МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Отделение естественных наук ШБИП

УТВЕРЖДАЮ
Директор ШБИП
___________ Д.В. Чайковский
«___»_________ 2022 г.

О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко

ДВИЖЕНИЕ БРОУНОВСКОЙ ЧАСТИЦЫ

Учебно-методическое пособие по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере
с помощью лабораторной работы № МодТ–03
для студентов всех специальностей

Издательство
Томского политехнического университета
2022

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я73
Р321

Р321 **Ревинская О.Г.**
Движение броуновской частицы: учебно-методическое пособие по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере с помощью лабораторной работы № МодТ–03 для студентов всех специальностей / О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 15 с.

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром отделения естественных наук ШБИП
«___» _________ 20___ г.

Зав. ОЕН ШБИП
проф., доктор физ.-мат. наук В.П. Кривобоков

Председатель учебно-методической комиссии
А.В. Макиенко

Рецензент
доктор тех. наук, профессор Томского политехнического университета
В.А. Москалев

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № МодТ–03 ПО ИЗУЧЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ

Движение броуновской частицы

Цель работы: изучение движения броуновской частицы. Определение постоянной Больцмана, коэффициента диффузии и длины свободного пробега броуновской частицы.

1. Теоретическое содержание

Под ***броуновским движением*** понимают хаотическое движение микроскопических частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием ударов молекул окружающей среды. Это явление впервые исследовано английским ученым Робертом Броуном, который в 1827 г. наблюдал в микроскоп движение цветочной пыльцы, взвешенной в воде. Полная теория броуновского движения была дана в 1905–06 гг. А. Эйнштейном и польским физиком М. Смолуховским.

Причина броуновского движения – тепловое движение молекул среды. Столкновения молекул среды с частицей носят случайный характер, поэтому удары с разных сторон оказываются не скомпенсированными. Удары молекул среды приводят частицу в беспорядочное движение: скорость ее хаотически меняется по величине и направлению. Броуновское движение – наиболее наглядное экспериментальное подтверждение представлений молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул.

Чем больше размер частицы, тем большее число молекул окружающей среды могут столкнуться с ней и, следовательно, тем меньшее количество ударов останется не скомпенсированным. Поэтому большая частица не приходит в движение. Если частица имеет небольшие размеры (~ 1 мкм = 10^{-4}см =10^{-6}м), число столкновений будет невелико, следовательно, бóльшее количество ударов останется не скомпенсированным, и частица придет в движение. Такую ***частицу*** называют ***броуновской***.

Хотя броуновская частица движется в результате хаотических столкновений с молекулами среды и невозможно точно определить ее траекторию, статистические методы позволяют определить средний квадрат отклонения частицы от начального положения как функцию времени.

Рассмотрим смещение броуновской частицы относительно точки O, выбранной за начало отсчета. Положение частицы будем фиксировать через равные интервалы времени Δt. Хотя за время Δt частица движется по сложной ломаной траектории, несколько раз меняя направление скорости, ее смещение из точки O за время Δt описывается радиус-вектором $\vec{r}_1$ (рис. 1).

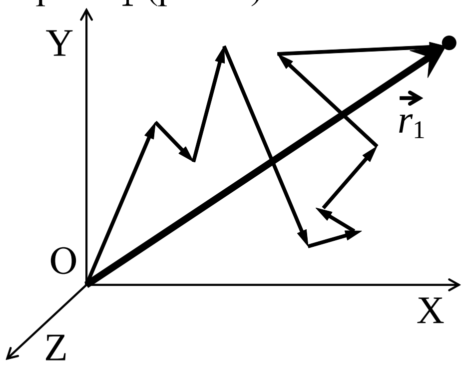

Рис. 1

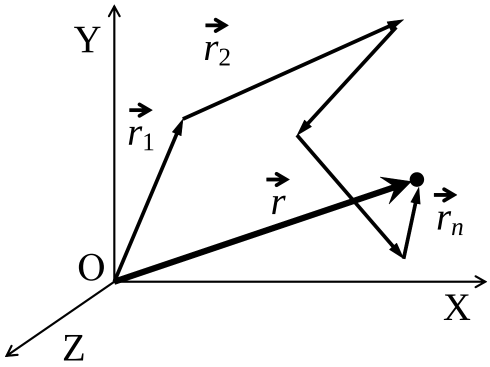

Рис. 2

Пусть за промежуток времени $t = n\Delta t$ с интервалом Δt зафиксировано n последовательных смещений броуновской частицы, описываемых радиус-векторами $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$, … $\vec{r}_n$ соответственно (рис. 2). Результирующее смещение броуновской частицы за промежуток времени t описывается радиус-вектором $\vec{r}$

