

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания по дисциплине
Физика

Направление подготовки/специальность	<u>28.03.02 Наноинженерия</u>
Направленность (профиль)/специализация	<u>Нанотехнологии и наноматериалы</u>
Форма обучения	<u>очная</u>
Год начала обучения	<u>2026</u>
Изучается в 2,3 семестре	

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАЗДЕЛ 1 МЕХАНИКА	4
ТЕМА 1. МЕХАНИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ	4
РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	8
ТЕМА 2. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ, ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ, ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА, ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ.....	8
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	17
ТЕМА 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА, ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.....	17
ТЕМА 4. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	25
ТЕМА 5. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА, ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ.....	29
РАЗДЕЛ 4. ОПТИКА.....	33
ТЕМА 6. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ	33
ТЕМА 7. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА, ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА	35
ТЕМА 8. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА	43
РАЗДЕЛ 5. ФИЗИКА АТОМА И ЯДРА	45
ТЕМА 9. МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА, СТРОЕНИЕ И СПЕКТРЫ АТОМОВ.....	45
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	59
ВВЕДЕНИЕ.....	63
ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	65
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ.....	69

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность учебной дисциплины «Физика» обусловлена необходимостью формирования у будущих специалистов общепрофессиональных компетенций, практических умений на которых базируется профессиональная деятельность в физике. В современных условиях важнейшим элементом подготовки бакалавров в области физики является формирование у них самостоятельности и культуры научного мышления, способности вести научную и профессиональную деятельность, навыков постановки целей, задач при решении проблемных ситуаций.

Основные задачи дисциплины:

- приобретение знаний о методах научного познания природы; о современной физической картине мира; свойствах вещества и поля; об основах фундаментальных физических теорий; пространственно-временных закономерностях; динамических и статистических законах природы; элементарных частицах и фундаментальных взаимодействиях; строении и эволюции вселенной;

- овладение умениями проводить наблюдения, планировать и выполнять эксперименты, обрабатывать результаты экспериментов, применять теоретические знания при решении задач;

- воспитание убежденности о необходимости разумного использования достижений науки и технологий для дальнейшего развития общества; отношения к физике как элементу общечеловеческой культуры;

- применение знаний по физике для объяснения явлений природы, принципов работы технических устройств, самостоятельного приобретения знаний, использования современных информационных технологий для поиска, переработки и представления информации по физике.

РАЗДЕЛ 1 МЕХАНИКА

ТЕМА 1. МЕХАНИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель

Рассмотреть кинематику поступательного движения материальной точки. Рассмотреть динамику поступательного и вращательного движения материальной точки и твердого тела. Дать определение понятию «работа». Рассмотреть работу постоянной и переменной силы. Дать определение понятию «мощность». Рассмотреть связь работы и мощности.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Кинематическое уравнение движения материальной точки по прямой (ось x) имеет вид $x = A + Bt + Ct^3$, где $A = 4$ м, $B = 2$ м/с, $C = -0,5$ м/с². Для момента времени $t_1 = 2$ с определить:

- 1) координату x_1 точки
- 2) мгновенную скорость v_1 ,
- 3) мгновенное ускорение a_1 .

Решение: 1. Координату точки, для которой известно кинематическое уравнение движения, найдем, подставив в уравнение движения вместо t заданное значение времени t_1 :

$$x = A + Bt + Ct^3$$

Подставим в это выражение значения A , B , C , t_1 и произведем вычисления:

$$x_1 = 4 \text{ м}$$

2. Мгновенную скорость в произвольный момент времени найдем, продифференцировав координату x по времени: $v = \frac{dx}{dt} = B + 3Ct^2$

Тогда в заданный момент времени t_1 мгновенная скорость

$$v_1 = B + 3Ct_1^2$$

Подставим сюда значения B , C , t_1 и произведем вычисления:

$$v_1 = -4 \text{ м/с}$$

Знак минус указывает на то, что в момент времени $t_1 = 2$ с точка движется в отрицательном направлении координатной оси.

3. Мгновенное ускорение в произвольный момент времени найдем, взяв вторую производную от координаты x по времени: $a = \frac{d^2x}{dt^2} = 6Ct$

Мгновенное ускорение в заданный момент времени t_1 равно $a_1 = 6Ct_1$. Подставим значения C , t_1 и произведем вычисления:

$$a_1 = -6\text{м}/\text{с}^2$$

Знак минус указывает на то, что направление вектора ускорения совпадает отрицательным направлением координатной оси, причем в условиях данной задачи это имеет место для любого момента времени.

Задача 1. Две прямые дороги пересекаются под углом $\alpha = 60^\circ$. От перекрестка по ним удаляются машины: одна со скоростью $v_1 = 60$ км/ч, другая со скоростью $v_2 = 80$ км/ч. Определить скорости v' и v'' , с которыми одна машина удаляется от другой. Перекресток машины прошли одновременно.

Задача 2. Материальная точка движется по плоскости согласно уравнению $\vec{r}(t) = \vec{i}At^3 + \vec{j}Bt^2$. Написать зависимости: 1) $\vartheta(t)$; 2) $\alpha(t)$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называют радиус–вектором?
2. Дайте определение мгновенной скорости
3. Что называют нормальным ускорением? Как его определить
4. Запишите кинематическое уравнение равномерного вращения
5. Как связаны линейная и угловая скорости
6. Что называют ортой?
7. Дайте определение ускорения
8. Запишите кинематическое уравнение равнопеременного движения вдоль оси x
9. Дайте определение мгновенной угловой скорости
10. Как вычислить путь пройденный точкой по дуге окружности радиусом R
11. Дайте определение средней скорости
12. Как найти ускорение при криволинейном движении?
13. Как найти скорость точки при равнопеременном движении?
14. Запишите кинематическое уравнение равнопеременного движения?
15. Как связаны линейная и угловая скорости?
16. Дайте определение средней путевой скорости
17. Что называют тангенсальным ускорением? Как его определить
18. Запишите кинематическое уравнение равномерного вращения
19. Дайте определение средней угловой скорости

20. Запишите кинематическое уравнение равнопеременного движения

Задача 1. Тело прошло первую половину пути за время $t_1=2$ с, вторую – за время $t_2 = 8$ с. Определить среднюю путевую скорость $\langle v \rangle$ тела, если длина пути $S = 20$ м.

