

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Ю.В. Тихомиров

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу физики

**С ЭЛЕМЕНТАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

(2-я часть)

*для студентов всех специальностей
всех форм обучения*

МОСКВА - 2000

СОДЕРЖАНИЕ

ПОРЯДОК РАБОТЫ В ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ.....	3
ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	4
ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....	5
РАЗДЕЛ 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ.....	7
3_1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ.....	7
3_2. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА ПО РАССЕЯНИЮ α -ЧАСТИЦ	11
3_3. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА	15
РАЗДЕЛ 4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.....	19
4_1. АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС	19
4_2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА	23
4_3. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ	27
4_4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКОГО ГАЗА..	31
ЛИТЕРАТУРА	35
НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	35

ПОРЯДОК РАБОТЫ В ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Студенты выполняют лабораторные работы по физике по подгруппам и в соответствии с графиком лабораторных работ для данной специальности. Графики вывешиваются до начала семестра на стенде в лаборатории физики. Количество студентов в подгруппах должно быть примерно равным (отличие не более одного человека). Пропущенная по любой причине работа выполняется в конце семестра в дополнительное время, назначаемое преподавателем и зав. лабораторией.

Подгруппа студентов разбивается преподавателем на 4 или 8 бригад. В каждой бригаде назначается бригадир. Номер бригады определяет номер лабораторной работы из графика (расположенного на стенде).

Занятие продолжается 4 академических часа без перерыва.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАНЯТИЯ В ЛАБОРАТОРИИ

- * Первый час - получение у лаборантов методических пособий и подготовка студентов к допуску.
- * Второй час - допуск студентов к лабораторной работе (проводится преподавателем, который ставит подпись в конспекте студента).
- * Третий час - выполнение измерений (контролируется преподавателем и дежурным лаборантом). После окончания измерений и занесении их результатов в таблицы в конспекте студенты получают подпись преподавателя (графа ИЗМЕРЕНИЯ) и подпись лаборанта (графа УСТАНОВКА).
- * Четвертый час - самостоятельная обработка результатов и сдача преподавателю зачета по ЛР (подпись о зачете ставится преподавателем).

ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Проводится преподавателем побригадно с персональным опросом каждого студента. Для допуска:

- * Каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной ЛР (см. соответствующие требования).
- * Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов.
- * Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно).
- * Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (4-5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница (обложка):

Допуск	Измерения	Установка	Зачет

Лабораторная работа N__
Название:

Выполнил:
студент группы _____
ФИО _____
Дата выполнения: _____

Следующие страницы:

<p>ЧЕРНОВИК</p> <p>(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)</p>	<p><u>Цель работы:</u> (переписать полностью из описания).</p> <p><u>Краткая теория</u> (выписать основные формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).</p> <p><u>Экспериментальная установка</u> (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).</p> <p><u>Таблицы</u> (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).</p> <p><u>Оформление отчета</u> (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, “Обработка результатов и оформление отчета”.</p>
---	---

ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

Выполнение всех **пунктов** раздела описания “Оформление отчета” (в черновике представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).

Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.

Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон)

Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).

Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

Г Р А Ф И К (требования):

- на миллиметровке или листе в клетку, размер не менее 1/2 тетрадного листа,
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, индексы величин, единицы измерения, 10^N ,
- на каждой оси - **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок),
- под графиком - полное название графика **СЛОВАМИ**,
- на графике - экспериментальные и теоретические точки ярко,
- форма графика соответствует теоретической зависимости (не ломаная).

ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости _____
название функции словами
от _____ имеет вид прямой (проходящей через начало координат,
название аргумента
параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид _____.
формула

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчетов получено значение _____,
название физической характеристики
равное _____ = (_____ \pm _____) 10^{-} _____
символ среднее ошибка степень един.измер

РАЗДЕЛ 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3_1 ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.3, §9). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите кнопку «КВАНТ». Щелкните мышью на кнопке «↓» справа внизу, пока не появится кнопка, около которой надпись «ФОТОЭФФЕКТ». Нажмите ее и затем кнопку «ФИЗИКА». Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.
- * Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ФОТОНЫ это частицы (кванты), поток которых является одной из моделей электромагнитного излучения (ЭМИ).

ЭНЕРГИЯ ФОТОНА $E_{\text{ф}} = h\nu$,

ν - частота излучения, h - постоянная Планка, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

ЭНЕРГИЯ часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах».

1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна $E_{\text{ф}} =$

$$m_{\text{ф}}c^2, m_{\text{ф}} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

ИМПУЛЬС ФОТОНА $p = m_{\text{ф}} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E_{\text{ф}}}{c}$, где λ - длина волны ЭМИ.

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ есть явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

Кинетическая энергия электрона внутри вещества увеличивается на $h\nu$, но при вылете фотоэлектрона из вещества им совершается работа $A_{\text{ВЫХ}}$ (работа выхода) против сил электростатического притяжения к металлу. У фотоэлектрона сообщенная ему фотоном порция энергии уменьшается на величину, равную работе выхода из металла (фотокатода), а оставшаяся часть имеет вид кинетической энергии фотоэлектрона вне металла (фотокатода):

$$E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНЕ}} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}.$$

Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА.

КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта есть минимальная частота ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия фотона равна работе выхода $h\nu_{\text{КР}} = A_{\text{ВЫХ}}$.

ЗАПИРАЮЩИМ (ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ) НАПРЯЖЕНИЕМ называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода, откуда следует выражение:

$$U_{\text{ЗАП}} = \frac{E_{\text{К.ЭЛ}}^{\text{ВНЕ}}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{ВЫХ}}}{e},$$

где e - заряд электрона.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок на экране монитора и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Нажмите вверху экрана монитора кнопку «Старт».

Зацепите мышью движок реостата регулятора интенсивности (мощности) облучения фотокатода и установите его на максимум.

Аналогичным образом установите нулевое напряжение между анодом и фотокатодом и минимальную длину волны ЭМИ. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода. Добейтесь полного отсутствия фототока. Зафиксируйте самую большую длину волны (она будет равна $\lambda_{\text{КР}}$), при которой фототок еще присутствует. Запишите в тетрадь значение длины волны красной границы фотоэффекта ($\lambda_{\text{КР}}$).
2. Для более точного определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего излучения применяется следующая методика. Сначала установите значение запирающего напряжения в соответствии с таблицей 2. Перемещая мышью вертикальную метку на спектре, установите такое значение длины волны, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что практически все электроны долетают до анода и после этого движутся обратно к катоду). Значения λ и $U_{\text{ЗАП}}$ занесите в таблицу.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

для $U_{\text{ЗАП}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$i =$	1	2	3	4
$U_{\text{ЗАП}i}, \text{В}$				
$\lambda_i, \text{нм}$				
$1/\lambda_i, 10^6 \text{м}^{-1}$				

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИРАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

(не перерисовывать)

Бригады	$U_{\text{ЗАП1}}$	$U_{\text{ЗАП2}}$	$U_{\text{ЗАП3}}$	$U_{\text{ЗАП4}}$
1,5	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2,6	-0.2	-0.4	-0.6	-0.9
3,7	-0.3	-0.5	-0.7	-1.0
4,8	-0.4	-0.7	-0.8	-1.1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.

Постройте график зависимости напряжения запирающего (U_{ЗАП}) от обратной длины волны (1/λ).

Определите постоянную Планка, используя график и формулу

$$h = \frac{e \Delta(U_{\text{ЗАП}})}{c \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

Используя длину волны красной границы фотоэффекта, вычислите значение работы выхода материала фотокатода.

Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

ТАБЛИЦА 3. Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{ВЫХ}}, \text{эВ}$	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое фотоны?
2. Назовите все модели электромагнитного излучения.
3. Напишите формулу энергии фотона.
4. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
5. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
6. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
7. Опишите по шагам, что происходит с фотоном, падающим на границу металла.
8. Опишите по шагам, что происходит со свободным электроном металла, после его взаимодействия с фотоном.
9. Опишите, что происходит с электроном, входящим в состав атома металла, после его взаимодействия с фотоном.
10. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?

11. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
12. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
13. Как устроен фотоэлемент?
14. Почему катод фотоэлемента называют фотокатодом?
15. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода.
16. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?
17. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода выше потенциала фотокатода?
18. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией а анода и почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3_2 ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА по рассеянию α -частиц

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.3, §14). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите кнопку «КВАНТ». Щелкните мышью на кнопке «↓» справа внизу, пока не появится кнопка, около которой надпись «ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА». Нажмите ее и затем кнопку «ФИЗИКА». Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с методикой экспериментального обоснования ядерной модели атома.
- * Экспериментальное подтверждение модели ядра атома как точечного заряда.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

α -ЧАСТИЦЕЙ называется ядро атома гелия. Она имеет положительный электрический заряд $Q_\alpha = +2e$, где e - элементарный заряд, равный $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, и состоит из двух ПРОТОНОВ и двух НЕЙТРОНОВ. α -лучи (излучение) есть поток α -частиц. β -лучи есть поток электронов.

РАССЕЯНИЕМ называется изменение направления движения частицы после ее взаимодействия с другой, обычно неподвижной частицей вещества. На рис.1 схематически изображено рассеяние α -частицы при ее движении в кулоновском поле ядра атома.

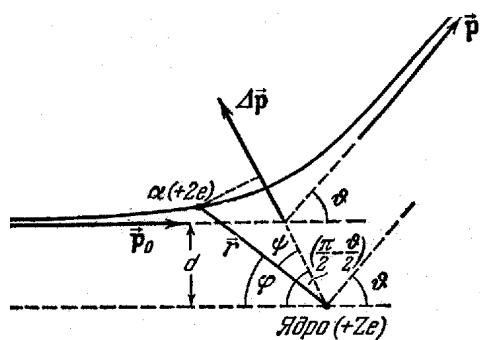


Рис.1

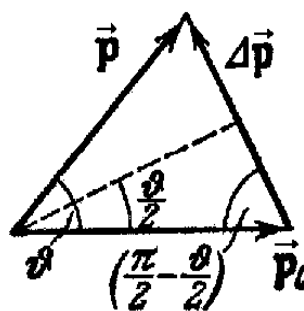


Рис.2

УГОЛ РАССЕЯНИЯ (θ на рисунках 1 и 2) есть угол между «новым» (после взаимодействия) и «старым» (до взаимодействия) направлением движения частицы. Здесь \vec{p}_0 - начальный импульс частицы, \vec{p} - конечный импульс частицы, \vec{r} - текущий радиус-вектор частицы.

ПРИЦЕЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР есть расстояние (d на рис.1) от центра ядра до первоначального направления движения α -частицы. Заряд ядра $Q_{\text{яд}} = Z \cdot e$, где Z - количество протонов в ядре.

СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ между α -частицей и ядром чисто кулоновская,

если минимальное расстояние r_{MIN} между центрами ядра и частицы больше

$$\text{суммы радиусов ядра и частицы } |\vec{F}_{\text{яд}}| = \frac{Q_{\alpha} Q_{\text{яд}}}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Учтем, что ядро атома имеет массу во много раз большую, чем масса α -частицы, т.е. при взаимодействии остается практически неподвижным. Из рисунка 2 видно, что изменение импульса частицы по величине равно (подробности см. в учебнике)

$$|\Delta\vec{p}| = 2p_0 \sin \frac{\vartheta}{2} \quad (1), \quad \text{где } p_0 = m_{\alpha} V \text{ и } V \text{ – начальная скорость.}$$

Из второго закона Ньютона следует $d\vec{p} = \vec{F}dt$, и $\Delta\vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{F}_{\text{яд}} dt$,

$$\text{откуда после интегрирования получим } |\Delta\vec{p}| = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 Vd} 2\cos \frac{\vartheta}{2} \quad (2).$$

Из сравнения формул 1 и 2 получим:

$$\text{ctg} \frac{\vartheta}{2} = \frac{2\pi\epsilon_0 m_{\alpha}}{Ze^2} V^2 d \quad (3).$$

Экспериментальное подтверждение справедливости этой формулы докажет верность принятой модели ядра атома.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Зарисуйте из центральной части рисунка на экране монитора в свой конспект лабораторной работы поле движения частицы, регуляторы параметров и их названия.

Нажмите кнопку «Старт» и внимательно рассмотрите изображение на экране. Зацепите мышью движок регулятора прицельного расстояния d и установите его на 0 («зацепить» значит расположить маркер мыши над движком, нажать и удерживать левую кнопку мыши).

Аналогичным образом установите минимальную начальную скорость V частицы. Нажав кнопку «Старт» наблюдайте движение частицы и значения угла рассеяния ϑ и минимального расстояния сближения r . Увеличьте начальную скорость V частицы, нажав мышью один раз на правую стрелку регулятора скорости. Повторите наблюдения. Зарисуйте в конспект.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Уменьшите скорость до минимальной и увеличьте прицельное расстояние до значения, указанного первым в таблице 5 для вашей бригады. Наблюдайте движение α -частицы после нажатия кнопки «СТАРТ». Запишите значения скорости V , угла рассеяния ϑ и минимального расстояния r в таблицу 1. Увеличьте начальную скорость V частицы, нажав мышью один раз на правую

стрелку регулятора скорости. Повторите измерения еще 3 раза.

2. Повторите измерения для других значений прицельного расстояния d из таблицы 5 и заполните еще 3 таблицы результатов измерений.

ТАБЛИЦЫ 1-4
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

при $d =$ _____ м

$i =$	1	2	3	4
$V_i, 10^7$ м/с				
$\theta_i, ^\circ$				
$r_i, 10^{-13}$ м				
$\text{ctg}(\theta_i/2)$				

ТАБЛИЦА 5. (не переписывать)
ЗНАЧЕНИЯ ПРИЦЕЛЬНОГО
РАССТОЯНИЯ (10^{-13} м)

Бригады	d_1	d_2	d_3	d_4
1,5	0.03	0.15	0.27	0.39
2,6	0.06	0.18	0.30	0.42
3,7	0.09	0.21	0.33	0.45
4,8	0.12	0.24	0.36	0.48

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицы 1-4 значения котангенса $\vartheta/2$.

Постройте на одном чертеже графики зависимости котангенса половинного угла рассеяния ($\text{ctg}(\theta/2)$) от квадрата начальной скорости движения α -частицы (V^2) для каждого d .

По каждому графику определите массу α -частицы m_α , используя наклон

графика и формулу
$$m_\alpha = \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0 d} \frac{\Delta(\text{ctg}\frac{\vartheta}{2})}{\Delta(V^2)}$$
.

Вычислите среднее значение массы α -частицы и абсолютную ошибку измерения.

Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

ТАБЛИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ: Масса α -частицы $6.64 \cdot 10^{-27}$ кг.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрон? Назовите его основные свойства.
2. Что такое протон? Назовите его основные свойства.
3. Что такое нейтрон? Назовите его основные свойства.
4. Что такое α -частица? Назовите ее основные свойства.
5. Что такое α - и β -излучение?
6. Объясните строение атома.
7. Перечислите известные модели строения атома.
8. Объясните строение ядра атома.
9. Что такое рассеяние?
10. Дайте определение угла рассеяния.
11. Дайте определение прицельного параметра.
12. Каковы силы взаимодействия между частицами внутри ядра атома?
13. Каковы силы взаимодействия между ядром атома и его электронами?

14. Каковы силы взаимодействия между ядром атома и налетающей α -частицей?
15. Напишите закон Кулона. При каких условиях он выполняется?
16. Какие законы сохранения выполняются для системы ядро + α -частица.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3_3 СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.3, §12, §28). Запустите программу (PHYSICS\BOOKS.exe). Нажмите мышью кнопки “Квант“, “Спектр водорода“, “Физика” на экране. Запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.
- * Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

СПЕКТРОМ электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

ЛИНЕЙЧАТЫЙ спектр состоит из отдельных компонент (линий), близких к гармоническим. Расстояние между линиями (по шкале длин волн или частот) много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще **ПОЛОСАТЫЙ** спектр, который излучают молекулярные газы и **СПЛОШНОЙ** спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ атома: в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ). При поглощении ЭМИ (фотона) электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину $\Delta E_{эл}$, равную энергии поглощенного фотона $E_{ф}$. При обратном переходе электрон испускает фотон с такой же энергией $E_{ф} = |\Delta E_{эл}|$.

КВАНТОВАЯ модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенной координаты и скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается **ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ**, которая зависит не только от координаты \vec{r} и времени t , но и от 4-х параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых квантовыми числами.

ми. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

ГЛАВНОЕ квантовое число n может принимать целочисленные значения 1, 2, Оно определяет величину энергии электрона в атоме

$$E_n = -\frac{E_i}{n^2}, \text{ где } E_i - \text{ энергия ионизации атома водорода (13.6 эВ).}$$

АЗИМУТАЛЬНОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) квантовое число l определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении $|\vec{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$.

Оно принимает целочисленные значения $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

МАГНИТНОЕ квантовое число m_l определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона L_z на направление внешнего магнитного поля \vec{B} . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньше или равные l . $L_z = \hbar m_l$, где $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

МАГНИТНОЕ спиновое квантовое число m_s определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (СПИНА \vec{S}) на направление внешнего магнитного поля \vec{B} :

$S_z = \hbar m_s$ и принимает только 2 значения: $m_s = +1/2, -1/2$. Для модуля спина $|\vec{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$, где s – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы

имеет только одно значение. Например, для электрона $s = \frac{1}{2}$ (аналогично, для протона и нейтрона). Для фотона $s = 1$.

ВЫРОЖДЕННЫМИ называются состояния электрона с одинаковой энергией.

КРАТНОСТЬ ВЫРОЖДЕНИЯ равна количеству состояний с одной и той же энергией.

КРАТКАЯ запись состояния электрона в атоме: ЦИФРА, равная главному квантовому числу, и БУКВА, определяющая азимутальное квантовое число:

Буква	s	p	d	e	f
Значение l	0	1	2	3	4

ПРАВИЛО ОТБОРА азимутального квантового числа $\Delta l = \pm 1$. Электрон в атоме может переходить только между состояниями, удовлетворяющему указанному правилу.

СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕРИЕЙ называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии:

Серия	Лаймана	Бальмера	Пашена	Брэкета
Переходы	$np \rightarrow 1s$	$ns \rightarrow 2p,$ $nd \rightarrow 2p$	$nf \rightarrow 3d,$ $np \rightarrow 3d$	$ng \rightarrow 4f,$ $nd \rightarrow 4f$

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунки на экране монитора.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.

Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером n_0 , указанным в таблице 2 для вашей бригады и нажмите левую кнопку мыши.

Наблюдайте и зарисуйте мигающие стрелки на модели атома водорода (в левом верхнем поле), а также стрелки в правом поле и отметки в нижнем поле, соответствующие линиям в данной серии.

Запишите в таблицу 1 величину главного квантового числа n_0 для нижнего уровня энергии данной серии, название серии и длины волн отдельных линий.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений

Серия _____ . $n_0 =$ _____

Номер линии $i =$	n	λ_i , мкм	$1/\lambda_i$, мкм ⁻¹
1			
2			
3			
4			

ТАБЛИЦА 2 для выбора начальных условий (не переписывать)

Номер бригады	Гл.кв.число ниж.уровня n_0
1,5	1
2,6	2
3,7	3
4,8	4

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицу 1 обратные длины волн.

Определите, переходу между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения n .

Постройте график зависимости обратной длины волны ($1/\lambda$) от обратного квадрата главного квантового числа ($1/n^2$) для данной спектральной серии.

Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга

$$R = \frac{\Delta(1/\lambda)}{\Delta(1/n^2)}.$$

Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

ТАБЛИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ: Постоянная Ридберга $R = 1.1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ?
3. Что является источником линейчатого спектра ЭМИ?
4. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
5. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
15. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
17. Что такое спин электрона?
18. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояния электрона в атоме ($2s^2$, $2p^3$).
23. Может ли электрон иметь состояние $2d$ и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Назовите названия спектральных серий излучения атомарного водорода. Запишите условия для их возникновения.

РАЗДЕЛ 4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_1 АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.1, §82,97). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите мышью кнопки «Термо», «Адиабатический процесс», «Физика» на экране. Запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с компьютерной моделью, описывающей адиабатический процесс в идеальном газе.
- * Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса.
- * Экспериментальное определение показателя адиабаты, количества степеней свободы и структуры молекул газа в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

СОСТОЯНИЕ системы имеет фиксированные значения макроскопических параметров, описывающих систему в целом. Параметры, характеризующие систему в целом, называются ПАРАМЕТРАМИ СОСТОЯНИЯ. Примерами являются температура, давление, объем и т.д.

РАВНОВЕСНЫМ называется такое состояние системы, при котором все параметры системы имеют определенные значения, остающиеся неизменными сколь угодно долго при неизменных внешних условиях.

ОБРАТИМЫМ называется процесс, при реализации которого в обратном направлении система проходит через те же состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Равновесные процессы всегда обратимы.

КРУГОВЫМ процессом (ЦИКЛОМ) называется процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

$$pV = \frac{m}{\mu} RT.$$

ТЕПЛОЕМКОСТЬ тела численно равна отношению количества тепла $d'Q$, сообщенного телу, к изменению температуры тела dT , которое при этом произошло:

$$C_{\text{ТЕЛА}} = \frac{d'Q}{dT}.$$

УДЕЛЬНОЙ теплоемкостью вещества называется отношение теплоемкости к массе тела.

Если тело не меняет свой объем, то оно не совершает работы, поэтому при постоянном объеме тела переданное телу тепло dQ' идет на изменение его

внутренней энергии dU .

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

$$C_V = \left(\frac{dQ'}{dT} \right)_V = \frac{dU}{dT}.$$

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ идеального газа, молекулы которого имеют i степеней свободы

$$C_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_P = \frac{dU}{dT} + P \left(\frac{dV}{dT} \right)_P = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R + \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R \quad (1).$$

ОТНОШЕНИЕ $\frac{C_P}{C_V} = \gamma$ является константой (в определенном диапазоне температур) для данного газа. Эта константа называется показателем адиабаты.

Формула $\gamma = 1 + \frac{2}{i}$ (2) устанавливает связь отношения теплоемкостей γ с

ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ молекулы газа i .

ЧИСЛО (количество) СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ есть минимальное количество независимых координат, необходимых для однозначного описания положения молекулы в пространстве ИЛИ минимальное количество независимых движений, суперпозиция которых дает любое движение молекулы.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ всегда дает 3 степени свободы.

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ дает 2 степени свободы для линейной молекулы и 3 степени свободы, если атомы в молекуле не расположены на одной линии.

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ дает $2n_{\text{КОЛ}}$ степеней свободы, где $n_{\text{КОЛ}}$ – количество независимых колебаний атомов в молекуле (у двухатомной молекулы $n_{\text{КОЛ}} = 1$).

АДИАБАТИЧЕСКИМ называется процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой ($d'Q = 0$). Уравнение адиабаты

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (3).$$

Принято также выделять ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ, ИЗОБАРИЧЕСКИЙ и ИЗОХОРИЧЕСКИЙ процессы.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите картинку на рисунке на экране монитора, найдите рисунок элемента, в котором реализуется адиабатический процесс, обратите внимание на его теплоизоляцию. Найдите математическую формулировку условия теплоизоляции. Ознакомьтесь с графиками в правой части изображения, найдите графики изотерм и адиабаты.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ:

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.

Установите начальное значение объема $V_{\text{НАЧ}} = 40 \text{ дм}^3$ и начальную температуру T_1 газа, близкую к числам из табл.1 (при этом ориентируйтесь на надписи температуры около изотерм, изображенных на этом же графике). Для этого нажмите кнопку <ВЫБОР>, переместите маркер мыши так, чтобы его острие находилось в указанной точке на верхнем графике, и коротко нажмите на левую кнопку мыши. После этого красная кривая теоретической адиабаты должна переместиться так, чтобы проходить через выбранную точку.

Нажмите мышью кнопку <ПУСК> на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием клавиши “Pause” на клавиатуре компьютера. Последующий запуск процесса осуществляется нажатием пробела.

После автоматической остановки процесса запустите его снова, нажав клавишу пробела на клавиатуре компьютера, и останавливайте, нажимая клавишу “Pause”, когда крестик на теоретической адиабате (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40 дм^3 (6 значений), записывая при остановке значения объема, температуры и давления в таблицу 2.

Установите новое значение температуры T_2 , взяв его из таблицы 1, задавая $V_{\text{НАЧ}} = 40 \text{ дм}^3$ и повторите измерения, записывая результаты в таблицу 3.

ТАБЛИЦА 1. Начальные значения температуры (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
T_1	150	200	250	300	350	400	300	200
T_2	300	350	400	450	500	550	500	450

ТАБЛИЦЫ 2,3 Результаты измерений

$T[\text{K}]$								
$V[\text{дм}^3]$								
$p[\text{кПа}]$								

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей логарифма давления от логарифма объема для обеих адиабат (указав на них начальные температуры).

Для каждой адиабаты определите по графику экспериментальное значение показателя, используя формулу $\gamma = -\frac{\Delta(\ln p)}{\Delta(\ln V)}$.

Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу (2).

Подберите распространенный газ, структура молекулы которого близка к наблюдаемой.

Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое параметры состояния системы?
2. Дайте определение равновесного состояния системы.
3. Какой процесс называется обратимым?
4. Что такое цикл?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Для какого физического газа можно применить модель «идеальный газ»?
7. Какому уравнению подчиняется состояние идеального газа? Напишите его.
8. Дайте определение теплоемкости тела.
9. Дайте определение удельной теплоемкости.
10. Напишите формулу для теплоемкости при постоянном объеме.
11. Напишите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном давлении.
12. Что такое число степеней свободы? Чему оно равно для одноатомной молекулы?
13. Что такое показатель адиабаты?
14. Напишите формулу связи показателя адиабаты с числом степеней свободы молекулы идеального газа.
15. Дайте определение адиабатического процесса.
16. Напишите уравнение адиабатического процесса.
17. Дайте определение изопротесса. Перечислите известные изопротессы.
18. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изотермического процесса.
19. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изобарического процесса.
20. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изохорического процесса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.1, §93,98,99). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите мышью кнопки «Термо», «Распределение Максвелла», «Физика» на экране. Запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с компьютерной моделью, описывающей поведение молекул идеального газа
- * Экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.
- * Экспериментальное определение массы молекул в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ВЕРОЯТНОСТЬЮ P_i получения некоторого результата измерения называется предел отношения количества измерений, давших этот результат, (N_i) к полному числу измерений N , когда $N \rightarrow \infty$.

ЭЛЕМЕНТАРНОЙ вероятностью dP_v при измерении величины скорости v называется вероятность наличия скорости величиной от v до $v + dv$. Эта вероятность пропорциональна приращению скорости dv : $dP_v = F(v) dv$, где коэффициент пропорциональности $F(v)$ называется **ФУНКЦИЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ** молекул по величине скорости. Она может быть выражена через другие функции распределения

$F(v) = \varphi(v_x) \cdot \varphi(v_y) \cdot \varphi(v_z) \cdot 4\pi v^2 = f(v) \cdot 4\pi v^2$, где $\varphi(v_x)$, $\varphi(v_y)$ и $\varphi(v_z)$ - функции распределения для соответствующих проекций скоростей молекул, а $f(v)$ - их произведение.

В §98 вы можете найти вывод формул, в частности

$$F(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} 4\pi v^2.$$

$$\text{СРЕДНЯЯ скорость } \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

$$\text{СРЕДНЯЯ квадратичная скорость } v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

НАИВЕРОЯТНЕЙШЕЙ называется скорость $v_{\text{ВЕР}}$, при которой $F(v)$ имеет максимум:

$$v_{\text{ВЕР}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок на экране монитора и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Нажмите мышью кнопку «Старт» сверху экрана. Внимательно рассмотрите изображение на экране монитора компьютера. Обратите внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева на экране. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Их количество около 100 и данная система является хорошей “механической” моделью идеального газа. В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки “Pause” на клавиатуре компьютера) и получать как бы “мгновенные фотографии”, на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости v (т.е., имеющие скорости от v до $v+\Delta v$).

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Определение диапазона скоростей молекул Δv , которые регистрируются на “мгновенной фотографии” в левом экране в виде более ярко светящихся зеленых точек.

Для этого щелкая мышью по стрелке (<) на регуляторе диапазона, переместите метки диапазона в крайнее левое положение ($v=0$). Затем, щелкая мышью по стрелке (>) на регуляторе диапазона, подсчитайте количество щелчков N , потребовавшихся для перемещения меток диапазона до максимального значения скорости v_{MAX} на оси абсцисс. Далее используйте формулу $\Delta v = v_{MAX} / N$.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Исследование распределения молекул по скоростям.

Задайте температуру T_1 , указанную в таблице 1 для вашей бригады. Устанавливая метки диапазона скоростей вблизи заданных в таблице 2 значений скорости молекул, нажимайте клавишу “Pause” и подсчитывайте на “мгновенной фотографии” количество молекул ΔN , скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости молекул v . Результат запишите в таблицу 2. Нажмите кнопку <ПУСК> и через несколько секунд получите еще одну мгновенную фотографию (нажав клавишу “Pause”) и подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результаты 5 измерений для каждой скорости запишите в таблицу 2. Затем измените скорость и сделайте по 5 измерений для каждой скорости, указанной в табл.2.

Затем установите вторую температуру T_2 из табл.1 и повторите измерения, записывая результат в таблицу 3, аналогичную табл.2.

ТАБЛИЦА 1. Примерные значения температуры (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
T_1	150	200	250	300	350	400	450	500
T_2	700	740	770	800	840	870	900	930

ТАБЛИЦЫ 2,3 Результаты измерений при T = ____ К

$v[\text{км/с}] =$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
ΔN_1							
ΔN_2							
ΔN_3							
ΔN_4							
ΔN_5							
ΔN_{CP}							

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицы средние значения количества частиц ΔN_{CP} , скорости которых лежат в данном диапазоне от v до $v + \Delta v$.

Постройте на одном рисунке графики экспериментальных и теоретических зависимостей $\Delta N_{\text{CP}}(v)$. Теоретические зависимости можно срисовать с экрана монитора компьютера, подобрав соответствующий масштаб по вертикальной оси ординат.

Для каждой температуры определите экспериментальное значение наивероятнейшей скорости молекул $v_{\text{ВЕР}}$.

Постройте график зависимости квадрата наивероятнейшей скорости от температуры $v_{\text{ВЕР}}^2$ ()

По данному графику определите значение массы молекулы

$$m = 2k \frac{\Delta(T)}{\Delta(v_{\text{ВЕР}}^2)}$$

Подберите газ, масса молекулы которого достаточно близка к измеренной массе молекулы.

Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

Табличные значения

Газ	Водород	Гелий	Неон	Азот	Кислород
Масса молекулы 10^{-27} кг	3.32	6.64	33.2	46.5	53.12

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.
2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.
3. Что такое функция распределения?
4. Как связаны функции распределения величины и проекции скорости?
5. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости молекул идеального газа?

6. Как вычисляется среднее значение некоторой физической величины A , если известна ее функция распределения $f(A)$?
7. Напишите формулу для вычисления среднего значения скорости молекул.
8. Напишите формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул.
9. Напишите условие для вычисления наиболее вероятной скорости молекул.
10. Напишите выражение для средней скорости молекул идеального газа.
11. Напишите выражение для средней квадратичной скорости молекул идеального газа.
12. Напишите выражение для наиболее вероятной скорости молекул идеального газа.
13. Вычислите на сколько процентов отличаются средняя и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа.
14. Вычислите на сколько процентов отличаются средняя и наиболее вероятная скорости молекул идеального газа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_3 ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.1, §128, §130). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите мышью кнопки «Термо», «Диффузия», «Физика» на экране. Запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- * Знакомство с компьютерной моделью, описывающей диффузию молекул идеального газа
- * Экспериментальное подтверждение закона диффузии.
- * Экспериментальное определение средней скорости теплового движения частиц в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

При нарушении равновесия макросистема стремится вернуться в равновесное состояние.

ЯВЛЕНИЯМИ ПЕРЕНОСА называются процессы, связанные с возникновением в веществе НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕНОСА (потока) массы, импульса или внутренней энергии.

ДИФФУЗИЯ есть процесс установления внутри фаз вещества равновесного распределения концентраций, который обеспечивается направленным переносом массы этого вещества. Диффузия обусловлена тепловым движением молекул и проявляется в самопроизвольном выравнивании концентраций в смеси нескольких веществ.

САМОДИФФУЗИЯ имеет место при самопроизвольном выравнивании концентрации однородного вещества, если по некоторым причинам равновесное распределение концентрации было нарушено.

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА λ есть среднее расстояние, пролетаемое частицей между двумя последовательными столкновениями. ЭФФЕКТИВНЫЙ ДИАМЕТР частицы есть минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух сталкивающихся частиц.

Если в начальный момент времени имеет место неоднородное распределение плотности вещества ρ вдоль только одной оси (например, OX), тогда возникает ОДНОМЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ, связанная с переносом массы M вдоль этой оси OX. Для двухкомпонентной системы (например, смеси двух газов) одномерная диффузия описывается первым законом Фика:

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dS \cdot dt,$$

где dM - масса одного компонента (индексы для характеристик данного компонента пропущены), которая переносится за время dt через элементарную площадку, перпендикулярную оси OX, имеющую площадь dS , в направлении

убывания плотности этого компонента, $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности первого компонента, D – коэффициент диффузии.

Для смеси «красных» и «зеленых» частиц, имеющих одинаковую массу m каждой частицы, $dM = m \cdot dN$, $\rho = m \frac{N}{V}$, а $\frac{d\rho}{dx} = m \frac{dN}{V dx}$, где dN – количество

частиц, проходящих через dS за время dt , которое равно $dN = -D \frac{\Delta N}{\Delta X V} dS dt$,

где разность числа частиц в левом и правом сосудах $\Delta N = N_2 - N_1$, $N_2 = N_0 - N(t)$, $N_1 = N(t)$, $\Delta X = L_{\text{отв}}$, объем сосуда $V = 20 \text{ см}^3$, dS есть площадь отверстия. Решаем уравнение методом разделения переменных:

$\frac{dN}{N_0 - 2N(t)} = -D \frac{S_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}} V} dt$. Интегрируем слева от 0 до $N(t)$, а справа – от 0 до t и получаем:

$$\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right) = -\frac{2DS_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}}V}t \quad \text{или} \quad N(t) = \frac{N_0}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2DS_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}}V}t\right)\right].$$

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок на экране монитора. Зарисуйте необходимое в конспект.

Обратите внимание на 2 системы частиц, находящихся в начальный момент в левом (зеленые) и в правом (красные) объемах. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Количество частиц N_0 каждой компоненты равно 100 и данная система является хорошей “механической” моделью идеального газа.

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана.

В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки “Pause” на клавиатуре компьютера) и получать как бы “мгновенные фотографии”. Для продолжения наблюдений надо нажать пробел. Количество частиц подсчитывается автоматически и высвечивается над соответствующими столбиками.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ:

ЭКСПЕРИМЕНТ. Исследование диффузии частиц через тонкую трубку, соединяющую два объема.

Нажмите кнопку <СТАРТ> и через Δt секунд после начала процесса нажмите клавишу “Pause” на клавиатуре компьютера и результат запишите в таблицу 2. Нажмите кнопку <ПУСК> и через Δt секунд получите еще одну “мгновенную фотографию” (нажав клавишу “Pause”) и записав количество частиц.

Затем установите второе значение диаметра соединительной трубки d_2 из

табл.1 и повторите измерения, записывая результат в таблицу 3, аналогичную табл.2.

ТАБЛИЦА 1. Значения диаметров соединительной трубки, длительности промежутка измерения и сорта частиц.

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
d ₁ , мм	2	2	3	3	2	2	3	3
d ₂ , мм	4	4	5	5	4	4	5	5
Δt, с	10	10	10	10	15	15	15	15
Сорт	красн	зелен	красн	зелен	красн	зелен	красн	зелен
Объем	слева	справа	слева	справа	слева	справа	слева	справа

ОБРАЗЕЦ ТАБЛИЦ 2,3 для записи результатов:

t[с]=	Δt	2Δt	3Δt	4Δt	5Δt	6Δt	7Δt	8Δt	9Δt	10Δt	>>>>
N(t)=											
$1 - \frac{2N(t)}{N_0}$											
$\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)$											

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

Вычислите и запишите в таблицы все указанные значения.

Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей

$$-\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right) = f(t) \text{ и, используя формулу } D = -\frac{2L_{\text{отв}}V}{\pi d^2} \frac{\Delta\left(\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)\right)}{\Delta t}, \text{ оп-}$$

ределите по графикам коэффициенты диффузии для каждого отверстия. Длину отверстия L_{отв} измерьте линейкой на экране монитора, объем сосуда V = 20 см³.

Найдите среднее значение коэффициента диффузии и, используя соотношение $D = \frac{1}{3}v_{\text{ср}}\lambda_{\text{ср}}$, найдите среднюю скорость теплового движения v_{ср} частиц (λ_{ср} = 2 см).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что происходит с макросистемой при нарушении равновесия?
2. Дайте определение явления переноса.
3. Назовите примеры явлений переноса.
4. Дайте определение явления диффузии.
5. Чем обусловлена диффузия?
6. В чем проявляется диффузия?

7. Какая диффузия называется одномерной?
8. Что такое самодиффузия?
9. Напишите уравнение одномерной диффузии для двухкомпонентной системы газов.
10. Каков физический смысл коэффициента диффузии.
11. Что такое плотность тела?
12. Что такое концентрация молекул (частиц)?
13. Дайте определение градиента плотности в общем случае.
14. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси Ox .
15. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси Oy .
16. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси Oz .
17. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется вдоль осей Ox и Oy .
18. Что такое длина свободного пробега частицы?
19. Что такое эффективный диаметр и эффективное сечение частицы?
20. Какое уравнение связывает среднюю скорость с коэффициентом диффузии?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4_4
**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКОГО
ГАЗА**

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т.1, §91, §123, §124). Запустите программу PHYSICS\BOOKS.exe. Нажмите мышью кнопки «Термо», «Изотермы реального газа», «Физика». Запишите необходимое в свой конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

* Знакомство с компьютерной моделью, описывающей вещество в газообразном состоянии и его переход в жидкое состояние.

* Экспериментальное подтверждение закономерностей поведения реального газа.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ФИЗИЧЕСКИМ газом называется вещество, находящееся в газообразном состоянии.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ» это название модели, описывающей физический газ, находящийся в сильно разреженном состоянии (при не слишком больших давлениях и достаточно высоких температурах). Уравнением, связывающим параметры состояния идеального газа, является уравнение Менделеева-Клапейрона. Поэтому оно имеет второе название: УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. Его вид известен: $pV = \nu RT$, где p - давление газа, V - объем газа, ν - количество киломолей, R - универсальная газовая постоянная, T - температура газа.

Более точная модель физического (реального) газа была предложена Ван-дер-Ваальсом. Она также является приближенной, но лучше описывает процессы, нежели модель «идеальный газ». ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКИМ (ВдВ) называется воображаемый газ (модель), параметры состояния которого точно

подчиняются уравнению $\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT$.

Оно называется УРАВНЕНИЕМ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА. Здесь a и b - константы Ван-дер-Ваальса.

ДОБАВКА К ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ (a) обусловлена взаимным притяжением молекул друг к другу.

ПОПРАВКА К ОБЪЕМУ (b) характеризует ту часть объема, которая недоступна для движения молекул. Она равна нескольким суммарным объемам молекул, содержащихся в газе.

ИЗОТЕРМОЙ называется зависимость давления от объема данного (фиксированного) количества вещества при постоянной температуре.

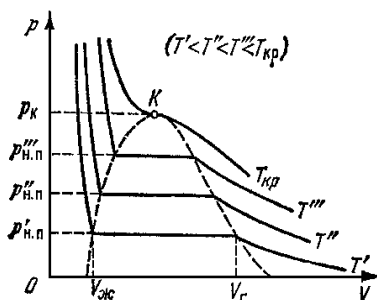


Рис.1

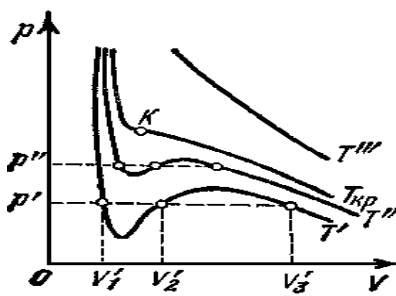


Рис.2

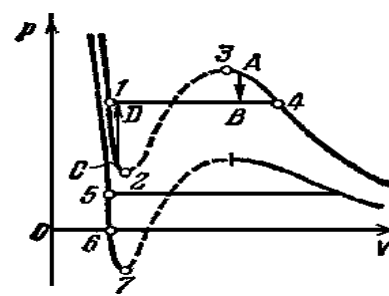


Рис.3

На рис.1 приведены изотермы некоторого физического (реального) газа, а на рис.2 и рис.3 - изотермы ВдВ газа (взяты из учебника [1]).