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \ldots + \vec{r}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i.$$

Квадрат радиус-вектора r^2 и будет описывать квадрат отклонения частицы от начального положения

$$r^2 = (\vec{r} \cdot \vec{r}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j) = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 + \sum_{\substack{i,\ j \\ i \neq j}}^{n} (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j).$$

Проведя ряд независимых экспериментов, получим различные значения квадрата смещения броуновской частицы за время t. Найдем среднее значение квадрата смещения

$$\langle r^2 \rangle = \sum_{i=1}^{n} \langle r_i^2 \rangle + \sum_{\substack{i,\ j \\ i \neq j}}^{n} \langle (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j) \rangle.$$

Все смещения броуновской частицы за одинаковые интервалы времени Δt равновероятны. Поэтому все средние смещения частицы $\langle r_i^2 \rangle$ за время Δt одинаковы

$$\langle r_1^2 \rangle = \langle r_2^2 \rangle = \langle r_3^2 \rangle = \ldots \langle r_n^2 \rangle = const.$$

Обозначим константу $const = \langle r_i^2 \rangle$ через C^2. Тогда

$$\langle r_i^2 \rangle = C^2, \qquad \text{а} \ \sum_{i=1}^{n} \langle r_i^2 \rangle = nC^2.$$

Среднее значение скалярного произведения неодинаковых векторов смещения $\langle (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j) \rangle$ обращается в ноль из-за равноправия всех направлений смещения

$$\langle \underset{i \neq j}{(\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j)} \rangle = \langle r_i r_j \cos \varphi_{ij} \rangle = \langle r_i \rangle \langle r_j \rangle \langle \cos \varphi_{ij} \rangle = \langle r_i \rangle \langle r_j \rangle \cdot 0 = 0.$$

Таким образом, средний квадрат смещения частицы за время t

$$\langle r^2 \rangle = nC^2,$$

где $n = \frac{t}{\Delta t}$ – число измерений за время движения частицы t, а Δt – промежуток времени между измерениями. Тогда

$$\langle r^2 \rangle = C^2 \frac{t}{\Delta t} = \alpha t, \text{где } \alpha = \frac{C^2}{\Delta t}.$$

Или $\langle r^2 \rangle = \alpha t$.

Таким образом, величина среднего квадрата смещения броуновской частицы пропорциональна времени наблюдения t.

Для того чтобы определить коэффициент пропорциональности α, рассмотрим силы, действующие на частицу.

Частица находится во взвешенном состоянии в некоторой вязкой среде, поэтому будем считать, что любые смещения частицы в направлении OZ (в направлении силы тяжести) невозможны. Тогда движение происходит в плоскости XOY. Со стороны среды на частицу действуют сила вязкого трения (сила Стокса) пропорциональная скорости $\vec{F}_{сопр} = -b\vec{v}$ (коэффициент пропорциональности b зависит от размеров и формы частицы, а также от свойств вязкой среды). Кроме того, действует результирующая сила $\vec{F}$ ударов молекул о частицу с разных сторон. Эта сила (сила Ланжевена) носит случайный характер. Уравнение движения частицы можно записать в виде:

$$m\vec{a} = \vec{F} - b\vec{v}.$$

Рассмотрим проекцию этого уравнения на ось OX

$$mx'' = F_x - bx'.$$

Прежде чем получить уравнение для средних величин, выполним ряд вспомогательных преобразований. Умножим обе части этого уравнения на x

$$mx \cdot x'' = F_x \cdot x - bx \cdot x'.$$

Принимая во внимание, что

$$x \cdot x'' = \left(\frac{x^2}{2}\right)'' - (x')^2; \qquad x \cdot x' = \left(\frac{x^2}{2}\right)',$$

полученное уравнение можно записать в виде

$$m\left(\frac{x^2}{2}\right)'' - m(x')^2 = F_x x - b\left(\frac{x^2}{2}\right)'.$$

Усредним полученное уравнение по всем наблюдениям, учитывая, что ***среднее значение производной равно производной среднего значения***. Тогда

$$m\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle'' - m\langle x'\rangle^2 = \langle F_x x\rangle - b\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle'.$$

Координата x частицы и соответствующая проекция силы Ланжевена F_x являются случайными и не зависящими друг от друга величинами. Поэтому $\langle F_x x\rangle = 0$.

