212. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ ГАЗА

Введение

С точки зрения молекулярно- кинетической теории газ представляет собой совокупность отдельных микрочастиц (молекул, атомов, ионов). Для простоты можно считать их абсолютно твердыми шариками. Наблюдение броуновского движения частиц позволяет предположить, что молекулы находятся в непрерывном движении. Большая сжимаемость газов говорит о том, что молекулы газа находятся на большом расстоянии друг от друга. К кинематическим параметрам газа относятся: средняя длина свободного пробега молекул $\langle\lambda\rangle$ (расстояние, которое пролетает молекула между двумя столкновениями), среднее эффективное сечение столкновения $\langle\sigma\rangle = 0.25\pi\langle D\rangle^2$, где D – максимальное расстояние между центрами сталкивающихся молекул, при котором происходит изменении их скорости: эффективный диаметр молекулы). Средняя частота столкновений будет пропорциональна сечению столкновений. Если концентрация молекул равна n, а средняя скорость теплового движения молекул ⟨u⟩, то средняя частота столкновений ⟨z⟩ равна:

$$\langle z\rangle = \sqrt{2}\langle\sigma\rangle n\langle u\rangle .$$

В этой формуле учтено, что средняя относительная скорость движения молекул в $\sqrt{2}$ больше средней скорости их движения $\langle u\rangle$.

Среднюю длину свободного пробега $\langle\lambda\rangle$ можно получить, поделив средний путь, проходимый молекулой за единицу времени, на число столкновений за это же время. Так как путь, проходимый в единицу времени, численно равен скорости, то длина свободного пробега $\langle\lambda\rangle$ равна:

$$\langle\lambda\rangle = \frac{\langle u\rangle}{\langle z\rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\langle\sigma\rangle n} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi\langle D\rangle^2 n}.$$

На основании представлений молекулярно-кинетической теории газов, в случае справедливости распределения Максвелла по скоростям можно найти связь между динамической вязкостью η и этими параметрами: $\eta = \frac{1}{3}\rho\langle\lambda\rangle\langle u\rangle$, где ρ – плотность газа. В состоянии равновесия, когда справедливо распределение Максвелла по скоростям, средняя скорость равна:

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

где R – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса газа.

Таким образом, выражение для средней длины свободного пробега через макропараметры равно:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho\langle u \rangle} = \frac{3\eta\sqrt{\pi\mu}}{\rho\sqrt{8RT}}.$$

Т.е., измерив температуру, коэффициент вязкости и зная молярную массу газа, можно вычислить длину свободного пробега, и далее, по формуле оценить среде сечение столкновения, учитывая, что $n = \frac{p}{kT}$.

Цель работы

- ✓ Определение кинематических характеристик различных газов: длины свободного пробега, эффективного сечения столкновений

Решаемые задачи

- ✓ Определение вязкости гелия, углекислого газа и воздуха

Техника безопасности

- ✓ **Внимание: в работе используется стекло.**
- ✓ **Будьте предельно аккуратны при работе с газовым шприцом.**

Экспериментальная установка

<u>Приборы и принадлежности</u>

- ✓ V-образное основание штатива, 28 см
- ✓ Штативный стержень, 75 см
- ✓ S образный зажим
- ✓ Штангенциркуль
- ✓ Безопасная емкость для вакуумирования 500 мл
- ✓ Хомуты для резиновых трубок 12-20 мм (10 шт.)
- ✓ Каучуковая трубка Ø 4 мм
- ✓ Вакуумный шланг
- ✓ Штуцер прямой полипропиленовый PP, Ø 4÷15 мм
- ✓ Газовый шприц 100 мл, с 3-ходовым краном
- ✓ Держатель газового шприца
- ✓ Универсальный зажим, 0-80 мм
- ✓ Цифровой секундомер

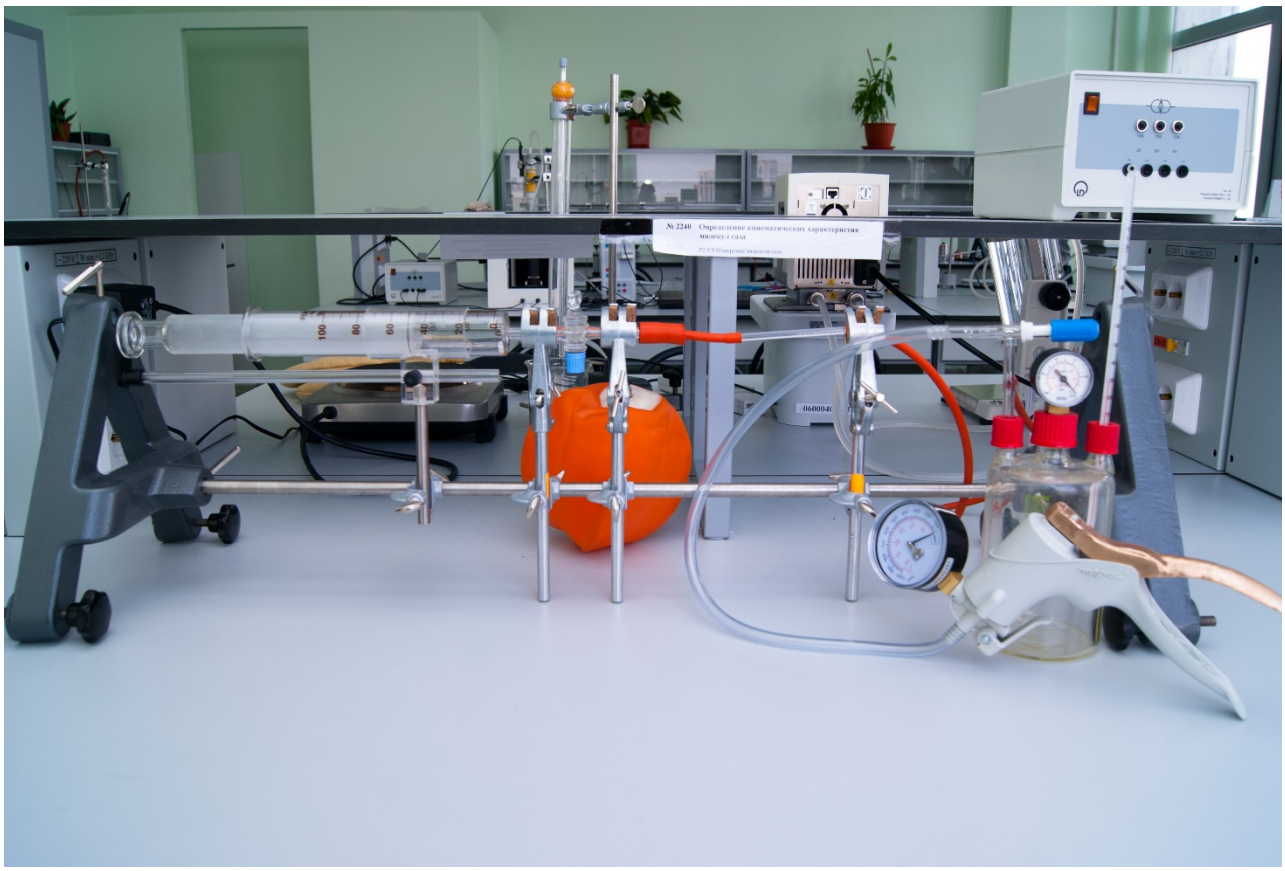

Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Упражнение №1

1. Изучите кран: в каком положении он открыт, а в каком закрыт.
2. Установите кран в таком положении, чтобы газовый шприц и атмосфера были соединены, а вакуумированная емкость изолирована.
3. Установите поршень на газовый шприце на $V = 50ml = 50 \cdot 10^{-6} м^3$.
4. Откачайте ручным насосом газ из вакуумированной ёмкости. По показаниям манометра определите изменения давления Δp (примерно 500mbar=50000Па; измерения проводятся по черной шкале).
5. Откройте вентиль и определите время t, за которое газ пройдет из газового шприца в вкуумированную емкость через капилляр.
6. Если длина капилляра l не указана, измерьте её с помощью штангенциркуля.
7. Если радиус капилляра R не указан, вычислите его, используя формулу объема цилиндра $V' = \pi R^2 l$. $R = \sqrt{\frac{V'}{\pi l}}$. Объем внутренней полости указан на капилляре.

   Примечание: $1мл = 10^{-3} л$; $1л = 10^3 см^3$; $1м^3 = 100^3 см^3$.

8. По формуле $\eta = \dfrac{\pi \cdot \Delta p \cdot t \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot V}$ вычислите вязкость газа.
9. Опыт повторите не менее пяти раз. Результаты занесите в таблицу.
10. Оцените относительную погрешность измерения вязкости газа.
11. Сравните полученное значение вязкости воздуха при комнатной температуре с табличным значением ($\eta = 1{,}8 \cdot 10^{-5}\, Па \cdot с$ при 18ºС).
12. Вычислите плотность воздуха по формуле $\rho = pM / RT$, где $M = 0{,}029 кг / моль$ – молярная масса воздуха, R – универсальная газовая постоянная, давление p и температуру T измерьте по приборам в лаборатории.
13. Вычислите среднюю арифметическую скорость $\langle u \rangle$ молекул воздуха при данных условиях.
14. Вычислите среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул воздуха при нормальных условиях, исходя из формулы связи ее с коэффициентом вязкости $\eta = \dfrac{\langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho}{3}$.
15. Исходя из формулы $p = nkT$, вычислите концентрацию n молекул воздуха в емкости для вакуумирования (k – постоянная Больцмана – равна $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
16. Вычислить среднее число столкновений молекул, испытываемых одной молекулой за одну секунду $\langle z \rangle = \dfrac{\langle u \rangle}{\langle \lambda \rangle}$.
17. Вычислить среднее эффективное сечение столкновений, используя соотношение $\langle \lambda \rangle = \dfrac{1}{\sqrt{2} \langle \sigma \rangle n}$.

Упражнение №2

1. Наберите газ (гелий или углекислый газ по указанию преподавателя) в камеру.
2. Поршень газового шприца установите на ноль.
3. Подсоедините камеру с газом к газовому шприцу.
4. Запустите газ в и по положению поршня определите объем газа.
5. Выполните пункты 2-17 упражнения №1.