



**Санкт-Петербургский национальный
исследовательский Академический
университет имени Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук**

Рабочий протокол и отчёт по лабораторной работе № 3
Свиридов Фёдор, Александр Слободнюк, Владимир Попов

**«Определение средней длины свободного пробега и
эффективного диаметра молекул воздуха»**

Цель работы. Определить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха; определить эффективный диаметр молекул воздуха.

Задачи, решаемые при выполнении работы.

1. Узнать температуру и атмосферное давление в помещении
2. Измерить нужное для расчётов время, за которое в мензурку поступает 100мл воды
3. Измерить высоту жидкости в колбе до и после вытеснения воды воздухом
4. По рабочей формуле рассчитать среднюю длину пробега молекул воздуха
5. Рассчитать эффективный диаметр молекул
6. Сделать выводы

Объект исследования. Связь макроскопических и микроскопических параметров в рамках данной модели

Метод экспериментального исследования. Измерение скорости вытеснения воды из колбы воздухом

Рабочие формулы и исходные данные.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\pi r^4}{16lP} \frac{\Delta P \tau}{V} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}} \quad (1)$$

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi \langle \lambda \rangle P}} \quad (2)$$

$$\Delta P = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 + h_2} + \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

Результаты прямых измерений и их обработки.

- $T = 288 \text{ K}$
- $P = 766 \text{ мм рт. ст.}$

$h_1, \text{ см}$	$h_2, \text{ см}$	$V, \text{ мл}$	$\tau, \text{ с}$
6,7	5,4	100	115
6,7	5,4	100	112
6,7	5,4	100	115

Расчет результатов косвенных измерений.

- По формуле (3) находим разность давлений:

$$\Delta P = 1000 \cdot 9,8 \cdot \frac{6,7 \cdot 10^{-2} - 5,4 \cdot 10^{-2}}{2} = 592,9 \text{ (Па)}$$

- Среднее время $\langle \tau \rangle$:

$$\langle \tau \rangle = \frac{115 + 112 + 115}{3} = 114 \text{ (с)}$$

- Средняя длина $\langle \lambda \rangle$ свободного пробега молекул воздуха (1):

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^4}{16 \cdot 0,4 \cdot 766 \cdot 133,3} \cdot \sqrt{\frac{3,14 \cdot 8,31 \cdot 301}{2 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}} \cdot \frac{592,9 \cdot 114}{100 \cdot 10^{-6}} \approx 2,24 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$$

- Эффективный диаметр молекул (2):

$$d = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 301}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 2,24 \cdot 10^{-7} \cdot 766 \cdot 133,3}} \approx 2,02 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}$$

Погрешность измерений.

- $\Delta\rho = 5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- $\Delta g = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
- $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,1 \text{ см}$
- $\Delta\tau = 1 \text{ с}$
- $\Delta V = 5 \text{ мл}$

Пользуясь формулой (4), находим относительную погрешность ε :

$$\varepsilon = \frac{5}{1000} + \frac{0,1}{9,8} + \frac{0,1 \cdot 10^{-2} + 0,1 \cdot 10^{-2}}{6,7 \cdot 10^{-2} + 5,4 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{114} + \frac{5 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} \approx 0,0905$$

Абсолютная погрешность средней длины $\langle \lambda \rangle$ свободного пробега:

$$\Delta\lambda = \varepsilon\lambda = 0,0905 \cdot 2,24 \cdot 10^{-7} = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ (м)}$$

Погрешность диаметра оценим по формуле:

$$\Delta d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi P}} \lambda^{-\frac{3}{2}} \Delta\lambda$$
$$\Delta d = 9 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Окончательные результаты.

- Средняя длина $\langle \lambda \rangle$ свободного пробега молекул воздуха:

$$\langle \lambda \rangle = (2,24 \pm 0,20) \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

- Эффективный диаметр d молекул:

$$d = (2,02 \pm 0,09) \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Выводы и анализ результатов. Мы косвенно измерили среднюю длину свободного пробега молекул воздуха и их эффективный диаметр. Полученные результаты по порядку величин хорошо согласуются с ожидаемыми. Например, в приложении учебника Иродова И. Е. [1] указано, что диаметр молекул воздуха равен $3,5 \cdot 10^{-10}$ (м). Стоит отметить, что данный способ определения диаметра и свободного пробега служит только для оценки, так как он основывается на модели идеального газа и на сферической симметрии молекул.

Список литературы

- [1] Иродов И. Е. Физика макросистем. Основные законы. 2015. 210 с.