Зная, что $x' = v_x$, получим $m\langle x'\rangle^2 = 2\left\langle\frac{mv_x^2}{2}\right\rangle$, где $\left\langle\frac{mv_x^2}{2}\right\rangle$ – средняя энергия, приходящаяся на одну степень свободы. Частица и среда находятся в состоянии термодинамического равновесия, поэтому из закона о равномерном распределении энергии по степеням свободы

$$\left\langle\frac{mv_x^2}{2}\right\rangle = \frac{1}{2}kT.$$

Тогда уравнение на средние характеристики движения примет вид

$$m\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle'' - kT = -b\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle'.$$

Решение данного уравнения можно записать в виде

$$\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle' = \frac{kT}{b} - \frac{kT}{b} \cdot e^{-bt/m}.$$

Для макроскопических частиц значение константы $\frac{m}{b}$ таково, что влияние экспоненты в полученном решении сказывается только при длительности наблюдения t порядка времени взаимодействия частицы с молекулой среды (~ 10^{-12} с). Для бо́льших интервалов времени наблюдения t вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда скорость изменения среднего квадрата Х-смещения $< x^2 >'$ не зависит от времени

$$\left\langle\frac{x^2}{2}\right\rangle' = \frac{kT}{b}.$$

Постоянная величина $D = \frac{kT}{b}$ характеризует количество частиц данного вида, проходящих через единичную площадку в единицу времени и называется ***коэффициентом диффузии***. Коэффициент диффузии зависит от температуры и свойств жидкости, а также от размеров и формы движущихся частиц.

Тогда дифференциальное уравнение на средний квадрат X-смещения броуновской частицы примет вид

$$\langle x^2 \rangle' = 2D.$$

Проинтегрировав данное уравнение, получим искомую зависимость в виде

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt.$$

Полученное уравнение называют ***формулой Эйнштейна-Смолуховского***. Она позволила Ж. Перрену экспериментально определить постоянную Больцмана и число Авогадро.

Современные методы измерений позволили получить следующее значение постоянной Больцмана

k = 1,380 662 44·10^{-23} Дж/К = 1,380 662 44·10^{-16} г·см^2/(с^2·К).

При движении в плоскости XOY квадрат отклонения частицы от начального положения выражается через координаты частицы $r^2 = x^2 + y^2$. Среднее значение квадрата отклонения частицы, соответственно, выражается через средние квадраты X- и Y-координат $\langle r^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle$. Все направления движения частицы равноправны, поэтому $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle$ и $\langle r^2 \rangle = 2\langle x^2 \rangle$.

Таким образом, средний квадрат смещения броуновской частицы в плоскости XOY пропорциональна времени

$$\langle r^2 \rangle = 4Dt$$

с коэффициентом пропорциональности равным $4D$.

Коэффициент диффузии $D = \frac{kT}{b}$ зависит от коэффициента сопротивления среды b. Согласно формуле Стокса для частицы шарообразной формы коэффициент сопротивления среды зависит от диаметра d частицы и коэффициента вязкости среды η

$$b = 6\pi\eta\frac{d}{2}.$$

Тогда коэффициент диффузии: $D = \frac{kT}{3\pi\eta d}$.

Вычислив из эксперимента средний квадрат смещения броуновской частицы за фиксированное время, можно рассчитать коэффициент диффузии, а, следовательно**, и постоянную Больцмана.**

С другой стороны коэффициент диффузии зависит от средней длины свободного пробега $\langle\lambda\rangle$ и средней скорости $\langle v\rangle$ частицы. Для двумерного движения коэффициент диффузии можно записать

$$D = \frac{1}{2}\langle\lambda\rangle\langle v\rangle.$$

Как было показано ранее, в условиях термодинамического равновесия согласно закону о равнораспределении энергии по степеням свободы $m\langle v\rangle^2 = m\langle v_x\rangle^2 + m\langle v_y\rangle^2 = 2kT$ (при движении в плоскости). Тогда средняя скорость броуновской частицы равна

$$\langle v\rangle = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Средней длиной свободного пробега $\langle\lambda\rangle$ частицы называют расстояние, которое частицы проходит без столкновений с другими частицами.