ИЗОТЕРМА ВдВ газа, имеющая только точку перегиба и не имеющая экстремумов, называется КРИТИЧЕСКОЙ. Температура критической изотермы называется КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ. Объем и давление в критической точке также называются КРИТИЧЕСКИМИ.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ:

$$V_{\text{кр}} = 3b, \quad p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27R \cdot b}. \quad \text{Отсюда } A = \frac{p_{\text{кр}} V_{\text{кр}}}{RT_{\text{кр}}} = \frac{3}{8} v = 0.375v.$$

При температуре выше критической вещество может находиться только в ГАЗООБРАЗНОМ состоянии. При температуре ниже критической вещество может находиться как в газообразном, так и в жидком состоянии.

ЖИДКОЕ состояние описывается левыми (по отношению к точке перегиба) частями графиков на рисунках и характерно тем, что небольшое уменьшение объема вещества может произойти только при резком увеличении давления (жидкость практически несжимаема).

Изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа на участках, соответствующих однофазным состояниям вещества.

Рис.3 разъясняет поведение вещества при разных внешних условиях. В области, где присутствуют 2 фазы (1-2-3-4) S-образный завиток изотермы ВдВ заменяется горизонтальным участком (1-4) реальной изотермы (см.учебник).

НЕРЕАЛИЗУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ соответствует участку 2-3, на котором сжимаемость $\beta = \frac{dV}{dP}$ вещества была бы отрицательна, что невозможно.

ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЙ ПАР на участке 3-4 реализуется при определенных условиях (при практическом отсутствии центров конденсации и внешних воздействий).

ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ на участке 1-2 реализуется при отсутствии примесей, способных быть центрами кипения.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрите внимательно рисунок на экране монитора и зарисуйте необходимое в свой конспект.

Нажмите мышью кнопку «Старт» вверху экрана. Поработайте с моделью. **Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

ИЗМЕРЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Щелкните левой кнопкой мыши на кнопке «Выбор температуры».

Подведите маркер мыши к верхней границе столбика на регуляторе температуры и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте границу столбика до тех пор, пока на правом экране не появится критическая изотерма с точкой перегиба и без экстремумов.

Запишите в свой конспект значения критических параметров $T_{кр}$, $V_{кр}$, $p_{кр}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМ ГАЗА ВДВ.

1. Установите значение температуры, указанное первым в таблице начальных значений для вашей бригады. Нажмите мышью кнопку <СТАРТ> на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием клавиши “Pause” на клавиатуре компьютера. Последующий запуск процесса осуществляется нажатием пробела.

После остановки процесса запустите его снова, нажав клавишу пробела на клавиатуре компьютера, и останавливайте, нажимая клавишу “Pause”, когда крестик на теоретической изотерме (красная кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 100, 120, 140, 160, 180 и 200 см³ (6 значений), записывая при остановке значения в таблицу 2).

Установив новое значение температуры T из таблицы 1, задавая $V_{нач} = 100$ см³, повторите измерения, записывая результаты в таблицы 3,4,5.

ТАБЛИЦА 1. Примерные значения температуры (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
T_1	500	505	510	515	480	485	490	495
T_2	600	605	610	615	580	585	590	595
T_3	680	685	690	695	660	665	670	675
T_4	730	735	740	745	710	715	720	725

ТАБЛИЦЫ 2,3,4,5 Результаты измерений при $T = \underline{\hspace{2cm}}$ К

$V[\text{см}^3]$						
$p[\text{кПа}]$						
$1/V [\text{м}^{-3}]$						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:

По измеренным значениям критических параметров вычислите константу

$$A = \frac{RT_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}} V_{\text{кр}}}.$$

Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей давления от обратного объема для начальных точек всех изотермических процессов (указав на них температуры).

Для каждой изотермы определите значение количества вещества, используя
$$\nu = \frac{1}{RT} \frac{\Delta(p)}{\Delta(\frac{1}{V})}.$$

Вычислите среднее значение ν . Запишите ответы для A и ν и проанализируйте ответы и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое физический газ?
2. Перечислите все известные агрегатные состояния вещества.
3. Что такое идеальный газ?
4. При каких условиях физический газ можно описывать моделью идеальный газ?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Как выглядит уравнение состояния идеального газа? Каково его второе название?
7. Что такое газ Ван-дер-Ваальса?
8. Как выглядит уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса? Каково его второе название?
9. Что такое константы Ван-дер-Ваальса?
10. Что определяет первая константа Ван-дер-Ваальса?
11. Что определяет вторая константа Ван-дер-Ваальса?
12. Что такое изотерма?
13. Что такое критическая изотерма?
14. Каковы особенности поведения газа при температуре, выше критической?
15. Каковы особенности поведения газа при температуре, ниже критической?
16. На каких участках изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. М.: «Наука», 1982.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.: «Наука», 1978.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. М.: «Наука», 1979.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	γ или G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н м}^2 \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9.8	м с^{-2}
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	м с^{-1}
Постоянная Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{26}$	кмоль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	$8.31 \cdot 10^3$	$\text{Дж кмоль}^{-1} \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	Дж К^{-1}
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Постоянная Фарадея	F	$9.65 \cdot 10^4$	Кл моль^{-1}
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$	Ф м^{-1}
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Гн м^{-1}
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	Дж с

ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	10^{-1}
санти	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}