

Лабораторная работа 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Милославов Глеб, Б04-105

February 9, 2022

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.

1 Теоритическая часть

Плотность диффузионного потока любого компонента (т. е. количество вещества, проходящее в единицу времени через единичную поверхность) определяется законом Фика:

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1)$$

где D — коэффициент взаимной диффузии газов, а j — плотность потока частиц.

В наших условиях решение задачи упрощается благодаря тому, что: а) объем соединительной трубки мал по сравнению с объемами сосудов, б) концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объему. Диффузионный поток в любом сечении трубки одинаков. Поэтому $J = -DS(\partial n / \partial x)$ не меняется вдоль трубки. Следовательно,

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}. \quad (2)$$

Из данных формул и из закона сохранения вещества следует, что:

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

По этому же закону изменяются во времени показания гальванометра (например, в делениях шкалы):

$$N = N_0 e^{-t/\tau}. \quad (4)$$

Величина τ определяется геометрическими размерами установки (l, S, V_1, V_2) и величиной коэффициента диффузии D :

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} \quad (5)$$

Для измерения концентраций в данной установке применяются датчики теплопроводности D_1, D_2 и используется зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. Тонкая проволока радиуса r , протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра радиуса R , нагревается током. Тепло от проволоки к стенке цилиндра переходит главным образом вследствие теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра. Количество тепла, передающееся стенке в единицу времени, выражается по формуле:

$$Q = \chi \frac{2\pi L}{\ln(R - r)} (T_1 - T_2), \quad (6)$$

где χ — теплопроводность, L — длина нити, T_1, T_2 — температуры проволоки и стенки.

2 Экспериментальная часть

Найдём коэффициент взаимной диффузии газов D , зная коэффициент наклона этой прямой. Из формулы (4) следует:

$$\ln(U) = -\frac{1}{\tau}t + \ln(U_0). \quad (7)$$

Подставив выражение (5) получим:

$$D = -k \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{L}{S}, \quad (8)$$

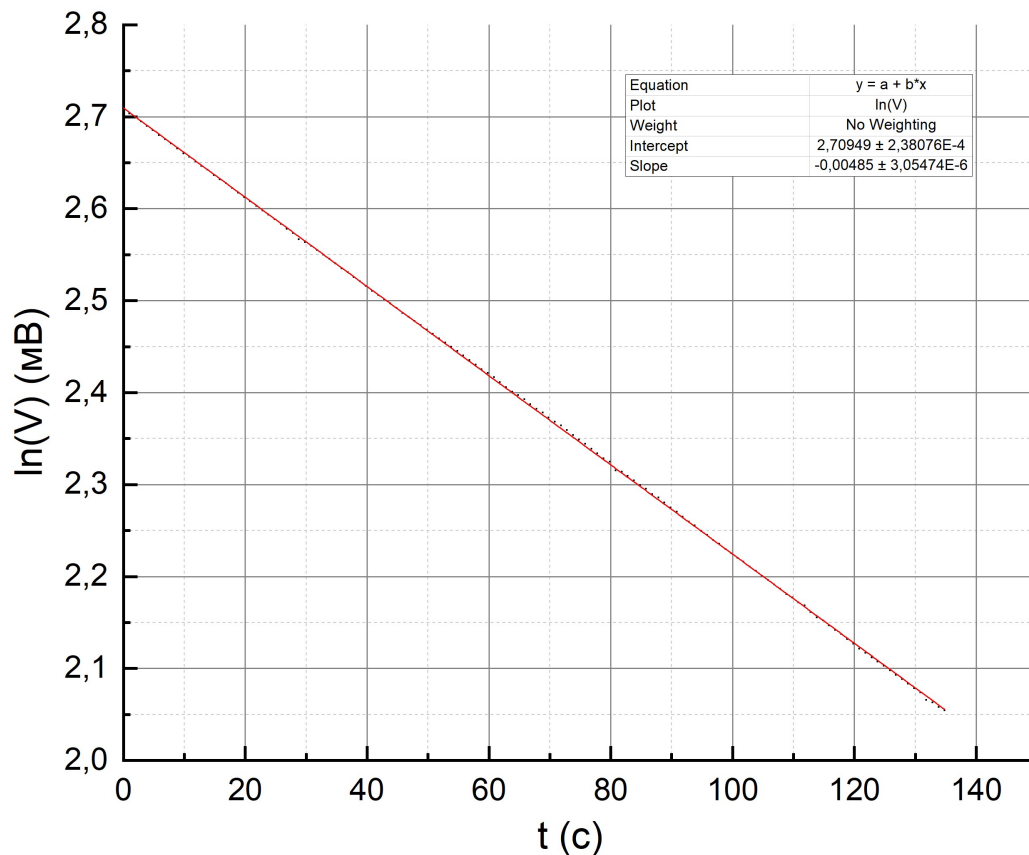
где $k = -\frac{1}{\tau}$ - коэффициент наклона прямой $\ln(U) = kt + \ln(U_0)$
Погрешность D будем считать по формуле:

$$\sigma_D = D \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2}, \quad (9)$$

где $\alpha = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2}$ и $\beta = \frac{L}{S}$.

2.1 Рабочее давление 41,3 торр.

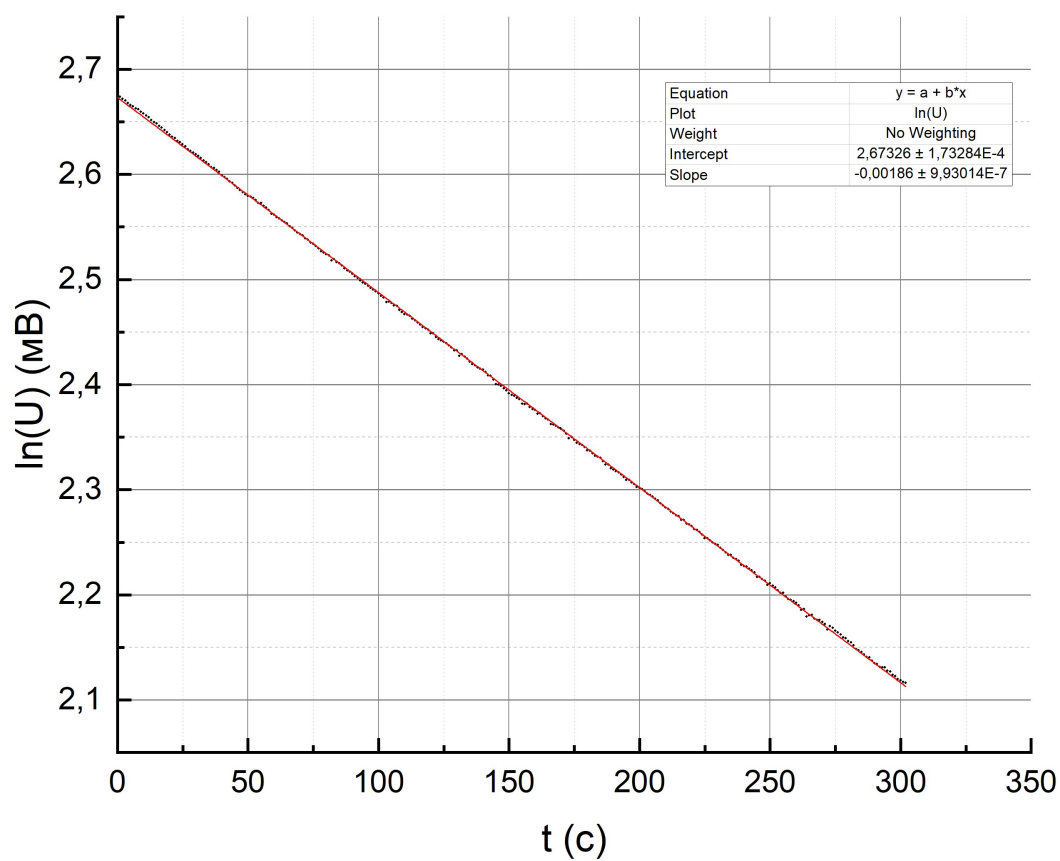
График зависимости логарифма значений напряжений от времени для 41,3 торр имеет вид:



Заметим, что точки и вправду лежат на прямой, коэффициент наклона которой равен $k = -0,004850 \pm 0,000003 \text{ c}^{-1}$. По формулам (8) и (9) получим:

$$D = 9,96 \pm 0,23 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

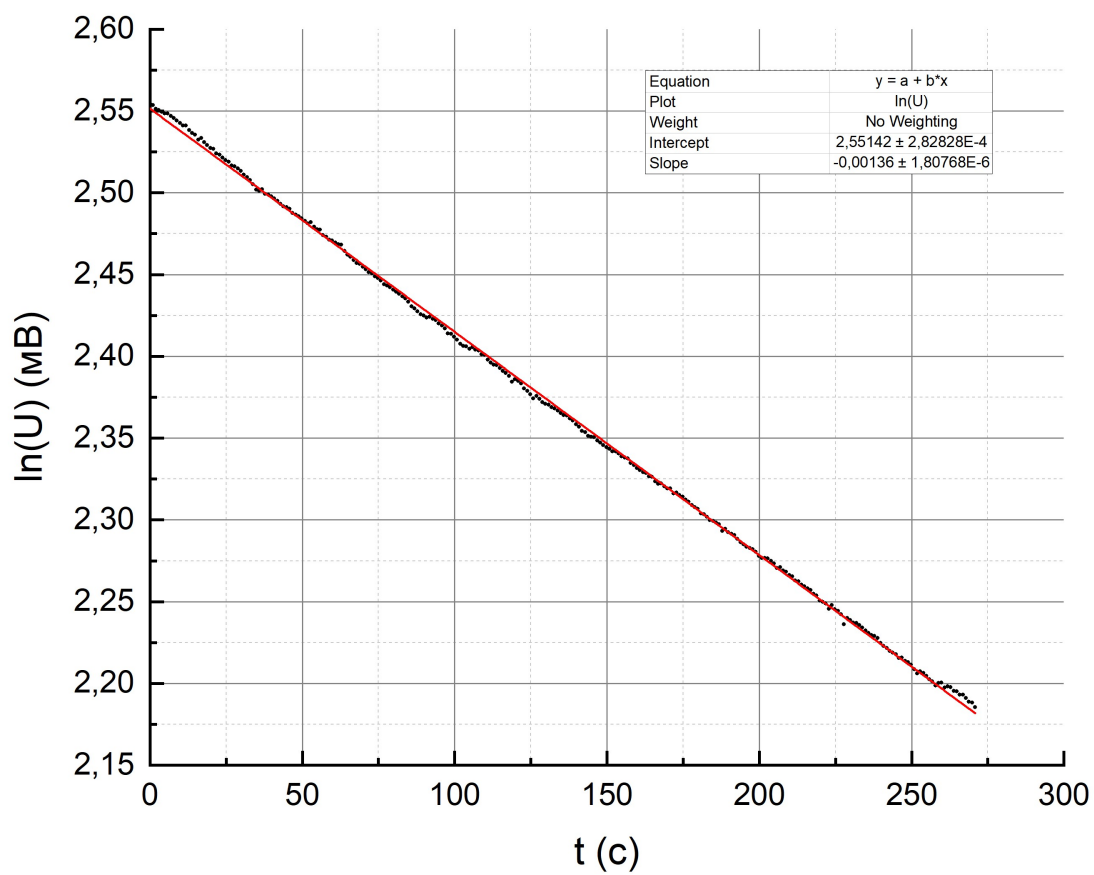
2.2 Рабочее давление 105,1 торр.