Задача 2. За время $t = 6$ с точка прошла путь, равный половине длины окружности радиусом $R = 0,8$ м. Определить среднюю путевую скорость $\langle v \rangle$ за это время и модуль вектора средней скорости $|\langle v \rangle|$

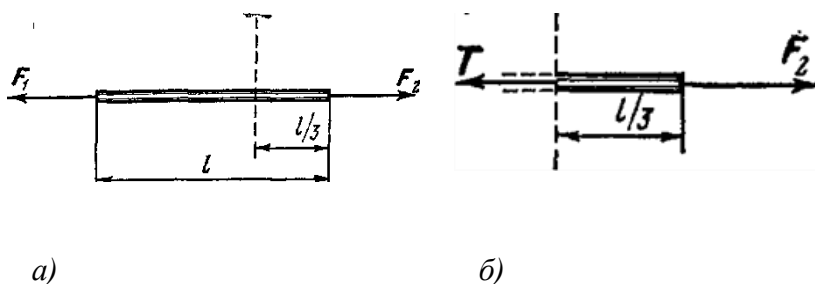
ТЕМА 2. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Цель

Дать определение понятию «импульс тела». Сформулировать закон сохранения импульса. Дать определение понятию «момент импульса». Дать определение понятиям «кинетическая энергия», «потенциальная энергия» и «полная механическая энергия». Сформулировать законы сохранения энергии. Сформулировать закон сохранения момента импульса тела. Рассмотреть вопросы о симметрии в природе.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. К концам однородного стержня приложены две противоположно направленные силы: $F_1 = 40$ Н и $F_2 = 100$ Н. Определить силу натяжения T стержня в поперечном сечении, которое делит стержень на две части в отношении 1:2.



Решение. Если бы силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ были направлены между собой, то сила натяжения в любом сечении стержня была бы одинаковой и равной

силам, приложенным к концам стержня. Стержень в этом случае находился бы в покое. Но так как сумма сил, действующих на стержень, отлична от нуля, то стержень будет двигаться с ускорением, величина и направление которого определяются по второму закону Ньютона:

$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{m}$, где m – масса стержня. Так как обе силы действуют вдоль прямой, то геометрическую сумму можно заменить алгебраической:

$$a = \frac{F_1 + F_2}{m} \quad (1)$$

При ускоренном движении стержня силы натяжения в разных сечениях различны. Для определения этих сил применим следующий прием: разделим стержень на две части в интересующем нас сечении и отбросим одну из них, например, левую. Действие левой части на правую заменим силой натяжения T (рис б). В результате действия разности сил $F_2 - T$ оставшаяся правая часть стержня массой m_1 должна двигаться с ускорением $a = \frac{F_2 - T}{m_1}$ равным по величине и направлению прежнему ускорению, выражаемому формулой

(1). Так как стержень однородный, то $m_1 = \frac{m}{3}$ и, следовательно,

$$a = \frac{F_2 - T}{\frac{m}{3}} \quad (2)$$

Приравнявая правые части равенства (1) и (2) и выражая из полученного равенства силу натяжения T , находим: $T = F_2 - \frac{F_2 - F_1}{3}$

Подставив значения F_1 и F_2 , получим

$$T = 80 \text{ Н.}$$

Задача 1. Лодка с двумя пассажирами равномерно плывёт по озеру со скоростью $v_1 = 2 \text{ м/с}$. Один человек прыгнул с кормы лодки так, что его скорость относительно воды оказалась равной нулю. Затем аналогичный прыжок совершил 2-ой человек (и его скорость относительно воды оказалась равной 0). С какой скоростью v_2 стала двигаться лодка, если её масса в 2 раза больше массы каждого пассажира.

Задача 2. Ракета, масса которой без заряда $M = 600 \text{ г}$, при сгорании $m = 80 \text{ г}$ пороха взлетает на высоту $h = 180 \text{ м}$. Определите скорость выхода из ракеты пороховых газов. Считать, что порох сгорает на старте мгновенно

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Импульс силы – это Формула и в чем измеряется
2. Что называют абсолютно упругим ударом?
3. Запишите закон сохранения импульса замкнутой системы при абсолютно неупругом ударе
4. Мощность – это Формула и в чем измеряется
5. Потенциальная энергия – это....
6. Как определить импульс системы тел?
7. Что называют абсолютно неупругим ударом?
8. Какое движение называют реактивным?

9. Запишите закон сохранения механической энергии
10. Сформулируйте второй закон Ньютона
11. Направление каких векторов совпадает с направлением силы и ускорения?
12. Запишите закон сохранения импульса замкнутой системы при абсолютно упругом ударе
13. Механическая работа – это... Формула и в чем измеряется
14. Кинетическая энергия – это... Формула и в чем измеряется

Задача 1. Конькобежец массой $M=50$ кг бросает горизонтально шайбу массой $m=200$ г со скоростью $v=20$ м/с. На какое расстояние откатится конькобежец после броска шайбы? Коэффициент трения коньков о лёд $k=0,02$.

Задача 2. Верёвка длиной $L=4$ м и массой $m=0,5$ кг свешивается вертикально с края крыши. Какую работу необходимо совершить, чтобы поднять верёвку на крышу?

РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕМА 6. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Цель

Рассмотреть экспериментальное обоснование молекулярно-кинетической теории вещества. Сформулировать законы поведения разреженных газов. Дать определение понятиям «теплота» и «работа». Дать определение понятию «теплоемкость»

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Найти молярную массу M смеси кислорода массой $m_1 = 25$ г и азота массой $m_2 = 75$ г.

Решение:. Молярная масса смеси $M_{\text{см}}$ есть отношение массы смеси $m_{\text{см}}$ к количеству вещества смеси $\nu_{\text{см}}$, т. е.:

$$M_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{\nu_{\text{см}}} \quad (1)$$

Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси $m_{\text{см}} = m_1 + m_2$ Количество вещества смеси равно сумме количеств вещества компонентов.

Подставив в формулу (1) выражения $m_{\text{см}}$ и $\nu_{\text{см}}$, получим

$$M_{\text{см}} = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}} \quad (2)$$

Найдем молярные массы M_1 кислорода и M_2 , азота:

$M_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Подставим значения величин во (2) и произведем вычисления: $M_{\text{см}} = 28,9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

Задача 1. В сосуде вместимостью $V = 20$ л находится газ количеством вещества $\nu = 1,5$ кмоль. Определить концентрацию n молекул в сосуде.

Задача 2. Идеальный газ находится при нормальных условиях в закрытом сосуде. Определить концентрацию n молекул газа.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называют концентрацией частиц?
2. Как определить концентрацию частиц в заданном объеме?
3. Запишите основное уравнение кинетической теории газов. Дайте пояснение.
4. Как определить среднюю кинетическую энергию молекулы? Дайте пояснение.
5. Как определить полную энергию молекулы? Дайте пояснение.
6. Как определить энергию поступательного движения молекулы? Дайте пояснение.
7. Как определить энергию вращательного движения молекулы? Дайте пояснение.
8. Как связаны давление и концентрация молекул? Дайте пояснение.
9. Запишите среднюю квадратичную скорость. Дайте пояснение.
10. Запишите среднюю арифметическую скорость. Дайте пояснение.
11. Запишите наиболее вероятную скорость. Дайте пояснение.

Задача 1. В двух одинаковых по вместимости сосудах находятся разные газы: в первом – водород, во втором – кислород. Найти отношение n_2/n_1 концентраций газов, если массы газов одинаковы.

Задача 2. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения и среднее значение полной кинетической энергии молекулы водяного пара при температуре $T = 600$ К. Найти также кинетическую энергию W поступательного движения всех молекул пара, содержащего количество вещества $\nu = 1$ кмоль.