Например, при температуре 25°С и нормальном давлении средняя скорость молекул воды равна 5,247 см/с. Экспериментально установлено, что коэффициент диффузии воды в состоянии пара равен 0,277 см^2/с, а коэффициент диффузии воды в состоянии жидкости равен $1{,}076\cdot10^{-5}$ см^2/с. Тогда средняя длина свободного пробега молекул воды в парообразном состоянии оценивается как 0,158 см, а средняя длина свободного пробега молекул воды в жидком состоянии – как $6{,}15\cdot10^{-6}$ см. Диаметр молекулы воды равен $3{,}5\cdot10^{-8}$ см. Таким образом, средняя длина свободного пробега молекулы воды в жидкости в $1{,}76\cdot10^{2}$ раза больше ее диаметра, а в газе – в $4{,}53\cdot10^{6}$ раза.

Масса броуновской частицы много больше массы молекулы жидкости или газа. Поэтому средняя скорость броуновской частицы много меньше средней скорости молекул среды, в которой она находится.

Поскольку площадь поверхности броуновской частицы довольно значительная, ее столкновения с молекулами окружающей среды весьма часты, то следует ожидать, что средняя длина свободного пробега такой частицы будет не велика.

Зная постоянную Больцмана, температуру среды, плотность и диаметр частицы, можно оценить среднюю скорость и среднюю длину свободного пробега броуновской частицы.

2. Модель экспериментальной установки

В данной работе с помощью средств компьютерной графики моделируется процесс движения броуновской частицы в вязкой среде. От вязкости и температуры среды зависит, как интенсивно будет двигаться частица и на какое расстояние она сместится за время эксперимента. Температура среды может изменяться в интервале от точки затвердевания до точки кипения. Длительность эксперимента можно регулировать с шагом 5 с. В эксперименте могут участвовать шарообразные частицы различного диаметра (от 0,5 до 2,5 мкм). X- и Y-координаты частицы можно измерять с точностью 0,2 мкм. При заданных условиях погрешность определения постоянной Больцмана не превышает 1%.

Работа выполняется на IBM-совместимом персональном компьютере в виде самостоятельного Windows-приложения. Для удобства выполнения работы в программе предусмотрены три раздела: краткое описание работы; порядок выполнения работы и эксперимент. Переключение между разделами осуществляется с помощью кнопок «Ход работы» и «Эксперимент». Нажатие этих кнопок в зависимости от контекста работы программы приводит либо к вызову соответствующих разделов, либо к возвращению в раздел описания.

Раздел программы «Эксперимент» содержит раскрывающийся список для выбора вязкой среды, в которой будет двигаться частица, счетчики для изменения температуры среды и длительности эксперимента, ползунок для выбора диаметра частицы, а также вспомогательные кнопки, позволяющие управлять экспериментом.

Варианты выполнения работы

Вариант	Среда
1	Анилин
2	Бутиловый спирт
3	Пропанол
4	Этиловый спирт

Вариант	Среда
5	Вода
6	Бензол
7	Метанол
8	Ацетон

3. Порядок выполнения работы

3.1. Краткое описание хода работы

1. Выберите среду (по указанию преподавателя).

Серия экспериментов № 1. Частица большого диаметра при высокой температуре.

2. Задайте температуру среды.
3. Задайте диаметр частицы.
4. Задайте длительность эксперимента равной 15 с.
5. Выполните эксперимент.
6. Измерьте X- и Y-координаты частицы.

7. Повторите эксперимент 12–15 раз, начиная с пункта 5.

8. Для каждого эксперимента вычислите квадрат смещения броуновской частицы.

9. Вычислите средний квадрат смещения.

10. Вычислите коэффициент диффузии и постоянную Больцмана.

11. Повторите эксперимент для длительности эксперимента 30 и 45 с, начиная с пункта 5.

