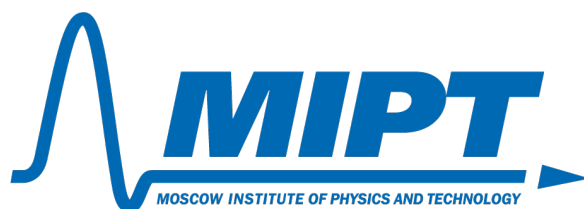


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ



Отчёт о выполнении лабораторной работы № 2.2.1  
**Исследование взаимной диффузии газов**

Полякова Полина Николаевна  
Группа Б02-202

Долгопрудный, 2023 г.

# Содержание

1. Введение
2. Методика измерений
3. Результаты и их обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы
6. Приложение А
7. Приложение Б
8. Приложение В

## Аннотация

Экспериментально проверено подчинение процесса диффузии закону (2); рассчитаны коэффициенты взаимной диффузии при выбранных рабочих давлениях, в том числе при атмосферном давлении; получена оценка для длины свободного пробега атомов гелия в воздухе в условиях эксперимента, а также для эффективного сечения столкновений атомов гелия с молекулами воздуха.

В ходе работы получены значения  $D_{\text{атм}} = (0,54 \pm 0,03) \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_{\text{He}} = (130 \pm 5) \text{ нм}$ ,  $\sigma_{\text{He}} = (3,2 \pm 0,15) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ , которые согласуются со значениями в справочниках [2] и [3].

# 1 Введение

Получение материалов с заданным уровнем эксплуатационных свойств реализуется за счет выбора определенного химического состава сплава и целенаправленных внешних воздействий на него, чаще всего теплового характера. Изменяя параметры термообработки, такие как температура, время выдержки, скорости нагрева и охлаждения, можно заранее формировать структуру и фазовый состав сплавов с целью получения требуемого комплекса свойств. Возможность прогнозировать перераспределение химических элементов в материале при термических и химических воздействиях на него заложено в решении основного уравнения феноменологической теории диффузии — втором законе Фика, получение которого невозможно без точного знания коэффициентов диффузии, характеризующих интенсивность перераспределения элементов в системе.

Найти коэффициенты взаимной диффузии при различных давлениях позволяет метод, основанный на исследовании зависимости разностей концентраций примеси в сосудах от времени при помощи датчиков теплопроводности.

## 2 Методика измерений

В работе нахождение коэффициентов взаимной диффузии осуществлялось по формуле, представленной в источнике [1]:

$$\tau = \frac{1}{D} \cdot \frac{VL}{2S}, \quad (1)$$

где  $\tau$  - характерное время выравнивания,  $V$  - объем сосудов ( $V_1 = V_2 = V$ ),  $S$  - площадь сечения трубки,  $L$  - длина соединительной трубки.

При этом характерное время выравнивания определялось на основе закона изменения разностей концентраций примеси в сосудах с течением времени, выражаемый формулой из источника [1]:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $\Delta n$  - разность концентраций примеси в сосудах в начальный момент времени.

Знание величины коэффициента взаимной диффузии позволило найти длину свободного пробега частиц примеси, основываясь на формулах из источника [1]:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle u \rangle \quad \sigma = \frac{1}{n_0 \lambda},$$

при подставлении выражения для средней тепловой скорости частиц примеси:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

были получены расчетные формулы для длины свободного пробега и эффективного сечения столкновения атомов гелия с частицами воздуха:

$$\lambda = 3D \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} \quad \sigma = \frac{kT}{\lambda P}, \quad (3), (4)$$

Для измерения разности концентраций в установке применялись датчики теплопроводности. При этом использовался тот факт, что при малой разности концентраций в сосудах разность теплопроводностей изменяется прямо пропорционально этой

разности. Сами датчики теплопроводности устроены так, что при заданной мощности нагревания приращение температуры проволоочки и, следовательно, приращение её сопротивления пропорциональны теплопроводности газа.

Для измерения сопротивлений использовалась мостовая схема, приведенная на рисунке 1:

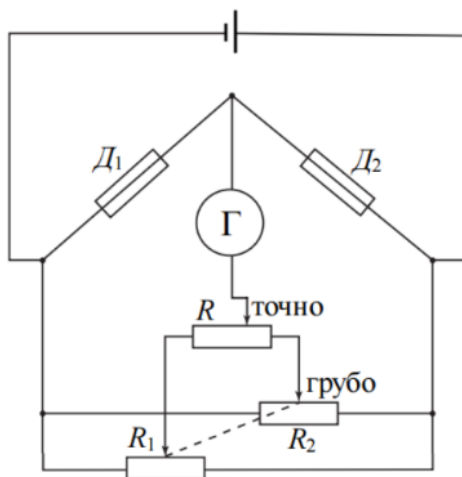


Рис. 1: мостовая схема

При незначительном различии в составах смесей показания вольтметра, подсоединённого к диагонали моста, были пропорциональны разности концентраций примеси, поэтому в процессе диффузии напряжение изменялось по тому же закону, что и разность концентраций. Таким образом, исследование зависимости напряжения от времени позволило найти характерное время выравнивания.

Для проведения измерений использовалась установка, изображенная на рисунке 2:

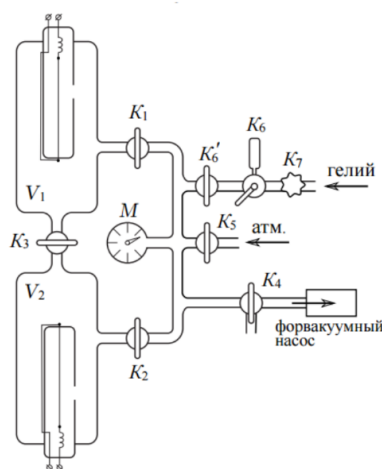


Рис. 2: схема установки

Установка состоит из двух сосудов  $V_1$  и  $V_2$ , соединённых краном  $K_3$ , форвакуумного насоса, манометра  $M$  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. Их можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом при помощи кранов  $K_1, K_2, K_4, K_5$ . Манометр  $M$  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.

### 3 Результаты и их обсуждение

Внешние условия проведения эксперимента и погрешности приборов зафиксированы в приложении А. В ходе работы они использовались при расчетах и сопоставлениях экспериментальных результатов с теоретическими данными.

Экспериментальная работа состояла из трех основных пунктов: исследование зависимости напряжения от времени, коэффициента диффузии гелия в воздухе от обратного давления и нахождение длины свободного пробега атомов гелия в воздухе и эффективного сечения столкновений атомов гелия с молекулами воздуха.

#### Пункт 1

Сначала была снята зависимость объемного напряжения на мостовой схеме от времени для 6 различных рабочих давлений. Результаты измерений представлены в виде таблицы в приложении Б.

На основе полученных данных были построены графики исследуемой зависимости в логарифмическом масштабе по оси ординат (рисунок 3).

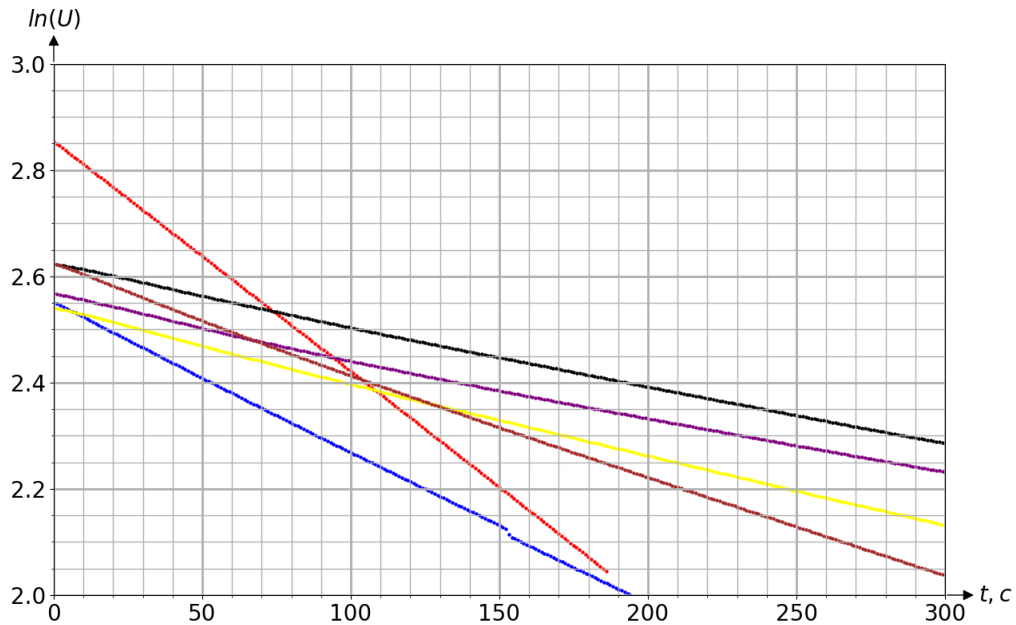


Рис. 3: Зависимость логарифма напряжения от времени. На графике 1) красным отмечаны точки при давлении в 41,8 торр; 2) синим - 76 торр; 3) желтым - 117,8 торр; 4) чёрным - 159,6 торр; 5) фиолетовым - 201,4 торр; 6) коричневым - 239,4 торр

По угловым коэффициентам графиков и известным геометрическим параметрам установки были рассчитаны коэффициенты взаимной диффузии при выбранных рабочих давлениях:

$$k_1 = (-4,35 \pm 0,003) \cdot 10^{-3} 1/c \quad k_2 = (-2,82 \pm 0,0015) \cdot 10^{-3} 1/c \quad k_3 = (-1,33 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} 1/c$$

$$k_4 = (-1,08 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} 1/c \quad k_5 = (-1,04 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} 1/c \quad k_6 = (-1,93 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} 1/c$$

$$D_1 = (8,9 \pm 0,4) \text{см}^2/c \quad D_2 = (5,79 \pm 0,29) \text{см}^2/c \quad D_3 = (2,72 \pm 0,14) \text{см}^2/c$$

$$D_4 = (2,22 \pm 0,11) \text{см}^2/c \quad D_5 = (2,14 \pm 0,11) \text{см}^2/c \quad D_6 = (3,95 \pm 0,19) \text{см}^2/c$$

Как видим, рассмотренная зависимость является прямой, таким образом было подтверждено, что процесс диффузии подчиняется закону (2).

## Пункт 2

Во втором пункте была снята зависимость коэффициентов взаимной диффузии от обратного давления.

График данной зависимости приведен на рисунке 4:

Методом МНК был найден вид зависимости:

$$D = 50,674 \cdot \frac{1}{P} \cdot 1000 + 0,0412$$

При помощи экстраполяции графика к атмосферному давлению был найден соответствующий коэффициент диффузии гелия в воздухе при атмосферном давлении:

$$D = (0,54 \pm 0,03) \text{см}^2/c$$

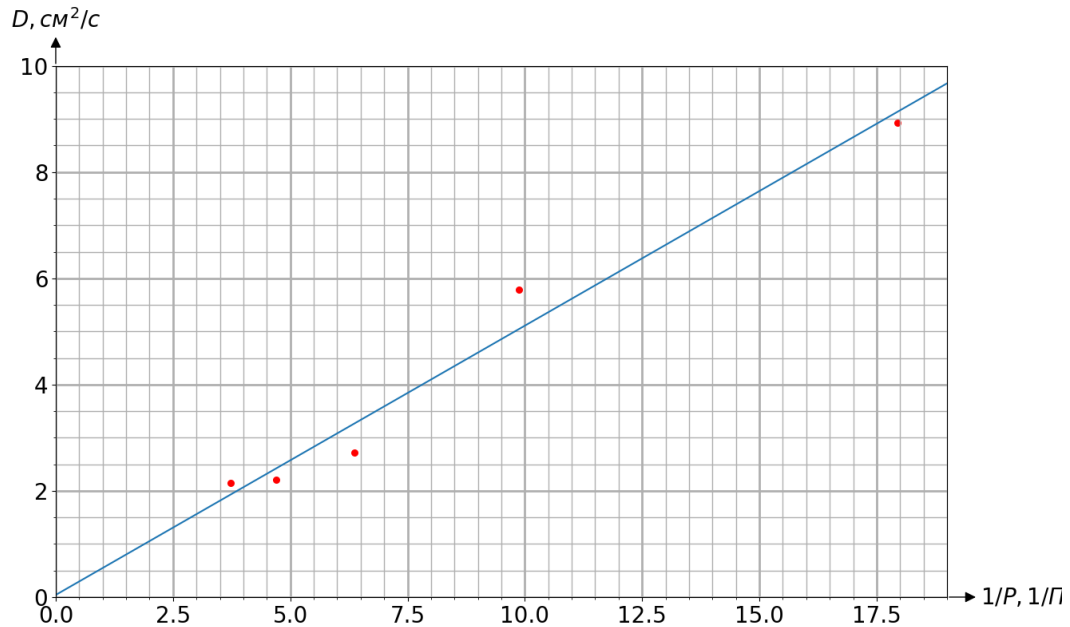


Рис. 4: График зависимости коэффициента диффузии от обратного давления

При этом табличное значение, взятое из источника [3] равно:

$$D = 0,62\text{см}^2/\text{с}$$

Таким образом, определенное экспериментально значение с точностью 12,9 % совпадает с теоритическим.

### Пункт 3

Используя полученное значение для коэффициента диффузии гелия в воздухе при атмосферном давлении, были при помощи формул (3) и (4) найдены:

Длина свободного пробега:

$$\lambda = (130 \pm 5)\text{нм}$$

При этом теоритическое значение, взятое из источника [2], равняется:

$$\lambda = 180\text{нм}$$

Таким образом, найденное значение с точностью в 28 % соответствует действительному.

Эффективное сечение столкновения атомов гелия с частицами воздуха:

$$\sigma = (3,2 \pm 0,15) * 10^{-19}\text{м}^2$$

Расчет погрешностей параметров графиков из первых двух пунктов производился при помощи МНК, а погрешности нахождения коэффициентов взаимной диффузии, длины свободного пробега и эффективного сечения были определены как погрешности косвенных измерений. Расчетные формулы приведены в приложении В.



## 4 Выводы

В ходе работы был получен коэффициент диффузии гелия в воздухе при атмосферном давлении, с точностью в 12,9 % удовлетворяющий табличному значению. Также в ходе работы были получены длина свободного пробега и эффективное сечение столкновения атомов гелия с частицами воздуха. В 1 пункте работы была подтверждена справедливость закона изменения концентрации примеси со временем, описываемого формулой (2), т.к. полученная экспериментально зависимость являлась линейной.

## Список литературы

- [1] Д. Гладун А., А. Александров Д., Игошин Ф. Ф. и др. Лабораторный практикум по общей физике: Т. 1. Термодинамика и молекулярная физика. М.: МФТИ, 2012. 292 с.
- [2] Определение длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха путем измерения коэффициента внутреннего трения: метод, указания к лабораторной работе 1-30 / Сост. Н.М.Рогачев, Г.А. Потапова. - Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2012. - 16 с.
- [3] Математика диффузии : учебное пособие/ И. Н. Бекман. - М. : Издательство "ОнтоПринт 2016. - 400 с.

## 6 Приложение А

В таблице приведены внешние условия проведения эксперимента

P, торр	T, К	$\mu$ , г/моль	V, см <sup>3</sup>	L/S, 1/см
747	297	4	775±10	5,3±0,1

## 7 Приложение Б

В таблице приведены промежуточные данные, используемые в ходе эксперимента

k	D, см <sup>2</sup> /с	P, торр	P, Па	1/P, 1/Па
-0,0043476	8,93	41,8	5571,94	0,1795
-0,002819	5,79	76	10130,8	0,0987
-0,0013255	2,72	117,8	15702,74	0,0637
-0,0010792	2,22	159,6	21274,68	0,0470
-0,0010429	2,14	201,4	26846,62	0,0372
-0,0019256	3,95	239,4	31912,02	0,0313

## 8 Приложение В

Расчет погрешностей:

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial k} \Delta k\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial(L/S)} \Delta(L/S)\right)^2}$$

Так как точность измерения внешней температуры и точность табличного значения молярной массы гораздо больше точности нахождения коэффициента взаимной диффузии, то можем вычислить погрешность определения длины свободного пробега как погрешность функции, зависящей только от коэффициента взаимной диффузии

$$\Delta \lambda = \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D$$

Данные рассуждения работают и для нахождения погрешности определения эффективного сечения, только теперь это еще и функция от длины свободного пробега:

$$\Delta \sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial D} \Delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2}$$