ТЕМА 7. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Цель

Рассмотреть модель идеального газа. Изучить уравнение состояния идеального газа. Сформулировать закон Больцмана. Изучить закон распределение Максвелла. Дать определение понятию «степени свободы». Рассмотреть «классический закон распределения энергии по степеням свободы». Дать определение понятию «теплоемкость». Рассмотреть особенности теплопередачи в газах.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. В баллоне объемом $V = 10$ л находится гелий под давлением $p_1 = 1$ МПа при температуре $T_1 = 300$ К. После того как из баллона был израсходован гелий массой $m = 10$ г, температура в баллоне понизилась до $T_2 = 290$ К. Определить давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

Решение: Для решения задачи воспользуемся уравнением Клапейрона – Менделеева, применив его дважды к начальному и конечному состояниям газа. Для начального состояния уравнение имеет вид:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1 \quad (1)$$

а для конечного состояния:

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} RT_2, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – массы гелия в начальном и конечном состояниях.

Выразим массы m_1 и m_2 гелия из уравнений (1) и (2):

$$m_1 = \frac{Mp_1V}{RT_1} \quad (3)$$

$$m_2 = \frac{Mp_2V}{RT_2} \quad (4)$$

Вычитая из (3) равенство (4), получим: $m = m_1 - m_2 = \frac{Mp_1V}{RT_1} - \frac{Mp_2V}{RT_2}$

Отсюда найдем искомое давление:

$$p_2 = \frac{RT_2}{MV} \left(\frac{Mp_1V}{RT_1} \right) = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m}{M} \frac{RT_2}{V} \quad (5)$$

Проверим, дает ли правая часть формулы (5) единицу давления. Для этого выразим все величины, входящие в нее, в соответствующих единицах. Единица, в которой выражается первое слагаемое, не вызывает сомнений, так как отношение $\frac{T_2}{T_1}$ – величина безразмерная.

Убедившись в том, что правая часть полученной расчетной формулы дает единицу искомой величины – давления, можем подставить в (5) значения всех величин и произвести вычисления.

В формуле (5) все величины, кроме молярной массы M гелия, известны. Найдем ее Для гелия как одноатомного газа относительная молекулярная масса равна его относительной атомной массе A_r .

Из таблицы Д. И. Менделеева найдем $A_r = 4$. Следовательно, молярная масса гелия $M = A_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 4 \cdot \frac{10^{-3} \text{кг}}{\text{моль}}$ Подставив значения величин в (5), получим:

$$p_2 = 364 \text{ кПа}$$

Задача 1. В цилиндр длиной $l=1,6$ м, заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении p_0 , начали медленно вдвигать поршень площадью $S = 200 \text{ см}^2$. Определить силу F , которая будет действовать на поршень, если его остановить на расстоянии $l_1 = 10$ см от дна цилиндра.

Задача 2. Колба вместимостью $V = 300 \text{ см}^3$, закрытая пробкой с краном, содержит разреженный воздух. Для измерения давления в колбе горлышко колбы погрузили в воду на незначительную глубину и открыли кран, в результате чего в колбу вошла вода массой $m = 292$ г. Определить первоначальное давление p в колбе, если атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Запишите уравнение состояния идеальных газов. Дайте пояснение.
2. Дайте определение понятию «изопроцесс».
3. Какие изопроцессы вам известны? Перечислите
4. Запишите уравнение изотермического процесса. Дайте пояснение
5. Запишите уравнение изохорного процесса. Дайте пояснение
6. Запишите уравнение изобарического процесса. Дайте пояснение
7. Запишите уравнение изотермического процесса. Дайте пояснение
8. Является адиабатический процесс изопроцессом. Дайте пояснение.
9. Запишите уравнение адиабатического процесса. Дайте пояснение.
10. Дайте определение понятию «энтропия».
11. Дайте определение понятию «энтальпия»
12. Дайте определение понятию «парциальное давление»?
13. Запишите закон Дальтона. Дайте пояснение.

Задача 1. Полый шар вместимостью $V = 10 \text{ см}^3$ заполненный воздухом при температуре $T_1 = 573 \text{ К}$, соединили трубкой с чашкой, заполненной ртутью. Определить массу m ртути,

вошедшей в шар при остывании воздуха в нем до температуры $T_2 = 293$ К. Изменением вместимости шара пренебречь.

Задача 2. Температуре $T_1 = 273$ К. На сколько изменится подъемная сила шара при повышении температуры до $T_2 = 293$ К? Считать вместимость V оболочки неизменной и внешнее давление нормальным. В нижней части оболочки имеется отверстие, через которое водород может выходить в окружающее пространство.

ТЕМА 8. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Цель

Рассмотреть столкновение молекул друг с другом. Дать определение понятию сечение рассеяния. Изучить характеристики соударений. Дать определение понятию «диффузия». Дать определение понятию «теплопроводность». Дать определение понятию «вязкое

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Два тонкостенных коаксиальных цилиндра длиной $l = 10$ см могут свободно вращаться вокруг их общей оси z . Радиус R большого цилиндра равен 5 см. Между цилиндрами имеется зазор размером $d = 2$ мм. Оба цилиндра находятся в воздухе при нормальных условиях. Внутренний цилиндр приводят во вращение с постоянной частотой $n_1 = 20$ с⁻¹. Внешний цилиндр заторможен. Определить, через какой промежуток времени с момента освобождения внешнего цилиндра он приобретет частоту вращения $n_2 = 1$ с⁻¹. При расчетах изменением относительной скорости цилиндров пренебречь. Масса m внешнего цилиндра равна 100 г.

Решение: При вращении внутреннего цилиндра слой воздуха увлекается им и начинает участвовать во вращательном движении. Вблизи поверхности этого цилиндра слой воздуха приобретает со временем практически такую же линейную скорость, как и скорость точек на поверхности цилиндра, т. е. $v = 2\pi n_1(R - d)$. Так как $d \ll R$, то приближенно можно считать

$$v \approx 2\pi n_1 R$$

(1)

Вследствие внутреннего трения момент импульса передается соседним слоям газа и в конечном счете внешнему цилиндру. За интервал времени Δt внешний цилиндр

Приобретает момент импульса $L = pR$, где p – импульс, полученный за Δt внешним цилиндром. Отсюда

$$p = L/R \quad (2)$$

С другой стороны:

$$p = \eta \frac{dp}{dz} S \Delta t \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость; $\frac{dp}{dz}$ – градиент скорости; S – площадь поверхности цилиндра ($S = 2\pi Rl$).

Приравняв правые части выражений (2) и (3) и выразив из полученного равенства искомый интервал Δt , получим: $\Delta t = \frac{L}{\eta R \frac{dp}{dz} S}$.

Найдем входящие в эту формулу величины L , $\frac{dp}{dz}$ и S . Момент импульса $L = J\omega_2$, где J – момент инерции цилиндра ($J = mR^2$); m – его масса; ω_2 – угловая скорость внешнего цилиндра ($\omega_2 = 2\pi n_2$). С учетом этого запишем

$$L = mR^2 \cdot 2\pi n_2 = 2\pi m n_2 R^2$$

Градиент скорости $\frac{dp}{dz} = \frac{p}{z} = \frac{p}{d} \frac{d\vartheta}{dz} = \frac{\vartheta}{z} = \frac{\vartheta}{d}$. Площадь цилиндра равна $S = 2\pi Rl$.