12. Вычислите среднее значение коэффициента диффузии и постоянной Больцмана для данной серии экспериментов.

13. Вычислите среднюю скорость и длину свободного пробега.

Серия экспериментов № 2. Частица большого диаметра при низкой температуре.

14. Задайте температуру среды.

15. Задайте диаметр частицы.

16. Повторите эксперименты с пункта 4 по пункт 13.

Серия экспериментов № 3. Частица малого диаметра при низкой температуре.

17. Задайте температуру среды.

18. Задайте диаметр частицы.

19. Повторите эксперименты с пункта 4 по пункт 13.

20. Постройте графики зависимости среднего квадрата смещения частицы от времени наблюдения.

21. Вычислите среднее значение постоянной Больцмана по результатам всех проведенных экспериментов (окончательный результат).

22. Сделайте выводы.

23. Сделайте и обоснуйте прогноз: как будет двигаться **частица малого диаметра при высокой температуре**.

3.2. Подробное описание хода работы

При выполнении работы рекомендуется следующая последовательность действий:

1. Раскрывающийся список ***«Среда»*** содержит набор жидкостей, обладающих различными вязкостями: анилин, бутиловый спирт, пропанол, этиловый спирт, вода, бензол, ментол, ацетон. Выберите жидкость, в которой будет проходить эксперимент (по указанию преподавателя). Для выбранной жидкости под списком «Среда» указывается ее вязкость, которая необходима для расчетов, а под счетчиком «Температура» – диапазон температур, при котором выбранное вещество находится в жидком состоянии.

Серия экспериментов № 1. Частица большого диаметра при высокой температуре.

В данной серии экспериментов необходимо изучить зависимость среднего смещения частицы от времени наблюдения для частицы большого диаметра при одной и той же высокой температуре.

2. Температуру среды можно изменять в пределах от точки затвердевания до точки кипения (у каждой жидкости свой диапазон температур, при котором данное вещество находится в жидком состоянии). С помощью счетчика ***«Температура»*** на панели инструментов ***«Среда»*** выберите высокую температуру среды, но отличающуюся от максимальной (точки кипения). Интервал доступных температур автоматически указывается под счетчиком при выборе жидкости.

3. Ползунок ***«Диаметр»*** на панели инструментов ***«Броуновская частица»*** позволяет изменять диаметр броуновской частицы в пределах от 0,5 до 2,5 мкм. С помощью ползунка ***«Диаметр»*** выберите для экспериментов частицу большого диаметра (больше 2,0 мкм). Точное значение выбранного диаметра указывается над ползунком.

На панели инструментов ***«Броуновская частица»*** также указывается плотность частицы, которая необходима для расчетов.

Проверьте, удастся ли для выбранного диаметра частицы выполнить эксперимент длительностью 45 секунд. Для этого увеличьте значение счетчика ***«Продолжительность»*** на панели инструментов ***«Эксперимент»*** до максимально возможного. Если максимально допустимая продолжительность эксперимента меньше 45 с, диаметр частицы следует увеличить.

4. Счетчик ***«Продолжительность»*** на панели инструментов ***«Эксперимент»*** позволяет изменять длительность эксперимента с интервалом 5 с. Чем больше длительность эксперимента, тем меньше статистическая погрешность полученных с его помощью результатов. С помощью счетчика ***«Продолжительность»*** на панели инструментов ***«Эксперимент»*** выберите длительность эксперимента равной ***15 с***.

5. Нажмите кнопку ***«Начать эксперимент»*** – частица начнет двигаться в заданных условиях. Во время эксперимента на панели инструментов ***«Эксперимент»*** отображается время, прошедшее от начала эксперимента. Эксперимент завершится по истечении заданного времени – частица остановится.

6. Справа и снизу от области эксперимента, внутри которой движется частица, расположены измерительные линейки. Каждая из линеек снабжена ползунком и синхронизованной с ним измерительной линией для измерения координат частицы. Перемещая ползунки ***«Измерение X-координаты»*** и ***«Измерение Y-координаты»***, совместите обе измерительные линии (вертикальную и горизонтальную) с центром броуновской частицы. По линейкам определите X- и Y-координаты частицы. Обратите внимание, что цена деления линеек равна 0,2 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ.

