



А. Б. Казанцева

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум



Москва
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский педагогический государственный университет»



А. Б. Казанцева

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум

МПГУ
Москва • 2019

УДК 378(076.5):539.1
ББК 22.36я73-5
К142

Рецензенты:

Г. М. Чулкова, доктор физико-математических наук, профессор
кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ

Е. А. Попова, кандидат физико-математических наук,
доцент Московского института электроники и математики
им. А. Н. Тихонова НИУ ВШЭ

Казанцева, Алла Борисовна.

К142 Молекулярная физика : лабораторный практикум / А. Б. Казанцева. – Москва : МПГУ, 2019. – 108 с.

ISBN 978-5-4263-0790-2

Пособие содержит описания лабораторных работ по молекулярной физике, которые выполняются в учебной лаборатории молекулярной физики Института физики, технологии и информационных систем МПГУ. Практикум систематизирует результаты многолетней работы сотрудников кафедры общей и экспериментальной физики.

Пособие предназначено студентам, обучающимся по направлениям подготовки 03.03.02 Физика, профиль «Фундаментальная физика и информатика», и 44.03.05 Педагогическое образование, профили «Физика и информатика», «Физика и английский язык».

УДК 378(076.5):539.1
ББК 22.36я73-5

ISBN 978-5-4263-0790-2

© МПГУ, 2019
© Казанцева А. Б., текст, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
<i>Лабораторная работа № 1</i> Исследование распределения броуновских частиц в однородном поле тяжести	7
<i>Лабораторная работа № 2</i> Определение коэффициента вязкости воздуха	15
<i>Лабораторная работа № 3</i> Определение коэффициента теплопроводности воздуха	21
<i>Лабораторная работа № 4</i> Определение коэффициента диффузии газа при различном давлении	26
<i>Лабораторная работа № 5</i> Определение коэффициента диффузии паров воды и спирта в воздухе	33
<i>Лабораторная работа № 6</i> Определение C_p/C_v воздуха методом Клемана – Дезорма и расчет изменения энтропии при различных процессах	40
<i>Лабораторная работа № 7</i> Определение C_p/C_v газов путем измерения скорости звука	51
<i>Лабораторная работа № 8</i> Изменение энтропии в изолированной системе	59

<i>Лабораторная работа № 9</i>	
Определение молярной теплоты испарения воды при температуре кипения	65
<i>Лабораторная работа № 10</i>	
Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	73
<i>Лабораторная работа № 11</i>	
Определение удельной теплоемкости твердых тел при комнатной температуре	78
<i>Лабораторная работа № 12</i>	
Исследование температурной зависимости электропроводности металлов и полупроводников	85
<i>Лабораторная работа № 13</i>	
Изучение эффекта холла в полупроводниках	95
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ	103

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие содержит описания лабораторных работ по молекулярной физике, которые выполняются в учебной лаборатории молекулярной физики Института физики, технологии и информационных систем Московского государственного педагогического университета (МПГУ).

Большинство лабораторных работ являются результатом труда коллектива преподавателей и инженеров кафедры общей и экспериментальной физики¹. Автором пособия была проведена работа по обновлению имеющихся лабораторных работ, а также созданию методических рекомендаций, использование которых поможет студентам осуществлять самостоятельную подготовку к выполнению и защите лабораторных работ.

В описании каждой лабораторной работы сформулированы цели эксперимента, представлен перечень используемых приборов и оборудования, дано краткое теоретическое введение, подробно описаны порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов, а также сформулированы вопросы к защите работы. К описанию некоторых работ добавлены Приложения, помогающие грамотно провести обработку результатов и необходимые вычисления. Помимо рисунков и схем, приводятся фотографии лабораторных установок и рабочие таблицы; в конце книги имеются справочные материалы.

Пособие соответствует рабочим программам учебных дисциплин «Физический практикум» (раздел «Молекулярная физика») для студентов, обучающихся по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование, профили «Физика и информатика», «Физика и английский язык», и «Молекулярная физика» (модуля «Общая физика») для студентов,

¹ В основу Пособия положен 5-й раздел книги: Александров В. Н., Бирюков С. В., Васильева И. А. и др. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: Учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / Под ред. Е. М. Гершензона и А. Н. Мансурова. – М.: Академия, 2004.

обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль «Фундаментальная физика и информатика».

Автор выражает благодарность всем сотрудникам кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ за поддержку в работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение закона распределения броуновских частиц в поле тяжести и экспериментальное определение объема броуновской частицы.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и : микроскоп, диафрагма, предметное стекло с ванночкой, акварельная краска, вода, покрывное стекло, секундомер.

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 $U(\vec{r})$, то вероятность нахождения частицы в единичном объеме в окрестности точки \vec{r} определяется бoльцмановским множителем $\exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$ (где 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 U_1 и U_2 , связаны между собой соотношением

$$n_2 = n_1 \exp\left(-\frac{U_2 - U_1}{kT}\right). \quad (1)$$

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 $U_2 - U_1$ 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

$$U_2 - U_1 = A_{12} = (\rho - \rho_0)gV \cdot \Delta h, \quad (2)$$

где ρ и ρ_0 – плотности броуновской частицы и жидкости соответственно, V – объем броуновской частицы, g – ускорение свободного падения, Δh – расстояние между уровнями по вертикали.

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

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

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 Δh . 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 Δh_m , можно наблюдать другой слой жидкости, отстоящий от первого на расстояние $\Delta h = n_e \Delta h_m$, где $n_e = 1,33$ – показатель преломления воды. Перемещение тубуса Δh_m отсчитывается по шкале микрометрического винта. Для ограничения поля зрения в окуляр микроскопа может помещаться 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 подсчет частиц 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 5–7 частиц.

Подсчитайте число частиц, одновременно наблюдающихся в поле зрения. Подсчет проводите 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.

Результаты измерений представьте в виде таблицы.

N_{1i}	Число случаев	N_{2i}	Число случаев
0		0	
1		1	
2		2	
...		...	

Здесь N_{1i} и N_{2i} – число частиц, наблюдавшихся соответственно на первом и втором уровнях. В столбцах справа указывается, в каком числе случаев наблюдалось данное количество частиц.

Задание 2. Обработка результатов измерений

Рассчитайте для каждого уровня выборочное среднее (то есть среднее арифметическое по данной выборке) \bar{N}_1 и \bar{N}_2 .

Рассчитайте среднеквадратичное отклонение s_1 на первом уровне по формуле

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum(N_{1i} - \bar{N}_1)^2}{n - 1}},$$

где $n = 30$ – полное число подсчетов.

Аналогично вычислите среднеквадратичное отклонение s_2 для уровня 2.

Рассчитайте среднеквадратичную погрешность выборочного среднего σ'_1 для первой выборки по формуле

$$\sigma'_1 = \frac{s_1}{\sqrt{n}}.$$

Аналогично вычислите среднеквадратичное отклонение σ'_2 для второй выборки.

Учебное издание

Казанцева Алла Борисовна

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум

Редактор *Дубовец В. В.*

Оформление обложки *Удовенко В. Г.*

Компьютерная верстка *Дорожкина О. Н., Потрахов И. А.*

Московский педагогический государственный университет (МПГУ).
119991, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1.



Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования (УИД и ИП) МПГУ.
119571, Москва, пр-т Вернадского, д. 88, оф. 446,
тел. +7 (499) 730-38-61, e-mail: izdat@mpgu.su.
Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
УИД и ИП МПГУ.

Подписано в печать 31.07.2019. Формат 60х90/16.
Бум. офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 6,75.
Тираж 500 экз. Заказ 973.

ISBN 978-5-4263-0790-2



9 785426 307902