Подставив в (4) выражения L , $\frac{dp}{dz}$ и S , получим:

$$\Delta t = \frac{m d n_2}{\eta p l} \quad (4)$$

Заменив здесь ϑ по (1), найдем

$$\Delta t = \frac{m d n_2}{2\pi \eta R l n_1} \quad (5)$$

Динамическая вязкость воздуха $\eta = 17,2 \text{ мкПа} \cdot \text{с} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ (см. табл. 14).

Подставив в (5) значения входящих в нее величин и произведя вычисления, получим:

$$\Delta t = 18,5 \text{ с}$$

Задача 1. Определить зависимость динамической вязкости η от температуры T при следующих процессах: 1) изобарном; 2) изохорном. Изобразить эти зависимости на графиках.

Задача 2. Определить зависимость динамической вязкости η от давления p при следующих процессах: 1) изотермическом; 2) изохорном. Изобразить эти зависимости на графиках.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Запишите барометрическую формулу
2. Как определить коэффициент теплопроводности?
3. Сформулируйте закон Фика. Дайте пояснения
4. Что называют теплопроводностью?
5. Как определить импульс, переносимый молекулами из одного слоя газа в другой
6. Как определить коэффициент диффузии?
7. Сформулируйте закон Ньютона. Дайте пояснения
8. Что называют вязкостью?
9. Как определить среднее число соударений молекулы в единицу времени
10. Как определить динамическую вязкость газа?
11. Сформулируйте закон Фурье. Дайте пояснения
12. Что называют диффузией?

Задача 1. Два горизонтальных диска радиусами $R=20$ см расположены друг над другом так, что оси их совпадают. Расстояние d между плоскостями дисков равно $0,5$ см. Верхний диск неподвижен, нижний вращается относительно геометрической оси с частотой $n=10\text{с}^{-1}$. Найти вращающий момент M , действующий на верхний диск. Динамическая вязкость η воздуха, в котором находятся диски, равна $17,2$ мкПа·с.

Задача 2. Определить зависимость динамической вязкости η от давления p при следующих процессах: 1) изотермическом; 2) изохорном. Изобразить эти зависимости на графиках.

ТЕМА 9. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Цель

Дать определение понятию «внутренняя энергия». Изучить первое начало термодинамики. Рассмотреть применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Рассмотреть микро- и макросостояния термодинамической системы. Дать определение понятию «термодинамическая вероятность» макроскопического состояния. Дать определение понятию «энтропия». Рассмотреть формула Больцмана. Изучить второе начало термодинамики и его статистический смысл. Изучить третье начало термодинамики.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Вычислить удельные теплоемкости неона и водорода при постоянных объеме (c_v) и давлении (c_p), принимая эти газы за идеальные.

Решение. Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \quad (1)$$

$$c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M} \quad (2)$$

Для неона (одноатомный газ) $i_1 = 3$, $M_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Подставив в формулы (1) и (2) значения i_1 , M_1 и R и произведя вычисления, найдем:

$$c_{v1} = 624 \text{ Дж/(кг·К)}; c_{p1} = 1,04 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Для водорода (двухатомный газ) $i_2 = 5$, $M_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Вычисление по формулам (1) и (2) дает следующие значения удельных теплоемкостей водорода:

$$c_{v2} = 10,4 \text{ кДж/(кг·К)}; c_{p2} = 14,6 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Задача 1. В баллоне находятся аргон и азот. Определить удельную теплоемкость c_v смеси этих газов, если массовые доли аргона (ω_1) и азота (ω_2) одинаковы и равны $\omega=0,5$.

Задача 2. Водород занимает объем $V_1 = 10^3$ при давлении $p_1 = 100$ кПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления $p_2 = 300$ кПа. Определить: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) количество теплоты Q , сообщенное газу.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Запишите первое начало термодинамики при изотермическом процессе. Дайте пояснения
2. Как связаны молярная и удельная теплоемкости?
3. Как определить работу, направленную на изменение объема? Дайте пояснения.
4. Запишите первое начало термодинамики при адиабатном процессе. Дайте пояснения.
5. Запишите формулу Больцмана. Дать определение понятию
6. Дайте определение понятию «молярная теплоемкость»?
7. Запишите уравнение Майера. В чем заключается его физический смысл. Дайте пояснение.
8. Как определить работу газа при изотермическом процессе?
9. Запишите первое начало термодинамики при изобарном процессе. Дайте пояснения
10. Как определить молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении?

11. Как определить внутреннюю энергию газа?
12. Запишите первое начало термодинамики. Дайте пояснение.
13. Как определить удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении?
14. Как определить работу газа при изобарном процессе?
15. Запишите уравнение Пуассона. Дайте пояснения.
16. Как определить термический КПД? Дайте пояснения

Задача 1. Разность удельных теплоемкостей c_v и c_p , некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Найти молярную массу M газа - его удельные теплоемкости c_v и c_p

Задача 2. При изохорном нагревании кислорода объемом $V = 50$ л давление газа изменилось на $\Delta p = 0,5$ МПа. Найти количество теплоты Q , сообщенное газу.

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ТЕМА 11. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Цель

Дать определение понятию «электрический заряд». Сформулировать закон сохранения заряда. Сформулировать закон Кулона. Дать определение понятию «напряженность электрического поля». Сформулировать принцип суперпозиции. Дать определение понятию «электрический диполь». Рассмотреть поле диполя. Рассмотреть работу сил электростатического поля. Дать определение понятию «потенциал» и «разность потенциалов». Дать определение понятию «эквипотенциальные поверхности». Рассмотреть проводники и диэлектрики. Рассмотреть полярные и неполярные молекулы в электрическом поле. Дать определение понятию «поляризация диэлектриков». Рассмотреть пьезоэлектрический эффект. Рассмотреть сегнетоэлектрики и их свойства. Дать определение понятию «электрострикция». Рассмотреть проводники в электрическом поле. Дать определение понятию «емкость проводников». Изучить устройство конденсаторы. Рассмотреть типы соединений конденсаторов. Дать определение понятию «энергия электрического поля».

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Положительные заряды $Q_1 = 3$ мкКл и $Q_2 = 20$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $r_1 = 1,5$ м друг от друга. Определить работу A , которую надо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния $r_2 = 1$ м.

Решение: Положим, что первый заряд Q_1 остается неподвижным, а второй Q_2 под действием внешних сил перемещается в поле, созданном зарядом Q_1 , приближаясь к нему с расстояния $r_1 = 1,5$ м до $r_2 = 1$ м.