7. Движение частицы носит хаотический характер. Поэтому, начав двигаться из начала координат, частица может с равной вероятностью двигаться в любом направлении. Для получения наиболее достоверных результатов при изучении случайных процессов необходимо проводить как можно большее количество экспериментов. Поэтому повторите эксперимент не менее 12–15 раз, начиная с пункта 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ.

8. Броуновская частица в каждом опыте начинает движение из начала координат. Поэтому квадрат смещения частицы равен $r^2 = x^2 + y^2$. Рассчитайте квадрат смещения для каждого эксперимента. Координаты частицы измерялись с точностью

до 0,2 мкм (см. пункт 6), поэтому квадрат смещения r^2 следует рассчитывать с точностью до двух знаков после запятой.

9. Чтобы вычислить средний квадрат смещения $\langle r^2 \rangle$, необходимо сложить все полученные значения квадратов смещения r^2 и разделить эту сумму на количество проведенных экспериментов (среднее арифметическое). Результат округлите до двух десятичных знаков после запятой.

10. Согласно теории средний квадрат смещения $\langle r^2 \rangle$ прямо пропорционален времени наблюдения. Коэффициент пропорциональности в четыре раза больше коэффициента диффузии: $\langle r^2 \rangle = 4Dt$. Отсюда рассчитайте коэффициент диффузии D.

Коэффициент диффузии D выражается через постоянную Больцмана k: $D = \frac{kT}{3\pi\eta d}$. Зная температуру T и вязкость η жидкости, а также диаметр d частицы, по коэффициенту диффузии рассчитайте постоянную Больцмана.

Значения коэффициента диффузии и постоянной Больцмана должны содержать столько же значащих цифр, как и средний квадрат смещения, из которого они рассчитаны.

11. Повторите эксперимент для длительности эксперимента ***30*** и ***45 с*** как в пунктах 5–7. Вычислите значения среднего квадрата смещения, коэффициента диффузии и постоянной Больцмана как в пунктах 8–10.

12. Рассчитайте средние значения коэффициента диффузии и постоянной Больцмана. Для этого сложите три значения коэффициента диффузии, полученных в результате опытов длительностью 15, 30 и 45 с соответственно, и разделите на три. Аналогично вычислите среднее арифметическое значение постоянной Больцмана. Для записи результатов вычислений используйте такое же количество значащих цифр, как и в исходных данных.

13. Броуновская частица и жидкость находятся в состоянии термодинамического равновесия. Поэтому среднюю скорость частицы массой m можно вычислить, зная температуру среды: $\langle v \rangle^2 = \frac{2kT}{m}$. Массу шарообразной частицы можно определить, зная плотность ρ и диаметр d: $m = \frac{\pi d^3}{6}\rho$. На основе этих формул и среднего значения постоянной Больцмана, полученного в пункте 12, рассчитайте среднюю скорость $\langle v \rangle$ броуновской частицы.

Коэффициент диффузии D связан со средней длиной свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ следующим образом: $D = \frac{1}{2}\langle v \rangle \langle \lambda \rangle$. Вычислите среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ броуновской частицы.

Серия экспериментов № 2. Частица большого диаметра при низкой температуре.

В данной серии экспериментов необходимо изучить зависимость среднего смещения частицы от времени наблюдения для частицы большого диаметра при одной и той же низкой температуре.

14. Температуру среды можно изменять в пределах от точки затвердевания до точки кипения (у каждой жидкости свой диапазон температур, при котором данное вещество находится в жидком состоянии). С помощью счетчика ***«Температура»*** на панели инструментов ***«Среда»*** выберите низкую температуру среды, но отличающуюся от минимальной (точки затвердевания). Интервал доступных температур автоматически указывается под счетчиком при выборе жидкости.

15. Диаметр броуновской частицы в этой серии экспериментов оставьте таким же, как в предыдущей серии (см. пункт 3).

16. Повторите эксперименты с пункта 4 по пункт 13.

Серия экспериментов № 3. Частица малого диаметра при низкой температуре.

В данной серии экспериментов необходимо изучить зависимость среднего смещения частицы от времени наблюдения для частицы малого диаметра при одной и той же низкой температуре.

