

Лабораторная работа № 2.2.1
Исследование взаимной диффузии газов.

Никита Москвитин, Б04-204

2023

1 Аннотация

В данной работе проверялся общеизвестный закон диффузии. Был найден коэффициент диффузии при атмосферном давлении. Также в условиях эксперимента были найдены длина свободного пробега атомов гелия и их эффективное сечение.

2 Введение

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 работе 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 λ – 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, σ – 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 $D \propto \frac{1}{P_{\Sigma}}$.

Предполагая, что процесс диффузии будет квазистационарным, можно показать, что разность концентраций будет убывать по экспоненциальному закону (Δn_0 – начальная разность концентраций):

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где τ – характерное время выравнивания концентраций между сосудах, определяемое следующей формулой:

$$\tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S}. \quad (4)$$

3 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 сосуд. 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.

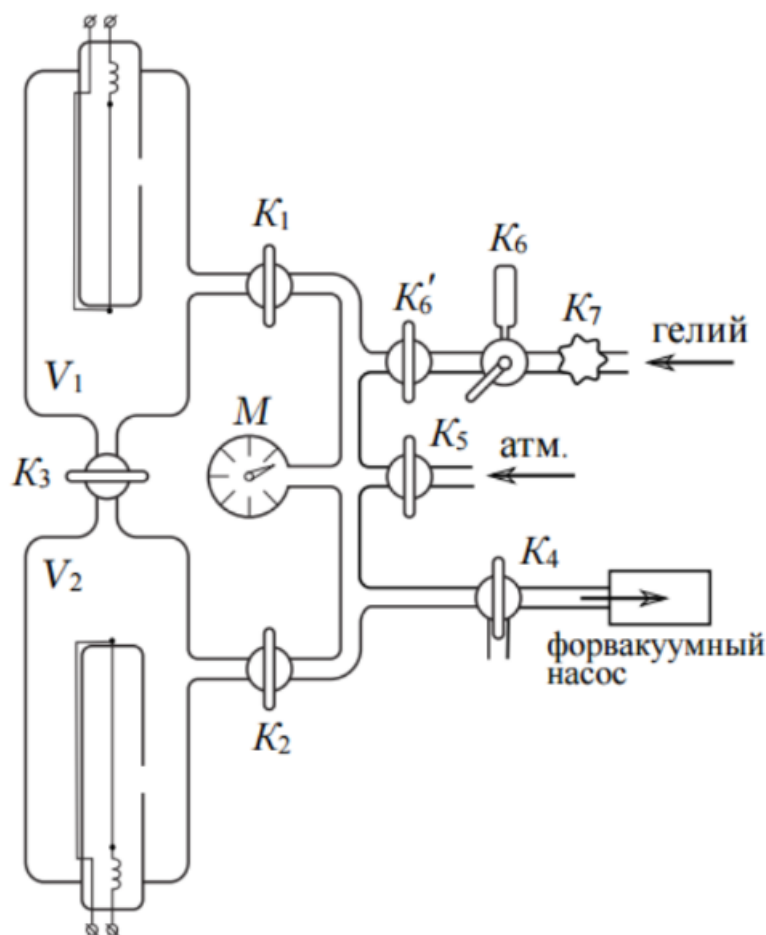


Рис. 1: Схема установки

4 Измерения

Параметры установки: $V = (775 \pm 10)\text{см}^3$, $\frac{L}{S} = (5,3 \pm 0,1)\frac{1}{\text{см}}$, $P_0 = 745$ торр. В таблице приведены значения давлений, при которых производились измерения. Для гелия было произведено одно измерение при давлении P_1 .

Таблица 1: Давления при которых проводились измерения

P_1 , торр	P_2 , торр	P_3 , торр	P_4 , торр	P_5 , торр	P_6 , торр
52,15	67,05	89,4	141,55	219,775	283,1

5 Обработка результатов

Построим для всех измерений графики в логарифмическом масштабе, приведенные на соответствующих рисунках. Причем при таких осях $k = 1/\tau$, тогда $D = k\frac{VL}{2S}$. В Таблице 2 приведены значения коэффициентов наклона графиков и соответствующих коэффициентов диффузии.