Работа A' внешней силы по перемещению заряда Q из одной точки поля с потенциалом φ_1 в другую, потенциал которой φ_2 , равна по модулю и противоположна по знаку работе A сил поля по перемещению заряда между теми же точками:

$$A' = -A.$$

Работа A сил поля по перемещению заряда $A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Тогда работа A' внешних сил может быть записана в виде

$$A' = -Q(\varphi_1 - \varphi_2) = Q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1)$$

Потенциалы точек начала и конца пути выразятся формулами

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}; \varphi_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

Подставляя выражения φ_1 и φ_2 в формулу (1) и учитывая, что для данного случая переносимый заряд $Q = Q_2$, получим:

$$A' = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

Если учесть, что $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$, то после подстановки значений величин в формулу (2) и вычисления найдем

$$A' = 180 \text{ мкДж.}$$

Задача 1. Плоский воздушный конденсатор емкостью $C = 1,11 \text{ нФ}$ заряжен до разности потенциалов $U = 300 \text{ В}$. После отключения от источника тока расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в пять раз. Определить: 1) разность потенциалов U на обкладках конденсатора после их раздвижения; 2) работу A' внешних сил по раздвижению пластин.

Задача 2. Перпендикулярно плечу диполя с электрическим моментом $p = 12 \text{ пКл} \cdot \text{м}$ возбуждено однородное электрическое поле напряженностью $E = 300 \text{ кВ/м}$. Под действием сил поля диполь начинает поворачиваться относительно оси, проходящей через его центр. Найти угловую скорость ω диполя в момент прохождения им положения равновесия. Момент инерции J диполя относительно оси, перпендикулярной плечу и проходящей через его центр, равен $2 \cdot 10^{-11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Опыт Милликена. Элементарный электрический заряд.
2. Сформулируйте закон Кулона. Запишите формулу. Дайте пояснения.
3. Запишите закон сохранения заряда. Дайте пояснения.
4. Дайте определение понятию «Напряженность электрического поля». Дайте пояснение.
5. Как определить силу, действующую на точечный заряд Q , помещенный в электрическое поле. Запишите формулу. Дайте пояснение.
6. Дайте определение понятию «поток вектора напряженности E электрического поля». Запишите формулу. Дайте пояснение.

7. Сформулируйте теорему Остроградского – Гаусса. Запишите формулу. Дайте пояснение.
8. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
9. Как определить напряженность поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью? Запишите формулу. Дайте пояснение.
10. Как определить напряженность электрического поля, создаваемого металлической сферой? Запишите формулу. Дайте пояснение.
11. Как определить напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом? Запишите формулу. Дайте пояснение.
12. Дайте определение понятию «электрическое смещение»
13. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности электрического поля. Запишите формулу. Дайте пояснение.
14. Дайте определение понятию «потенциал электрического поля»
15. Как определить энергию W взаимодействия системы точечных зарядов?
16. Запишите связь потенциала с напряженностью электрического поля.
17. Как определить работу, совершаемую электрическим полем при перемещении точечного заряда?
18. Дайте определение понятию «диполь». Запишите формулу. Дайте пояснение.
19. Дайте определение понятию «электрический момент диполя». Запишите формулу. Дайте пояснение.
20. Запишите уравнение Клаузиуса – Мосотти. Дайте пояснение.
21. Запишите формулу Лоренц-Лорентца. Дайте пояснение.
22. Запишите формулу Дебая – Ланжевена. Дайте пояснение.
23. Дайте определение понятию «Электрическая емкость».
24. Как определить электрическую емкость конденсатора? Запишите формулу. Дайте пояснение.
25. Как определить электрическую емкость конденсаторов, подключённых последовательно? Запишите формулу. Дайте пояснение.
26. Как определить электрическую емкость конденсаторов, подключённых параллельно? Запишите формулу. Дайте пояснение.
27. Как определить энергию заряженного проводника? Запишите формулу. Дайте пояснение.
28. Как определить энергию заряженного конденсатора? Запишите формулу. Дайте пояснение.

29. Как определить объемную плотность энергии? Запишите формулу. Дайте пояснение.

Задача 1. Два шарика массой $m = 0,1$ г каждый подвешены в одной точке на нитях длиной $L = 20$ см каждая. Получив одинаковый заряд, шарики разошлись так, что нити образовали между собой угол $\alpha = 60^\circ$. Найти заряд каждого шарика.

Задача 2. Прямой металлический стержень диаметром $d = 5$ см и длиной $l = 4$ м несет равномерно распределенный по его поверхности заряд $Q = 500$ нКл. Определить напряженность E поля в точке, находящейся против середины стержня на расстоянии $a = 1$ см от его поверхности.

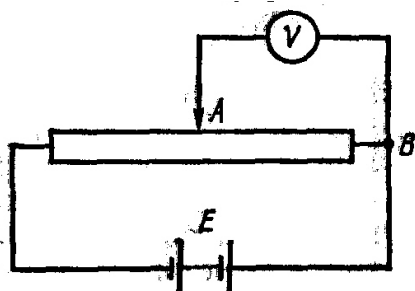
ТЕМА 12. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Цель

Дать определение понятию «электрический ток». Сформулировать закон Ома для участка цепи. Сформулировать закон Ома в дифференциальной форме. Рассмотреть сопротивление системы проводников при параллельном и последовательном соединениях. Дать определение понятию «сторонние силы». Сформулировать закон Ома для полной цепи. Сформулировать закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Дать определение понятиям «работа электрического тока» и «мощность электрического тока».

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Потенциометр с сопротивлением $R = 100$ Ом подключен к источнику тока,



ЭДС ε которого равна 150 В и внутреннее сопротивление $r = 50$ Ом. Определить показание вольтметра с сопротивлением $R_v = 500$ Ом, соединенного проводником с одной из клемм потенциометра и подвижным контактом с серединой обмотки потенциометра. Какова разность

потенциалов между теми же точками потенциометра при отключенном вольтметре?

Решение: Показание U_1 вольтметра, подключенного к точкам A и B , определяется по формуле

$$U_1 = I_1 R_1 \quad (1)$$

где I_1 – сила тока в неразветвленной, части цепи; R_1 – сопротивление параллельно соединенных вольтметра и половины потенциометра.

Силу тока I_1 найдем по закону Ома для всей цепи:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad (2)$$

где R – сопротивление внешней цепи.

Внешнее сопротивление R есть сумма двух сопротивлений:

$$R = R/2 + R_1. \quad (3)$$

Сопротивление R_1 параллельного соединения может быть найдено по формуле $\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R/2}$ откуда

$$R_1 = \frac{RR_B}{R + 2R_B}$$

Подставив в эту формулу числовые значения величин и произведя вычисления, найдем

$$R_1 = 45,5 \text{ Ом.}$$

Подставив в выражение (2) правую часть равенства (3), определим силу тока:

$$I = \frac{\varepsilon}{\frac{R}{2} + R_1 + r} = 1,03 \text{ А}$$

Если подставить значения I_1 и R_1 в формулу (1), то найдем показание вольтметра: $U_1 = 46,9 \text{ В.}$

Разность потенциалов между точками A и B при отключенном вольтметре равна произведению силы тока I_2 на половину сопротивления потенциометра, т. е. $U_2 = \frac{I_2}{R_2}$ или

$$U_2 = \frac{\varepsilon}{R+r} \frac{R}{2}$$

Подставив сюда значения величин ε , r и R получим

$$U_2 = 50 \text{ В.}$$

Задача 1. Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС ε каждого элемента равна 1,2 В, внутреннее сопротивление $r = 0,2 \text{ Ом.}$ Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление $R = 1,5 \text{ Ом.}$ Найти силу тока I во внешней цепи.

Задача 2. Имеется N одинаковых гальванических элементов с ЭДС ε и внутренним сопротивлением r_1 каждый. Из этих элементов требуется собрать батарею, состоящую из нескольких параллельно соединенных групп, содержащих по n последовательно соединенных элементов. При каком значении n сила тока I во внешней цепи, имеющей сопротивление R , будет максимальной? Чему будет равно внутреннее сопротивление R_1 батареи при этом значении n ?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как определить силу постоянного тока?
2. Как определить сопротивление однородного проводника?
3. Как определить сопротивление соединения проводников при последовательном и параллельном подключении?
4. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи. Дайте пояснение
5. Первое правило Кирхгофа
6. Как определить мощность тока?
7. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца
8. Закон Ома в дифференциальной форме
9. Что называют плотностью электрического тока. Дайте пояснение
10. Что называют проводимостью? Удельной проводимостью? Дайте пояснение
- 11.
12. Запишите закон Ома для однородного участка цепи. Дайте пояснение
13. Второе правило Кирхгофа
14. Как вычислить работу электростатического поля по перемещению заряда. Дайте пояснение.
15. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца
16. Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме

Задача 1. ЭДС ε батареи равна 20 В. Сопротивление R внешней цепи равно 2 Ом, сила тока $I=4$ А. Найти КПД батареи. При каком значении внешнего сопротивления R КПД будет равен 99%?

Задача 2. К зажимам батареи аккумуляторов присоединен нагреватель. ЭДС ε батареи равна 24 В. Внутреннее сопротивление $r=1$ Ом. Нагреватель, включенный в цепь, потребляет мощность $P=80$ Вт. Вычислить силу тока I в цепи и КПД η нагревателя.

ТЕМА 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Цель

Рассмотреть классическую теорию электропроводности металлов. Рассмотреть особенности электропроводности жидкостей. Рассмотреть особенности электропроводности газов и плазмы. Рассмотреть ток в вакууме. Рассмотреть особенности электропроводимости полупроводников.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. В цепь источника постоянного тока с ЭДС $\varepsilon = 6$ В включен резистор сопротивлением $R = 80$ Ом. Определить: 1) плотность тока в соединительных проводах площадью поперечного сечения $S = 2$ мм²; 2) число N электронов, проходящих через сечение проводов за время $t = 1$ с. Сопротивлением источника тока и соединительных проводов пренебречь.

Решение: 1. Плотность тока по определению есть отношение силы тока I к площади поперечного сечения провода:

$$j = I/S. \quad (1)$$

Силу тока в этой формуле выразим по закону Ома:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + R_1 + r_1} \quad (2)$$

где R – сопротивление резистора; R_1 – сопротивление соединительных проводов; r_1 – внутреннее сопротивление источника тока.

Пренебрегая сопротивлениями R_1 и r_1 из (2), получим

$$I = \varepsilon/R.$$

Подставив это выражение силы тока в (1), найдем

$$j = \varepsilon/(RS).$$

Произведя вычисления по этой формуле, получим $j = 3.75 \cdot 10^4$ А/м

2. Число электронов, проходящих за время t через поперечное сечение, найдем, разделив заряд Q , протекающий за это время через сечение, на элементарный заряд:

$$N = Q/e,$$

или с учетом того, что $Q = It$ и $I = \varepsilon/R$,

$$N = \frac{\varepsilon t}{Re}$$

Подставим сюда числовые значения величин и вычислим (элементарный заряд возьмем из табл. 24: $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл):

$$N = 4,69 \cdot 10^{17} \text{ электронов.}$$

Задача 1. Определить среднюю скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов в медном проводнике при силе тока 10 А и сечении S проводника, равном 1 мм². Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости.

Задача 2. Плотность тока j в алюминиевом проводе равна 1 А/мм². Найти среднюю скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электрон предполагая, что число свободных электронов в 1 см³ алюминия равно числу атомов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение понятию «плотность тока». Запишите формулу. Дайте пояснения.
2. Сформулируйте закон Ома. Запишите закон Ома в дифференциальной форме. Дайте пояснения.
3. Сформулируйте закон Джоуля–Ленца. Запишите закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме. Дайте пояснения.
4. Дайте определение понятию «удельная электрическая проводимость». Запишите формулу и дайте пояснение.
5. Сформулируйте закон Видемана-Франца. Запишите формулу и дайте пояснения.
6. Дайте определение понятию «термо-ЭДС». Как его определить? В каких приборах применяется эффект возникновения термо-ЭДС?
7. Сформулируйте первый закон электролиза Фарадея. Запишите формулу и дайте пояснения.
8. Сформулируйте второй Закон Электролиза Фарадея. Запишите формулу и дайте пояснения.
9. Сформулируйте объединенный закон электролиза Фарадея. Запишите формулу и дайте пояснения.
10. Запишите закон Ома в дифференциальной форме для электролитов. Дайте пояснения.
11. Дайте определение понятию «подвижность ионов». Запишите формулу и дайте пояснения.
12. Дайте определение понятию «ток насыщения» и «плотность тока насыщения». Запишите формулу и дайте пояснения.

Задача 1. Электролитическая ванна с раствором медного купороса присоединена к батарее аккумуляторов с ЭДС $E = 4$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,1$ Ом. Определить массу m меди, выделившейся при электролизе за время $t = 10$ мин, если ЭДС поляризации $E_n = 1,5$ В и сопротивление R раствора равно $0,5$ Ом. Медь двухвалентна.

Задача 2. Определить количество вещества ν и число атомов N двухвалентного металла, отложившегося на катоде электролитической ванны, если через раствор в течение времени $t = 5$ мин шел ток силой $I = 2$ А.

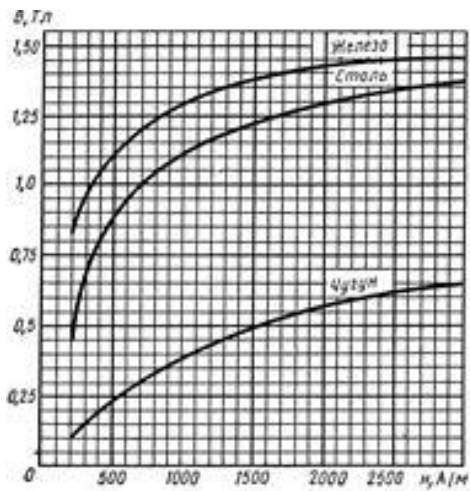
ТЕМА 14. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Цель

Сформулировать закон Ампера. Дать определение понятию «индукция магнитного поля». Рассмотреть контур с током в магнитном поле. Дать определение понятию «магнитный поток». Сформулировать закон Био-Савара-Лапласа. Дать определение понятию «напряженность магнитного поля». Сформулировать закон полного тока. Дать определение понятию «сила Лоренца». Рассмотреть устройство и принцип работы масс-спектрометров. Рассмотреть устройство и принцип работы ускорителей заряженных частиц. Рассмотреть особенности движения заряженных частиц в магнитном поле. Дать определение понятию «магнитогидродинамический эффект» и «эффект Холла».