17. Температуру среды в этой серии экспериментов оставьте такой же, как в предыдущей серии (см. пункт 14).

18. Ползунок ***«Диаметр»*** на панели инструментов ***«Броуновская частица»*** позволяет изменять диаметр броуновской частицы в пределах от 0,5 до 2,5 мкм. С помощью ползунка ***«Диаметр»*** выберите для экспериментов частицу малого диаметра (меньше 1,0 мкм). Точное значение выбранного диаметра указывается над ползунком.

19. Повторите эксперименты с пункта 4 по пункт 13.

20. На одном графике постройте три зависимости среднего квадрата смещения частицы от времени наблюдения, ***соответствующие трем проведенным сериям экспериментов***. Согласно теории $\langle r^2 \rangle = 4Dt$, поэтому зависимости должны иметь линейный характер (линейная функция). Тангенс угла наклона tg α каждого графика в четыре раза больше коэффициента диффузии: tg $\alpha = 4D$. Для каждой построенной прямой по графику определите тангенс угла наклона tg α и рассчитайте коэффициент диффузии D.

21. В каждой серии экспериментов были получены три значения постоянной Больцмана, соответствующие экспериментам различной длительности (см. пункт 10) – всего 9 значений. Используя эти 9 результатов, вычислите среднее значение постоянной Больцмана – окончательный результат исследования. **Внимание!** Усредненные значения постоянной Больцмана, рассчитанные при выполнении пункта 12, для получения окончательного результата использовать НЕ следует.

Для записи результатов вычислений используйте такое же количество значащих цифр, как и в исходных данных.

Сравните полученное (экспериментальное) значение с табличными данными, приведенными в справочниках или методических указаниях. Для корректного сравнения табличное и экспериментальное значения постоянной Больцмана должны содержать одинаковое количество значащих цифр.

22. Сделайте выводы.

Сравните результаты первой и второй серии экспериментов и сделайте вывод: как зависят коэффициент диффузии и длина свободного пробега от температуры жидкости, в которой находится частица.

Сравните результаты второй и третьей серии экспериментов и сделайте вывод: как зависит коэффициент диффузии и длина свободного пробега от диаметра броуновской частицы.

Сравните значения коэффициентов диффузии, полученных из графиков (см. пункт 20) и из расчетов (см. пункт 12). Чем объясняются различия в полученных результатах.

Сравните значения длины свободного пробега броуновской частицы с размерами частицы, а также с табличными значениями длины свободного пробега молекул жидкостей и газов. Объясните разницу.

23. Сделайте и обоснуйте прогноз: как будет двигаться **частица малого диаметра при высокой температуре**, какими по отношению к полученным в работе значениям будут в этом случае длина свободного пробега и коэффициент диффузии. На графике, построенном в пункте 20, пунктиром изобразите предположительный ход зависимости среднего смещения от времени наблюдения для этого случая.

Таблица

Продолжительность эксперимента, с			
№	X-координата частицы, мкм	Y-координата частицы, мкм	Квадрат смещения частицы r^2, мкм^2
1			
2			
…			
15			
Средний квадрат смещения $< r^2 >$, мкм^2			
Коэффициент диффузии D, мкм^2/с			
Постоянная Больцмана k, Дж/К			

4. Контрольные вопросы

1. Какая частица называется броуновской?
2. Как средний квадрат смещения броуновской частицы из некоторого начального положения зависит от времени? Доказать.
3. Какую физическую величину называют коэффициентом диффузии.
4. Как средний квадрат отклонения броуновской частицы связан с коэффициентом диффузии?
5. Как коэффициент диффузии связан с вязкостью среды?
6. Как коэффициент диффузии связан со средней длиной свободного пробега частицы?
7. Опишите порядок выполнения работы.

Учебное издание

РЕВИНСКАЯ Ольга Геннадьевна
КРАВЧЕНКО Надежда Степановна

ДВИЖЕНИЕ БРОУНОВСКОЙ ЧАСТИЦЫ

Учебно-методическое пособие по изучению моделей
физических процессов и явлений на компьютере
с помощью лабораторной работы № МодТ–03
для студентов всех специальностей

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

Подписано к печати __.__.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».
Печать RISO. Усл.печ.л. _____. Уч.-изд.л. _____.
Заказ . Тираж 50 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru