

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

Цель работы: изучение закона распределения броуновских частиц в поле тяжести и экспериментальное определение объема броуновской частицы.

Литература: [4] гл. 3 §§ 3.3, 3.4; [7] гл. 2 § 2.8; [19] гл. 2 § 2.4.

Приборы и принадлежности:

часть I: микроскоп, диафрагма, предметное стекло с ванночкой, акварельная краска, вода, покровное стекло, секундомер;

часть II: установка для исследования распределения концентрации броуновских частиц по высоте, два цифровых вольтметра с чувствительностью не менее 10 мкВ или двухкоординатный самописец.

#### ВВЕДЕНИЕ

В условиях термодинамического равновесия в отсутствие внешних полей вероятность нахождения молекулы идеального газа в окрестности какой-либо точки объема, занимаемого газом, одинакова по всему объему. Именно поэтому концентрация частиц при этих условиях одинакова во всех частях объема.

Однако если газ находится во внешнем поле с потенциальной энергией  $E_n(\vec{r})$ , то вероятность нахождения частицы в единичном объеме в окрестности точки  $\vec{r}$  определяется больцмановским множителем  $e^{-\frac{E_n(\vec{r})}{kT}}$  (здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура). В то же время концентрация частиц пропорциональна вероятности их нахождения в некоторой области объема. Поэтому средние концентрации частиц  $n_1$  и  $n_2$ , соответствующие значениям потенциальной энергии  $E_{п1}$  и  $E_{п2}$ , связаны между собой соотношением

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{E_{II2} - E_{II1}}{kT}}. \quad (1)$$

Формула (1) выражает так называемое распределение Больцмана. Оно справедливо не только для молекул идеального газа, но и для совокупности любых других классических частиц, находящихся во внешнем поле в состоянии термодинамического равновесия. Например, броуновские частицы, находящиеся в равновесии с молекулами газа или жидкости, подчиняются распределению Больцмана.

Разность потенциальных энергий между двумя уровнями  $E_{II2} - E_{II1}$  для броуновских частиц определяется работой  $A_{12}$  силы, действующей на частицу при ее перемещении с одного уровня на другой. В частности, для броуновской частицы в жидкости при наличии однородного поля тяжести

$$E_{II2} - E_{II1} = A_{12} = (\rho - \rho_0) g V \Delta h, \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_0$  – плотности броуновской частицы и жидкости соответственно,  $V$  – объем броуновской частицы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta h$  – расстояние между уровнями по вертикали.

Из (1) и (2) можно получить выражение, определяющее объем броуновской частицы:

$$V = \frac{kT \ln \frac{n_1}{n_2}}{g (\rho - \rho_0) \Delta h}, \quad (3)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – средние концентрации частиц в нижнем и верхнем слоях жидкости.

В предлагаемой работе объектом исследования служат частицы мелкотертой акварельной краски, взвешенные в воде. Эти частицы находятся в состоянии термодинамического равновесия с молекулами воды, и, следовательно, к ним применимы все рассуждения, которые приведены выше. Для вычисления объема этих частиц при помощи соотношения (3) необходимо определить концентрации частиц на двух уровнях, расстояние

между которыми составляет некоторую величину  $\Delta h$ . Броуновские частицы наблюдаются визуально с помощью микроскопа.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Раствор акварельной краски заливается в углубление предметного стекла, закрывается сверху покровным стеклом так, чтобы под ними не было воздушных пузырьков, и закрепляется на предметном столике микроскопа.

Благодаря малой глубине резкости изображения в поле зрения микроскопа можно одновременно видеть частицы краски, находящиеся в очень тонком горизонтальном слое жидкости. Переместив тубус микроскопа на небольшую величину  $\Delta h_m$ , можно наблюдать другой слой жидкости, отстоящий от первого на расстояние  $\Delta h = n_v \Delta h_m$ , где  $n_v = 1,33$  – показатель преломления воды. Перемещение тубуса  $\Delta h_m$  отсчитывается по шкале микрометрического винта. Для ограничения поля зрения в окуляр микроскопа помещается диафрагма (металлическая фольга с небольшим отверстием).

Чтобы определить отношение средних концентраций броуновских частиц  $\frac{n_1}{n_2}$  на двух уровнях, на каждом уровне делается не менее 30 подсчетов числа частиц  $N_i$ , **одновременно** наблюдаемых в поле зрения, ограниченном окулярной диафрагмой. Среднее число частиц  $\bar{N}$ , наблюдаемых в данном слое, пропорционально концентрации частиц на уровне этого слоя. Поэтому отношение концентраций частиц на разных высотах можно принять равным отношению средних чисел частиц  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  на соответствующих уровнях.

## ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

**Задание 1.** Наблюдение броуновского движения и определение средних чисел частиц  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  на двух уровнях.

Начните наблюдение, опустив объектив вплотную к покровному стеклу. Вращая микрометрический винт на себя, поднимайте медленно тубус

микроскопа до тех пор, пока в поле зрения не появятся частицы. Убедитесь, что при небольших перемещениях тубуса изображения одних частиц исчезают, а других появляются.

Вставьте в окуляр микроскопа диафрагму, ограничивающую поле зрения. Выберите нижний уровень так, чтобы в ограниченном поле зрения наблюдалось одновременно 7-9 частиц.

Подсчитайте число частиц, одновременно наблюдающихся в поле зрения. Подсчет проводите 25-30 раз через равные промежутки времени (например, через 10 с). Среднее арифметическое значение числа частиц определит искомое значение  $\bar{N}_1$  (так называемое “выборочное среднее”).

Для определения среднего числа частиц  $\bar{N}_2$  на другом уровне поднимите тубус микроскопа на 30–50 мкм и повторите подобные измерения.

Рассчитайте для каждого уровня среднее число частиц  $\bar{N}$ , среднеквадратичную погрешность (выборочную дисперсию)  $s$  и среднеквадратичную погрешность (дисперсию) выборочного среднего  $\sigma'$ . Вспомните, что характеризует каждая из этих погрешностей. Каково ожидаемое отличие истинного среднего значения случайной величины от выборочного среднего? (См. Введение к «Лабораторному практикуму по общей и экспериментальной физике» и пример подобного расчета в Приложении к данной работе.)

### **Задание 2.** Определение объема частиц.

Определение объема частиц краски проведите по формуле (3), при этом учтите, что плотность краски равна  $\rho = 1,06 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. (Температуру жидкости примите равной комнатной.) Оцените погрешность определения среднего объема броуновских частиц.

## **ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ**

1. Чем объясняется беспорядочное движение частиц, взвешенных в жидкости или в газе (броуновское движение)? Как зависит характер движения броуновских частиц от их размеров?

2. Оцените среднюю скорость броуновских частиц (по результатам данной работы).

3. Рассчитайте объем, приходящийся (в среднем) на одну молекулу воды, и сравните его с объемом броуновской частицы, полученным в работе.

4. Почему рекомендуется произвести большое число отсчетов частиц, видимых в поле зрения микроскопа?