$$k = -0,001860 \pm 0,000001 \text{ c}^{-1}$$

$$D = 3,82 \pm 0,09 \frac{\text{cm}^2}{\text{c}}$$

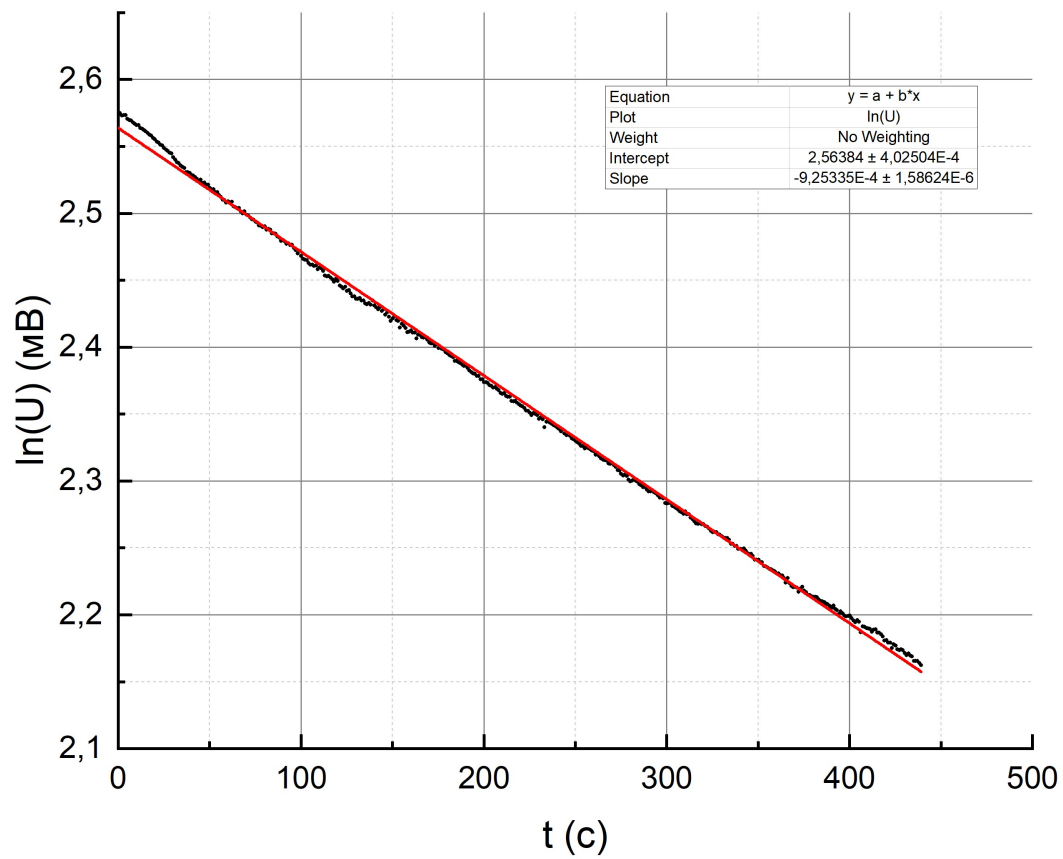
2.3 Рабочее давление 169,0 торр.



$$k = -0,001360 \pm 0,000002 \text{ c}^{-1}$$

$$D = 2,79 \pm 0,06 \frac{\text{cM}^2}{\text{c}}$$

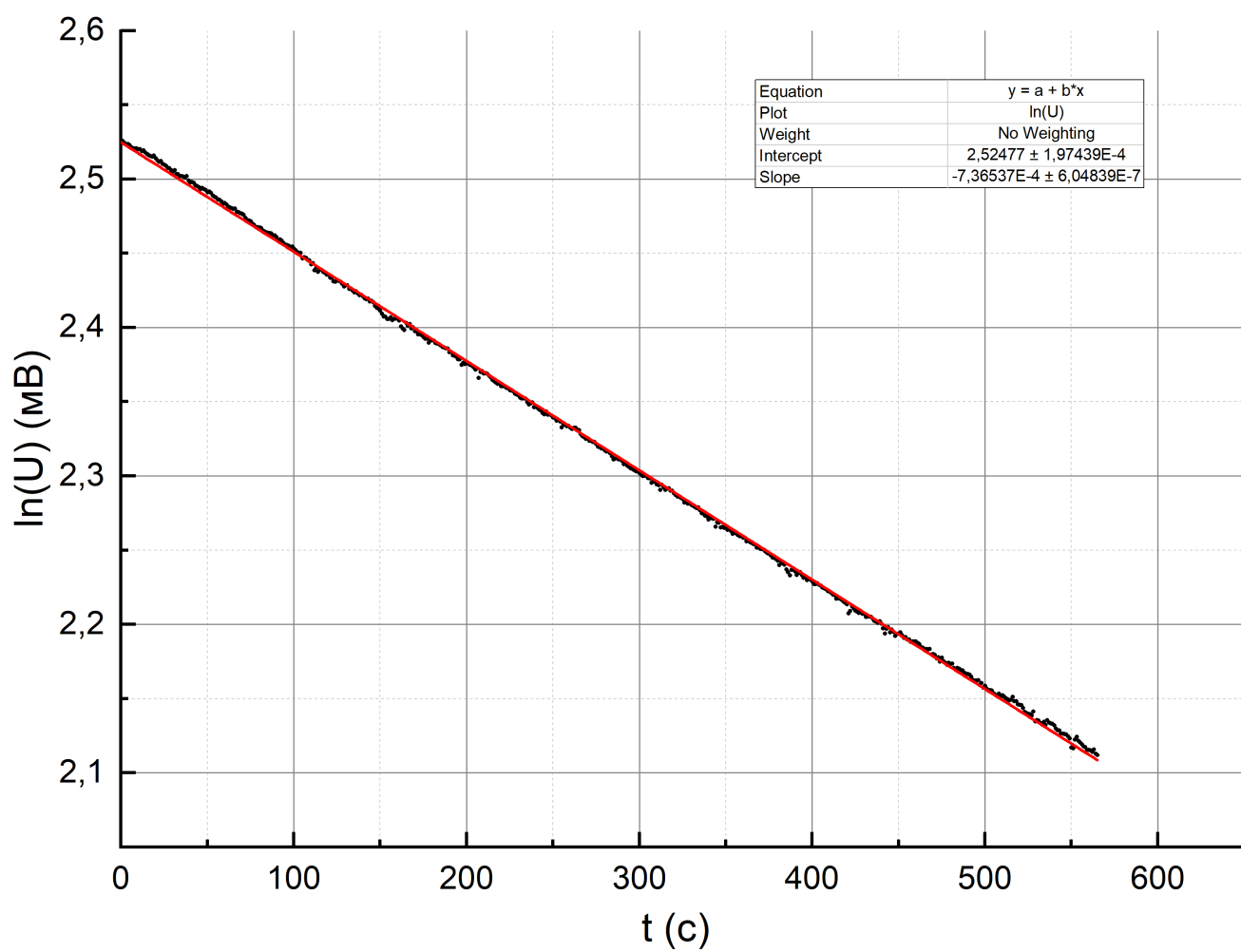
2.4 Рабочее давление 240,3 торр.



$$k = -0,000925 \pm 0,000002 \text{ c}^{-1}$$

$$D = 1,90 \pm 0,04 \frac{\text{сМ}^2}{\text{с}}$$

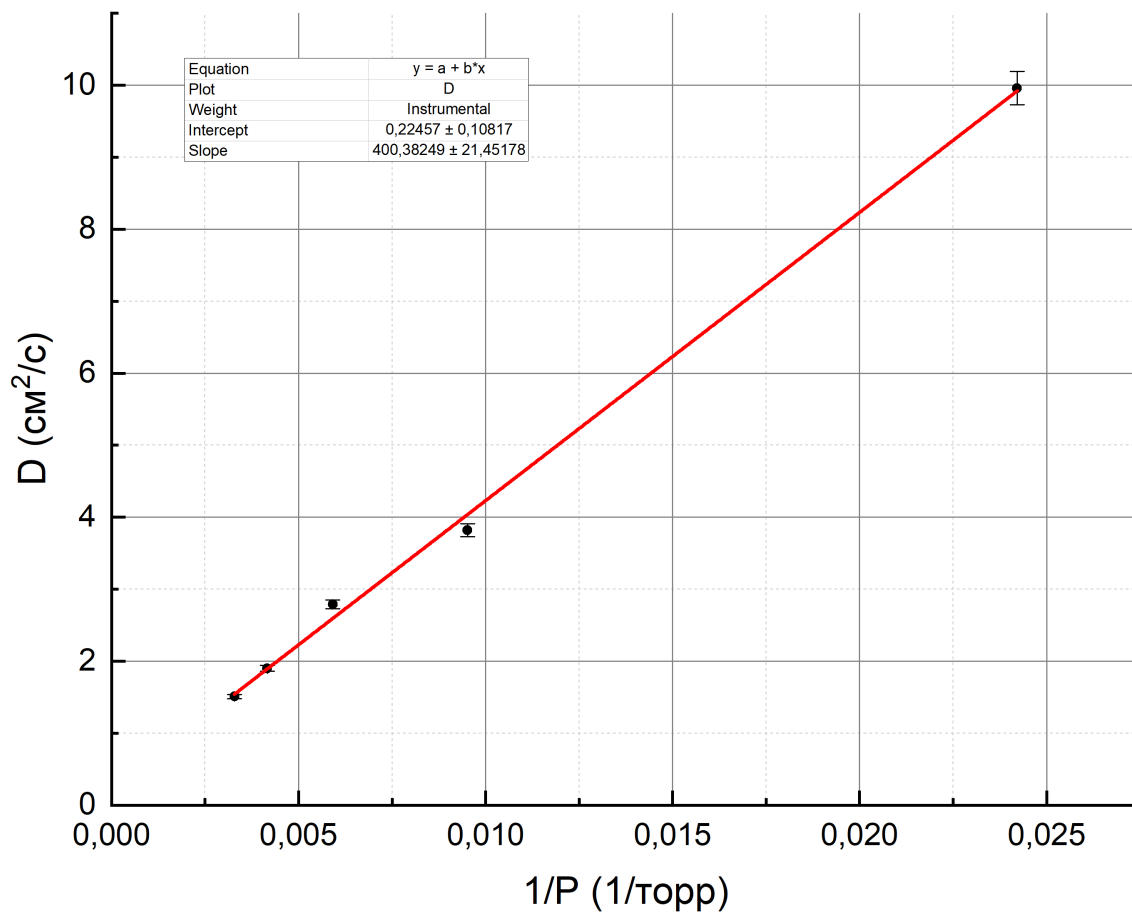
2.5 Рабочее давление 304,1 торр.



$$k = -0,000737 \pm 0,000001 \text{ c}^{-1}$$

$$D = 1,51 \pm 0,03 \frac{\text{cM}^2}{\text{c}}$$

2.6 Зависимость $D(\frac{1}{P})$



Заметим, что точки лежат на прямой в пределах погрешностей. По значениям параметров аппроксимирующей прямой найдём коэффициент взаимной диффузии гелия и воздуха для атмосферного давления:

$$D(P_{atm}) = 0,75 \pm 0,04 \frac{cm^2}{c}$$

2.7 Оценка λ_{He} и $\sigma_{He-возд}$

Приближённо можно считать, что : $D = \frac{1}{3} \lambda v$, где $v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$.

Тогда можно оценить λ_{He} для P_{atm} : $\lambda_{He} = (5,7 \pm 0,3) * 10^{-6} m$

Также из соотношений $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ и $n = \frac{P}{k_B T}$ оценим величину $\sigma_{He-возд}$:

$$\sigma_{He-возд} = (7,1 \pm 0,4) * 10^{-20} m^2$$

3 Вывод

В работе был проведён ряд экспериментов для изучения взаимной диффузии гелия и воздуха. Изучив показания датчиков теплопроводности, получили зависимость концентраций газов от времени, убедились в том, что эта зависимость экспоненциальная (с помощью графиков вида (7)). Также исходя из полученных зависимостей были посчитаны коэффициенты взаимной диффузии D гелия и воздуха для разных давлений, после чего можно убедиться в справедливости зависимости $D \propto \frac{1}{P}$. Экстраполируя её к атмосферному давлению, можно найти D для $P_{атм}$:

$$D(P_{атм}) = 0,75 \pm 0,04 \frac{см^2}{с},$$

а также длину свободного атома гелия в воздухе:

$$\lambda_{He} = (5,7 \pm 0,3) * 10^{-6} м$$

и эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха:

$$\sigma_{He-возд} = (7,1 \pm 0,4) * 10^{-20} м^2$$