Таблица 2: Коэффициенты наклона графиков и диффузии

	P_1 , торр	P_2 , торр	P_3 , торр	P_4 , торр	P_5 , торр	P_6 , торр
$k * 10^4$, 1/с	44	37	30	19	13	9
D , $\text{см}^2/\text{с}$	$9,0 \pm 0,2$	$7,6 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$

С помощью экстраполяции графика коэффициента диффузии, от величины обратной давлению получаем, что коэффициент диффузии при атмосферном давлении будет равен $D_{P_0} = 1,2 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, табличное значение $D_{\text{table}} = 0,84 \text{ см}^2/\text{с}$ (источник: <https://www.bog5.in.ua>). Также посчитаем, коэффициент диффузии для обратного эксперимента $D_{\text{возд}} = 9,4 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, что как мы видим не сильно отличается от $D_{\text{He}} = 9,0 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, что логично, так как вывод наш учитывал, что имеет значение давление, а оно в обоих экспериментах примерно одинаковое. Оценим длину свободного пробега для первого эксперимента $\lambda = 10^{-5}$ м, а эффективная площадь $\sigma = 7 * 10^{-20} \text{ м}^2$.

6 Вывод

Как мы видим, наша теоретическая зависимость совпала с реальностью. Коэффициент диффузии при атмосферном давлении будет равен $D_{P_0} = 1,2 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, табличное значение $D_{\text{table}} = 0,84 \text{ см}^2/\text{с}$ (источник: <https://www.bog5.in.ua>). Коэффициент диффузии для обратного эксперимента $D_{\text{возд}} = 9,4 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, что как мы видим не сильно отличается от $D_{\text{He}} = 9,0 \pm 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$, что логично, так как вывод наш учитывал, что имеет значение давление, а оно в обоих экспериментах примерно одинаковое. Длина свободного пробега для первого эксперимента $\lambda = 10^{-5}$ м, а эффективная площадь $\sigma = 7 * 10^{-20} \text{ м}^2$.

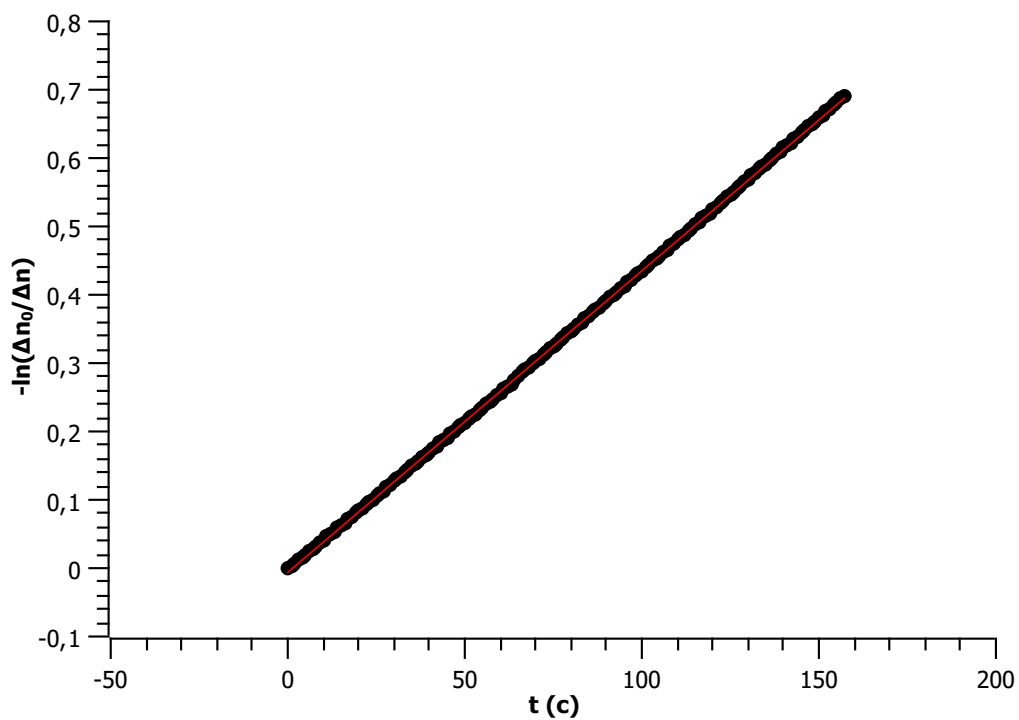


Рис. 2: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_1

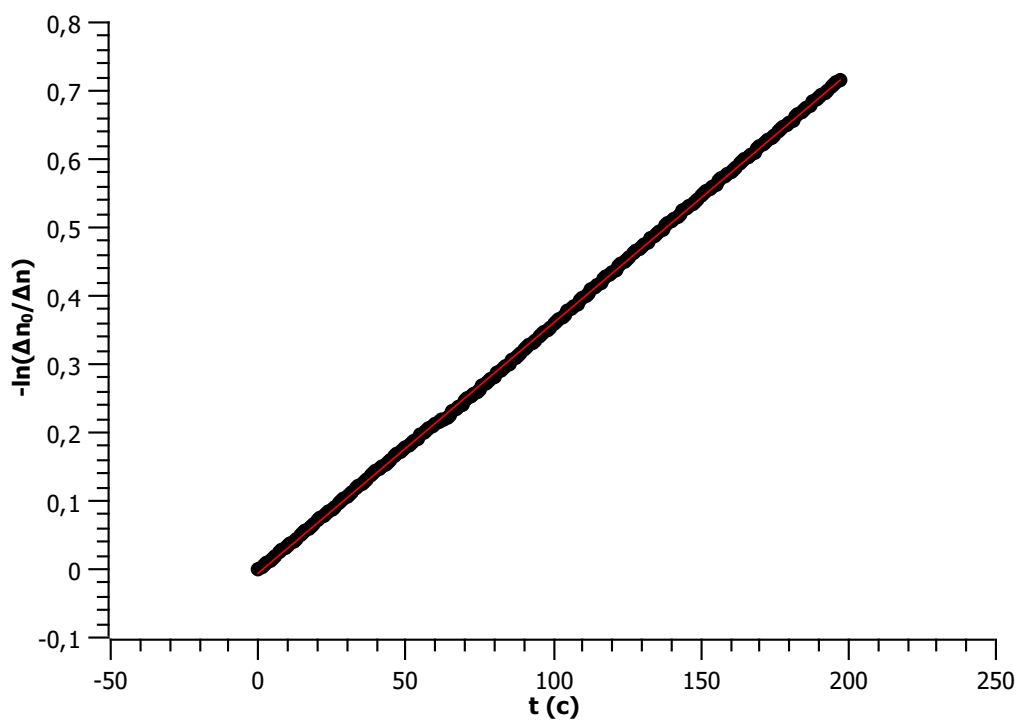


Рис. 3: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_2

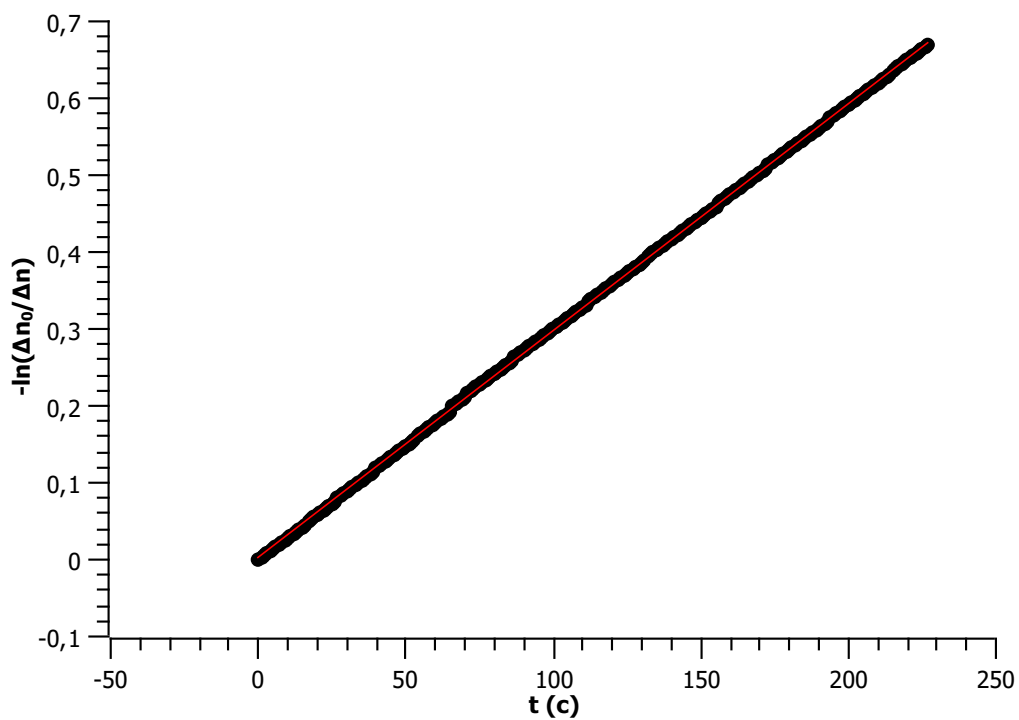


Рис. 4: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_3

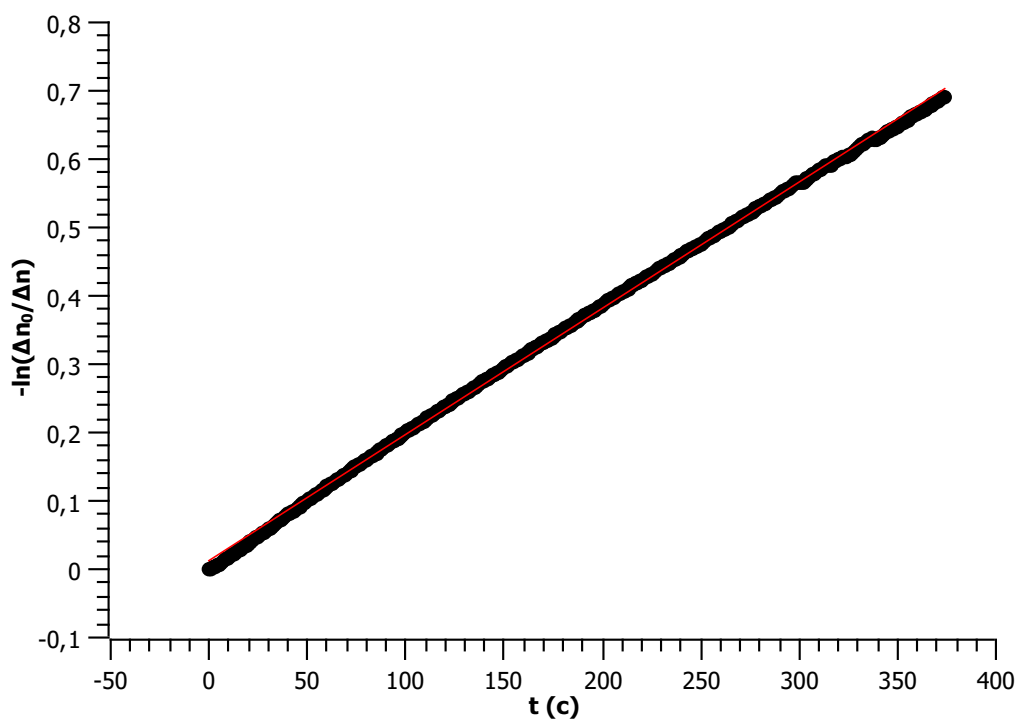


Рис. 5: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_4

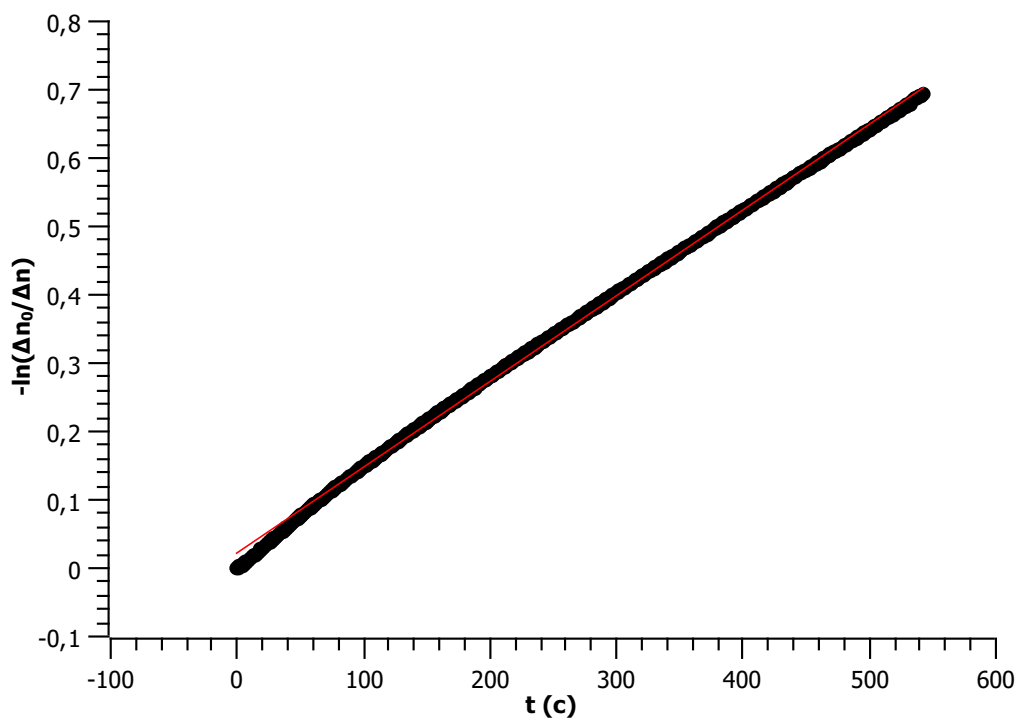


Рис. 6: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_5

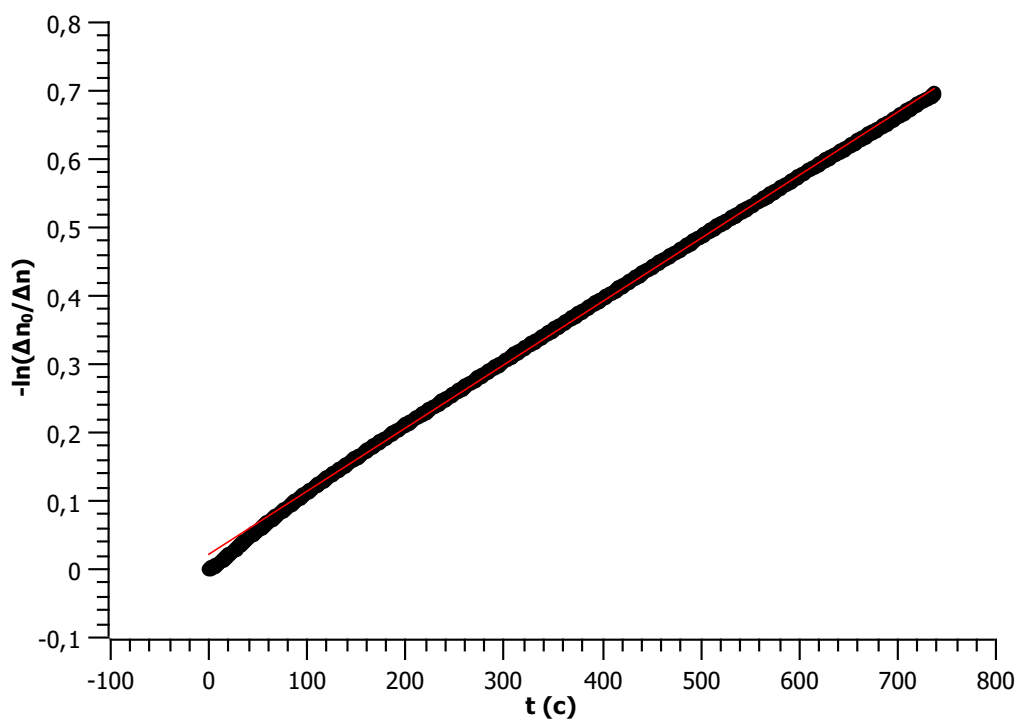


Рис. 7: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для P_6

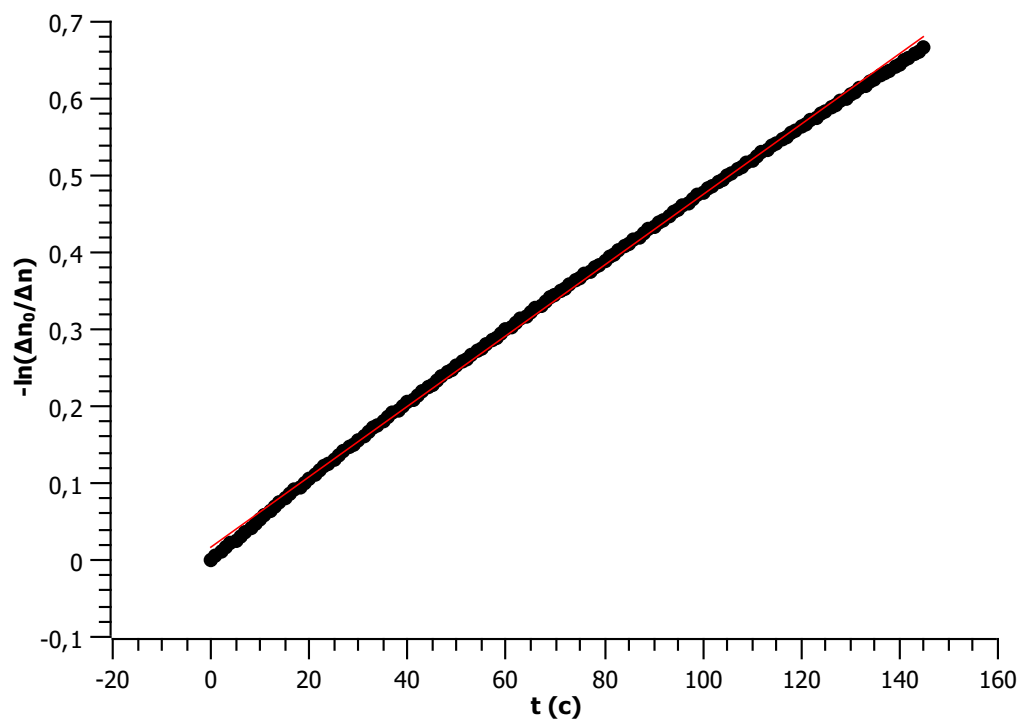


Рис. 8: График относительной разницы концентраций от времени в логарифмическом масштабе для He

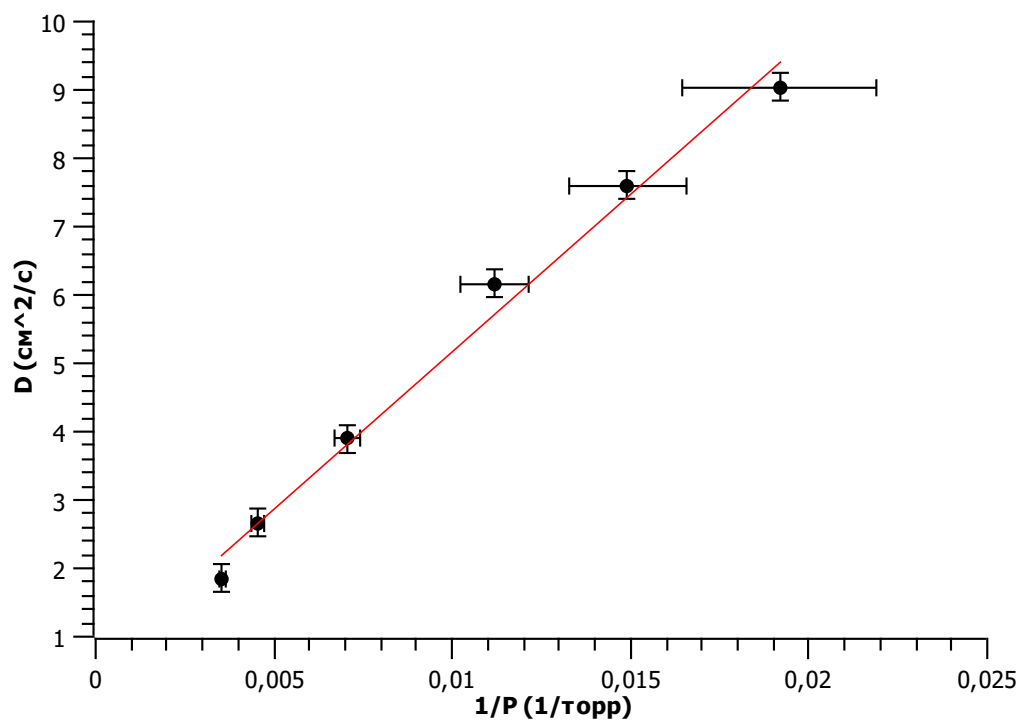


Рис. 9: График коэффициента диффузии, от величины обратной давлению.