждого набора измерений график зависимости  $\ln U$  от времени  $T$ . Если закон выполняется, то эта зависимость должна быть линейной. Значит можно воспользоваться МНК для нахождения наилучшей прямой для каждого набора точек. В данном случае  $x = T$ , а  $y = \ln U$ . Для аппроксимации наилучшей прямой воспользуемся формулой:

$$k = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}, \text{ а } b = \langle y \rangle - k \langle x \rangle \quad (12)$$

Погрешности для  $k$  и  $b$  рассчитываются по формулам:

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2} \quad (13)$$

$$\sigma_b = \sigma_k \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (14)$$

Посчитаем для каждого набора измерений промежуточные значения МНК и запишем их в таблицу 1.

$P_{\Sigma}$ , торр	41,3	82,5	120	161,3
$T$ , с	62,525	137,173	190,499	278,500
$\ln(U)$	2,224	2,147	2,201	2,242
$T \cdot T$ , с <sup>2</sup>	5232	25119	48450	103509
$\ln(U) \cdot \ln(U)$	4,983	4,649	4,880	5,070
$T \cdot \ln(U)$ , с	132,158	278,871	397,878	591,465
$n$	126	275	382	558
$k$ , с <sup>-1</sup>	-0,005219	-0,002482	-0,001755	-0,001273
$\sigma_k$ , с <sup>-1</sup>	0,000001	0,000002	0,000002	0,000001
$b$	2,55038	2,4875	2,5350	2,5971
$\sigma_b$	0,00005	0,0002	0,0002	0,0001

Таблица 1: Вычисление промежуточных значений для МНК для всех серий опытов

Для каждого набора измерений вычислим параметры прямой и запишем в таблицу 1.

$$k_{41,3} = \frac{132,158 - 62,525 \cdot 2,224}{5232 - 62,525^2} \approx -0,005219 \text{ с}^{-1}$$

$$\sigma_{k_{41,3}} = \frac{1}{\sqrt{126}} \sqrt{\frac{4,983 - 2,224^2}{5232 - 62,525^2} - (-0,005219)^2} \approx 0,000001 \text{ с}^{-1}$$

$$b_{41,3} = 2,224 - (-0,005219) \cdot 62,525 \approx 2,55038$$

$$\sigma_{b_{41,3}} = 0,000001 \cdot \sqrt{5232 - 62,525^2} \approx 0,00005$$

$$k_{82,5} = \frac{278,871 - 137,173 \cdot 2,147}{25119 - 137,173^2} \approx -0,002482 \text{ с}^{-1}$$

$$\sigma_{k_{82,5}} = \frac{1}{\sqrt{275}} \sqrt{\frac{4,649 - 2,147^2}{25119 - 137,173^2} - (-0,002482)^2} \approx 0,000002 \text{ с}^{-1}$$

$$b_{82,5} = 2,147 - (-0,002482) \cdot 137,173 \approx 2,4875$$

$$\sigma_{b_{82,5}} = 0,000002 \cdot \sqrt{25119 - 137,173^2} \approx 0,0002$$

$$k_{120} = \frac{397,878 - 190,499 \cdot 2,201}{48450 - 190,499^2} \approx -0,001755 \text{ с}^{-1}$$

$$\sigma_{k_{120}} = \frac{1}{\sqrt{382}} \sqrt{\frac{4,880 - 2,201^2}{48450 - 190,499^2} - (-0,001755)^2} \approx 0,000002 \text{ с}^{-1}$$

$$b_{120} = 2,201 - (-0,001755) \cdot 190,499 \approx 2,5350$$

$$\sigma_{b_{120}} = 0,000002 \cdot \sqrt{48450 - 190,499^2} \approx 0,0002$$

$$k_{161,3} = \frac{591,465 - 278,500 \cdot 2,242}{103509 - 278,500^2} \approx -0,001273 \text{ с}^{-1}$$

$$\sigma_{k_{161,3}} = \frac{1}{\sqrt{558}} \sqrt{\frac{5,070 - 2,242^2}{103509 - 278,500^2} - (-0,001273)^2} \approx 0,000001 \text{ с}^{-1}$$



$$b_{161,3} = 2,242 - (-0,001273) \cdot 278,500 \approx 2,5971$$

$$\sigma_{b_{161,3}} = 0,000001 \cdot \sqrt{103509 - 278,500^2} \approx 0,0001$$

Нанесём прямые на график, изображённый на рис. 4. Экспериментальные точки наносить не будем, ввиду их количества.

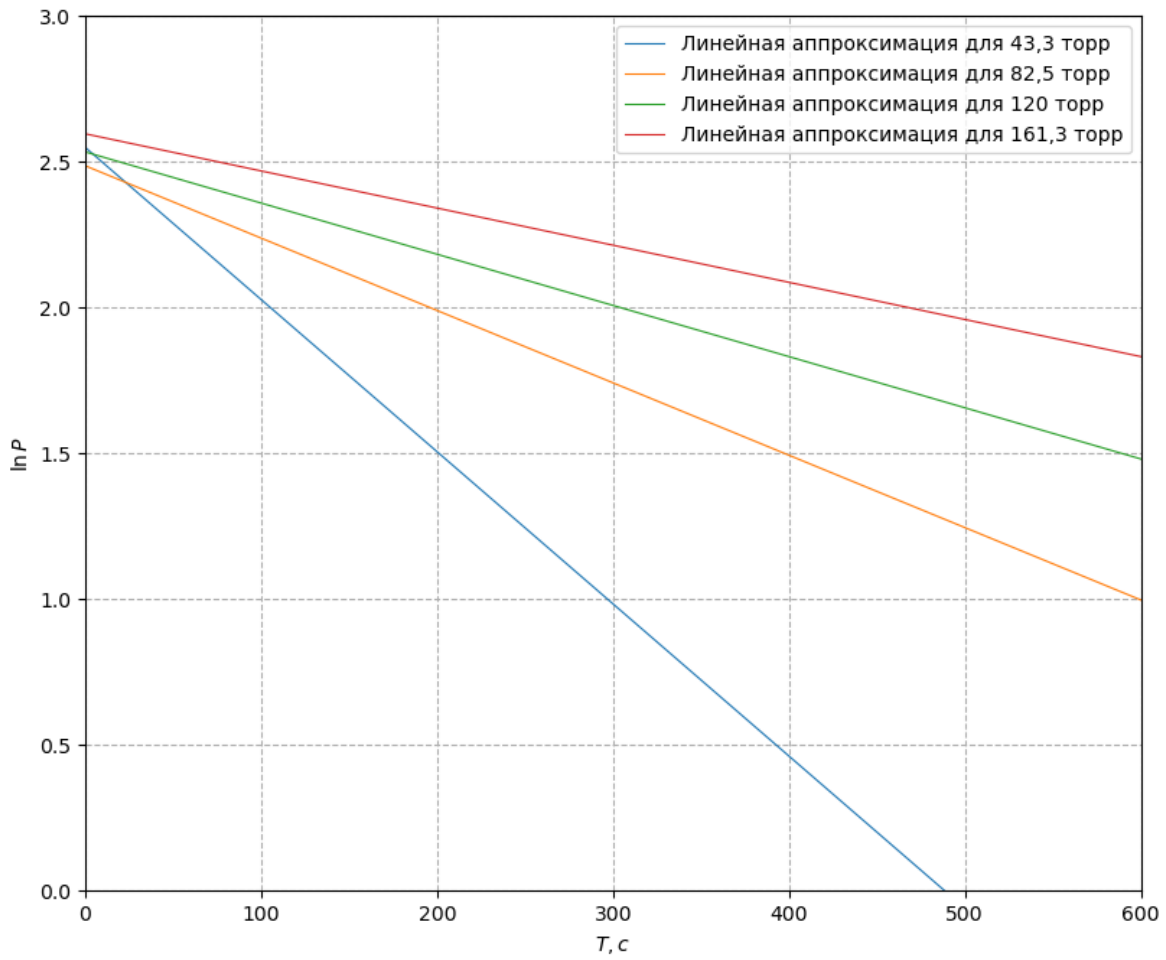


Рис. 4: График зависимости  $\ln U$  от  $T$  для всех наборов измерений

Рассчитаем коэффициенты диффузии при выбранных рабочих давлениях. Так как мы имеем соотношение  $\ln(U) = kt + b$ , из которого получаем:

$$U = U_0 e^{-t/\tau} \quad \text{и} \quad U = e^{kt+b} \implies U_0 = e^b, \quad -\frac{1}{\tau} = k \implies \tau = -\frac{1}{k} \quad (15)$$

Из формулы (8) имеем:

$$D = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{S \tau} = -\frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{kl}{S} \quad (16)$$

Погрешность измерения  $D$  можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_D &= D \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial V_1}\right)^2 (\sigma_{V_1})^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial V_2}\right)^2 (\sigma_{V_2})^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial l/S}\right)^2 (\sigma_{l/S})^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial k}\right)^2 (\sigma_k)^2 =} \\ &= D \sqrt{k^2 (l/S)^2 \frac{V_1^4 \sigma_{V_2}^2 + V_2^4 \sigma_{V_1}^2}{(V_1 + V_2)^4} + \frac{D^2}{(l/S)^2} \sigma_{l/S}^2 + \frac{D^2}{k^2} \sigma_k^2 =} \\ &= D^2 \sqrt{\frac{\sigma_{V_1}^2 + \sigma_{V_2}^2}{(V_1 + V_2)^2} + \frac{\sigma_{l/S}^2}{(l/S)^2} + \frac{\sigma_k^2}{k^2}} \end{aligned} \quad (17)$$

Теперь по формулам (16) и (17) рассчитаем коэффициент диффузии и его погрешность для каждого рабочего давления и запишем в таблицу 2.

$$\begin{aligned} D_{41,3} &= \frac{775 \cdot 775}{775 + 775} \cdot 0,005219 \cdot 5,3 \approx 10,7 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ \sigma_{D_{41,3}} &= 11^2 \sqrt{\frac{10^2 + 10^2}{(775 + 775)^2} + \frac{0,1^2}{5,3^2} + \frac{0,000001^2}{(-0,005219)^2}} \approx 0,2 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{82,5} &= \frac{775 \cdot 775}{775 + 775} \cdot 0,002482 \cdot 5,3 \approx 5,1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ \sigma_{D_{82,5}} &= 5,1^2 \sqrt{\frac{10^2 + 10^2}{(775 + 775)^2} + \frac{0,1^2}{5,3^2} + \frac{0,000002^2}{(-0,002482)^2}} \approx 0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{120} &= \frac{775 \cdot 775}{775 + 775} \cdot 0,001755 \cdot 5,3 \approx 3,6 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ \sigma_{D_{120}} &= 5,1^2 \sqrt{\frac{10^2 + 10^2}{(775 + 775)^2} + \frac{0,1^2}{5,3^2} + \frac{0,000002^2}{(-0,001755)^2}} \approx 0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{161,3} &= \frac{775 \cdot 775}{775 + 775} \cdot 0,001273 \cdot 5,3 \approx 2,6 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ \sigma_{D_{161,3}} &= 5,1^2 \sqrt{\frac{10^2 + 10^2}{(775 + 775)^2} + \frac{0,1^2}{5,3^2} + \frac{0,000001^2}{(-0,001273)^2}} \approx 0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \end{aligned}$$

$P_{\text{раб}}, \text{ торр}$	41,3	82,5	120	161,3
$D, \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$	10,7	5,1	3,6	2,6
$\sigma_D, \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$	0,2	0,1	0,1	0,1

Таблица 2: Коэффициенты диффузии для соответствующих значений давления

$$\begin{aligned} D_{41,3} &= (10,7 \pm 0,2) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{82,5} &= (5,1 \pm 0,1) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{120} &= (3,6 \pm 0,1) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ D_{161,3} &= (2,6 \pm 0,1) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \end{aligned}$$

## 4.9 График зависимости коэффициента диффузии от обратного давления

Построим график зависимости коэффициента диффузии  $D$  от обратного давления  $1/P$ . Так как зависимость должна быть линейной, то воспользуемся МНК, где  $x = 1/P$ , а  $y = D$ . Для параметров наилучшей прямой имеем:

$$k = \frac{\langle xy \rangle}{\langle x^2 \rangle}, \quad \sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} - k^2} \quad (18)$$

Посчитаем все промежуточные значения МНК и запишем их в таблицу 3.

$N$	$x$	$y$	$x^2$	$y^2$	$xy$
1	0,024	11	0,00059	114,9	0,26
2	0,012	5,1	0,00015	26,0	0,06
3	0,008	3,6	0,00007	13,0	0,03
4	0,006	2,6	0,00004	6,8	0,02
ср	0,013	5,5	0,00021	40,2	0,09

Таблица 3: Вычисление промежуточных значений МНК для зависимости  $D$  от  $1/P$

Теперь посчитаем по формуле (18) параметры прямой:

$$k_D = \frac{0,09}{0,00021} \approx 437 \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

$$\sigma_{k_D} = \frac{1}{\sqrt{4}} \sqrt{\frac{40,2}{0,00021} - 437^2} \approx 5 \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

Нанесём график этой прямой на рис. 5.

Теперь пользуясь полученной зависимостью вычислим значение коэффициента диффузии при атмосферном давлении  $P_A = 753,5$  торр:

$$D_A = k_D / P_A = 437 / 753,5 \approx 0,580 \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

$$\sigma_{D_A} = D_A \sqrt{\frac{\sigma_{k_D}^2}{k_D^2} + \frac{\sigma_{P_A}^2}{P_A^2}} = 0,580 \sqrt{\frac{5^2}{437^2} + \frac{0,3^2}{753,5^2}} \approx 0,006 \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

Тогда

$$D_A = (580 \pm 6) \cdot 10^{-3} \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (19)$$

Табличное значение  $D_A^{\text{табл}} = 620 \cdot 10^{-3} \text{ торр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Как видно полученное экспериментально значение неплохо совпадает с табличным.

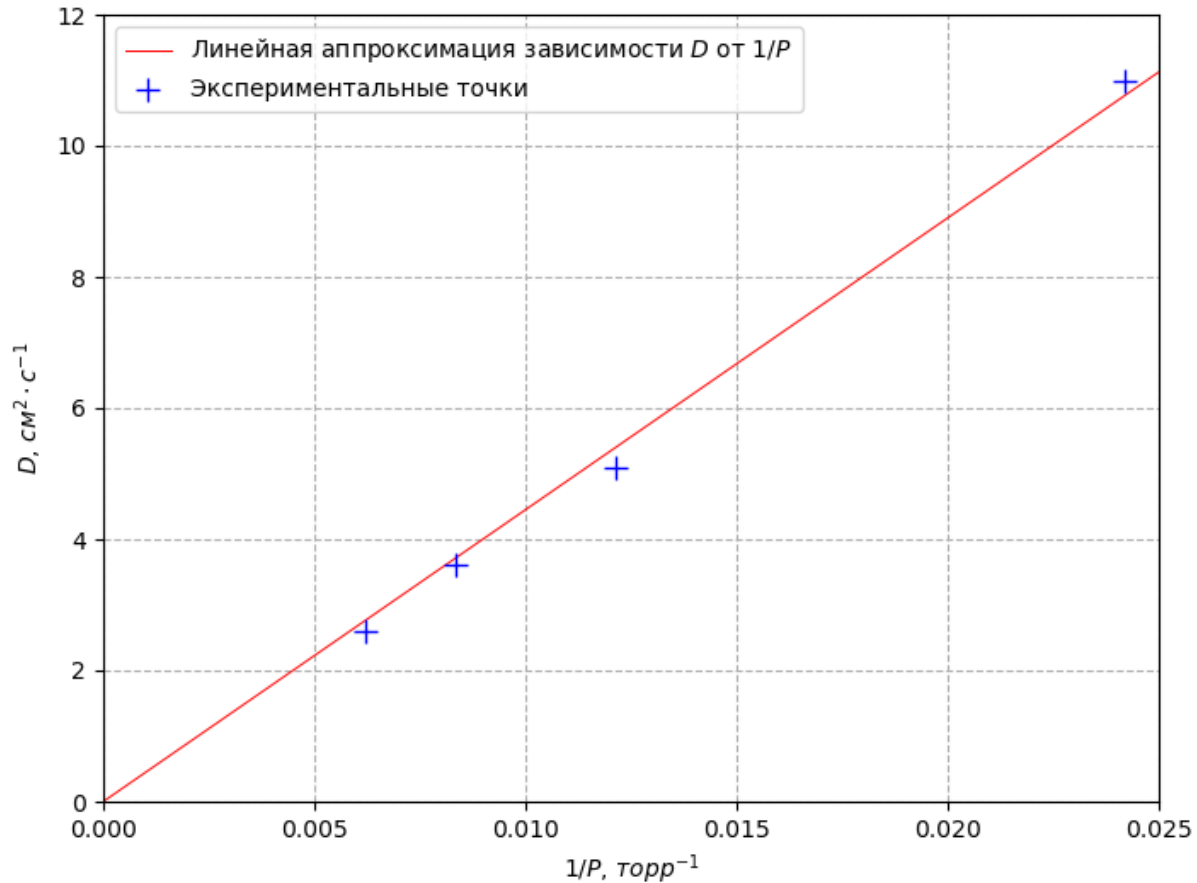


Рис. 5: График зависимости  $D$  от  $1/P$

#### 4.10 Сравнение коэффициентов диффузии

Данный пункт работы не выполняется, так как не выполнялся пункт 4.7.

#### 4.11 Оценка длины свободного пробега атомов гелия и эффективного сечения столкновения атомов гелия с молекулами воздуха

Оценим эффективное сечение столкновения атомов гелия с молекулами воздуха:

$$\sigma = \pi (R_{He} + R_{N_2})^2 = 3,14 \cdot (1,67824 \cdot 10^{-15} + 0,38 \cdot 10^{-9})^2 \approx 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2 \quad (20)$$

Вычислим среднюю тепловую скорость молекул гелия:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 296}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}} \approx 1250 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Из формулы (2) получаем:

$$\lambda_{He} = \frac{3D_A}{\bar{v}} = \frac{3 \cdot 0,58 \cdot 133 \cdot 10^{-4}}{1250} \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

## 5 Обсуждение результатов и выводы

В ходе работы была зарегистрирована зависимость концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности для четырёх рабочих значений давления.

Были измерены коэффициенты диффузии при рабочих давлениях. Было экстраполировано значение коэффициента диффузии при нормальных условиях, которое приблизительно совпадает с табличным значением.

Были оценены величины длины свободного пробега атомов гелия и эффективного сечения столкновения атомов гелия с молекулами воздуха.