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Чугунное кольцо имеет воздушный зазор длиной $l_0 = 5$ мм. Длина l средней



линии кольца равна 1 м. Сколько витков N содержит обмотка на кольце, если при силе тока $I = 4$ А индукция B магнитного поля в воздушном зазоре равна $0,5$ Тл? Рассеянием магнитного потока в воздушном зазоре можно пренебречь. Явление гистерезиса не учитывать.

Решение: Пренебрегая рассеянием магнитного потока, мы можем принять, что индукция поля в воздушном зазоре равна индукции поля в чугуне. На основании закона полного тока запишем

$$IN = Hl + H_0 l_0.$$

По графику находим, что при $B = 0,5$ Тл напряженность H магнитного поля в чугуна равна $1,2$ кА/м. Так как для воздуха $\mu = 1$, то напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B\mu_0 = 0,4 \text{ МА/м.}$$

Искомое число витков:

$$N = \frac{l + H_0 l_0}{I} = 800.$$

Задача 1. Определить силу Лоренца F , действующую на электрон, влетевший со скоростью $v = 4$ мм/с в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 30^\circ$ к линиям индукции. Магнитная индукция B поля равна $0,2$ Тл.

Задача 2. По кольцу радиусом R течет ток. На оси кольца на расстоянии $d = 1$ м от его плоскости магнитная индукция $B = 10$ нТл. Определить магнитный момент p_m кольца с током. Считать R много меньшим d .

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Сформулируйте закон Ампера. Запишите формулу. Дайте пояснение.
2. Дайте определение понятию «индукция магнитного поля».
3. Как определить магнитный поток? Запишите формулу. Дайте определение
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Запишите формулу. Дайте пояснение.
5. Как определить напряженность магнитного поля? Запишите формулу. Дайте пояснение.
6. Сформулировать закон полного тока. Запишите формулу. Дайте пояснение.
7. Как определить магнитный момент контура с током? Запишите формулу. Дайте пояснение.
8. Как определить сила Лоренца? Запишите формулу. Дайте пояснение.
9. Сформулировать теорему о циркуляции вектора магнитной индукции. Запишите формулу. Дайте пояснение.
10. Как определить магнитный поток через плоский контур? Запишите формулу. Дайте пояснение.
11. Дайте определение понятию «потокосцепление». Запишите формулу. Дайте пояснение.
12. Магнитная проницаемость – это... Запишите формулу. Дайте пояснение.
13. Магнитное сопротивление – это... Запишите формулу. Дайте пояснение.
14. Опишите устройство и принцип работы масс-спектрометров.
15. Опишите устройство и принцип работы ускорителей заряженных частиц.
16. В чем заключаются особенности движения заряженных частиц в магнитном поле.

17. Магнитогидродинамический эффект – это... Запишите формулу. Дайте пояснение.

18. Эффект Холла – это Запишите формулу. Дайте пояснение.

Задача 1. Электрон в невозбужденном атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом $r = 53$ пм. Вычислить силу эквивалентного кругового тока I и напряженность H поля в центре окружности.

Задача 2. На расстоянии $r = 10$ нм от траектории прямолинейно движущегося электрона максимальное значение магнитной индукции $B_{max} = 160$ мкТл. Определить скорость v электрона.

ТЕМА 15. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

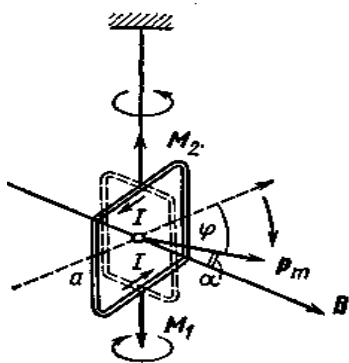
Цель

Дать определение понятию «плотность энергии магнитного поля». Дать определение понятию «индуктивность». Рассмотреть явление взаимной индукции. Дать определение понятию «магнитная энергия» контура с током. Рассмотреть явление ЭДС индукции и индукционный ток. Рассмотреть возможности применения закона Фарадея. Дать определение понятию «работа силы Ампера».

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Квадратная рамка со стороной длиной $a = 2$ см, содержащая $N = 100$ витков тонкого провода, подвешена на упругой нити, постоянная кручения C которой равна 10 мкН·м/град. Плоскость рамки совпадает с направлением линии индукции внешнего магнитного поля. Определить индукцию внешнего магнитного поля, если при пропускании по рамке тока $I = 1$ А она повернулась на угол $\alpha = 60^\circ$.

Решение: Индукция B внешнего поля может быть найдена из условия равновесия рамки в поле. Рамка будет находиться в равновесии, если сумма механических моментов, действующих на нее, будет равна нулю:



$$\sum M = 0$$

В данном случае на рамку действуют два момента: $M \rightarrow 1$ – момент сил, с которым внешнее магнитное поле действует на

рамку с током, и $M \rightarrow 2$ – момент упругих сил, возникающих при закручивании нити, на которой рамка подвешена. Следовательно, формула (1) может быть переписана в виде

$$M \rightarrow 1 + M \rightarrow 2 = 0 \quad (1)$$

Выразив M_1 и M_2 в этом равенстве через величины, от которых зависят моменты сил, получим:

$$p_m B \sin \alpha - C\varphi = 0 \quad (2)$$

Знак минус перед моментом M_2 ставится потому, что этот момент противоположен по направлению моменту M_1

Если учесть, что $p_m = ISN = Ia^2N$, где I – сила тока в рамке; $S = a^2$ – площадь рамки; N – число ее витков, равенство (2) перепишем в виде:

$$NIa^2B \sin \alpha - C\varphi = 0$$

откуда:

$$B = \frac{C\varphi}{NIa^2 \sin \alpha} \quad (3)$$

Из очевидно, что $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi$, значит, $\sin \alpha = \cos \varphi$. С учетом этого равенство (3) примет вид

$$B = \frac{C\varphi}{NIa^2 \cos \varphi} \quad (4)$$

Значение постоянной кручения C , рассчитанной на градус (а не радиан, как это следовало бы выразить в СИ), запишем в виде

$$C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м/град}, \quad C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м/град}$$

так как значение угла φ также дано в градусах.

Подставим данные в формулу (4) и произведем вычисления:

$$B = 0,03 \text{ Тл} = 30 \text{ мТл}$$

Задача 1. Длинный прямой соленоид из проволоки диаметром $d = 0,5$ мм намотан так, что витки плотно прилегают друг к другу. Какова напряженность H магнитного поля внутри соленоида при силе тока $I = 4$ А? Толщиной изоляции пренебречь.

Задача 2. Прямой провод длиной $l=10$ см, по которому течет ток $I=20$ А, находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,01$ Тл. Найти угол α между направлениями вектора $\vec{B}$ и тока, если на провод действует сила $F = 10$ мН.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Плотность энергии магнитного поля – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
2. Индуктивность – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
3. Взаимная индукция – это..... Запишите формулу. Дайте пояснения.
4. Магнитная энергия контура с током – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
5. ЭДС индукции – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
6. Индукционный ток – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
7. Сформулируйте закона Фарадея. Запишите формулу. Дайте пояснения.
8. Сила Ампера – это... Запишите формулу. Дайте пояснения.
9. Работа силы Ампера – это... Запишите формулу. Дайте пояснения

Задача 1. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите некоторого радиуса. Найти отношение магнитного момента p_m эквивалентного кругового тока к моменту импульса L орбитального движения электрона. Заряд электрона и его массу считать известными. Указать направления векторов $\vec{p}_m$ и $\vec{L}$.

Задача 2. Магнитное поле создано бесконечно длинным проводником с током $I = 100$ А. На расстоянии $a=10$ см от проводника находите точечный диполь, вектор магнитного момента ($p_m 1 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$) которого лежит в одной плоскости с проводником и перпендикулярен ему. Определить силу F , действующую на магнитный диполь.

ТЕМА 16. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Цель

Рассмотреть магнитное поле в веществе. Дать определение понятию «магнитная проницаемость». Рассмотреть элементарная теорию диамагнетизма. Рассмотреть элементарную теорию парамагнетизма. Рассмотреть природу ферромагнетизма.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Молекула NO имеет магнитный момент $M_l = 1,8 \mu_B$. Определить удельную парамагнитную восприимчивость $\chi_{уд}$ газообразного оксида азота при нормальных условиях.

Решение. По теории Ланжевена, магнитная восприимчивость парамагнитного вещества определяется выражением

$$\chi = \mu_0 \frac{n M_l}{3kT} \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); n – концентрация молекул (число молекул в единице объема); M_l – магнитный момент атома; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Удельная магнитная восприимчивость $\chi_{уд}$ связана с магнитной восприимчивостью χ соотношением

$$\chi_{уд} = \frac{\chi}{\rho}$$

Заменив в этом выражении χ согласно (1), получим

$$\chi_{уд} = \mu_0 \frac{M_l^2 n}{3kT \rho}.$$

Заметим, что концентрацию молекул и плотность газа можно выразить следующим образом:

$$n = N_A/V_m \text{ и } \rho = M/V_m$$

где N_A – постоянная Авогадро; M – молярная масса; V_m – молярный объем.

$$\text{Тогда } n/\rho = N_A/M \text{ и } \chi_{уд} = \mu_0 \frac{M_l^2 N_A}{3kTM}.$$

Произведем вычисления (учтем, что $1 \mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ и $M = 30 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$)

Задача 1. Магнитная восприимчивость χ алюминия равна $2,1 \cdot 10^{-5}$. Определить его удельную магнитную $\chi_{уд}$ и молярную χ_m восприимчивости.

Задача 2. Определить наибольшее значение величины a , при котором погрешность, вызванная заменой точного выражения функции Ланжевена приближенным $L(a) \approx a/3$, не превышает 1 %.

1. Сколько типов магнетиков существует? Перечислите и дайте пояснения каждому из них
2. Намагниченность – это... Запишите формулу. Дайте пояснение
3. Магнитная восприимчивость – это... Запишите формулу. Дайте пояснение
4. Магнетон Бора – это.... Дайте пояснение
5. Запишите связь магнитной индукции, напряженности магнитного поля и намагниченности.
6. Функция Ланжевена – это... Запишите формулу. Дайте пояснение
7. Как определить магнитную восприимчивость парамагнетиков? Запишите формулу. Дайте пояснение

Задача 1. Вычислить среднее число $\langle n \rangle$ магнетонов Бора, приходящихся на один атом железа, если при насыщении намагниченность железа равна 1,84 МА/м.

Задача 2. На один атом железа в незаполненной 3 d -оболочке приходится четыре неспаренных электрона. Определить теоретическое значение намагниченности $J_{нас}$ железа при насыщении.

ТЕМА 18. ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Цель

Дать определение понятию «ток смещения». Рассмотреть уравнения Максвелла и границы их применимости. Рассмотреть волновое уравнение электромагнитной волны. Изучить принцип работы «дипольных излучателей». Рассмотреть излучение волн движущимися зарядами. Рассмотреть скорость распространения электромагнитных волн в средах. Дать определение понятию «вектор Пойнтинга».

Типовые задания для выполнения практических

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

Пример. При переходе электромагнитной волны из немагнитной среды с диэлектрической проницаемостью в вакуум длина волны увеличилась на $\Delta\lambda = 48,8$ м. Определить частоты колебаний.

Решение: При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую частота колебаний не изменяется. Приращение длины волны

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda.$$

Где $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ – длина волны в вакууме, а $\lambda = \frac{c}{\nu}$ – длина волны в среде

Скорость распространения электромагнитных волн в среде:

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

Т.к. среда немагнитная: $\mu = 1$

Из выше написанного следует, что:

$$\nu = \frac{c}{\Delta\lambda} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}\right) = 2 \text{ МГц}$$

Задача 1. Определить среднюю энергию, переносимую электромагнитной волной через поверхность, площадь которой $S = 1,5 \text{ см}^2$ за время $t = 5 \text{ с}$, если поверхностная плотность потока излучения (интенсивность излучения) I в вакууме, если средняя объемная плотность энергии электромагнитной волны равна $3 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$

Задача 2. В Вакууме вдоль оси x распространяется плоская электромагнитная волна. Определить амплитуду E_m напряженности электрического поля электромагнитной волны, если амплитуда B_m индукции магнитного поля равна 40 нТл

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Ток смещения – это...
2. . Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме. Дайте пояснения.
3. Запишите материальное уравнения. Дайте пояснение.
4. Запишите волновое уравнение электромагнитной волны.
5. В чем заключается принцип работы «дипольных излучателей».
6. Вектор Пойнтинга – это... Дайте пояснение

Задача 1. Амплитуда напряженности E_m электрического поля электромагнитной волны в вакууме равна 10 В/м . Определить поверхностную плотность I потока излучения

Задача 2. Определить скорость распространения электромагнитных волн в немагнитной среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$

РАЗДЕЛ 4. ОПТИКА

ТЕМА 19. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ.

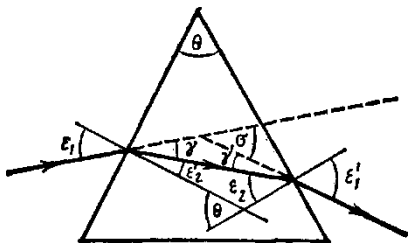
Цель

Дать определение понятию «световые лучи». Сформулировать законы лучевой оптики. Рассмотреть изображения, получаемые с помощью линз. Рассмотреть недостатки линз. Рассмотреть оптическая система глаза.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. На стеклянную призму с преломляющим углом $\theta = 50^\circ$ падает под углом $\varepsilon = 30^\circ$ луч света. Определить угол отклонения σ луча призмой, если показатель преломления n стекла равен 1,56.

Решение. Данную задачу целесообразно решать не в общем виде, как принято, а



пооперационно, производя все промежуточные вычисления.

В этом случае мы несколько проигрываем в точности расчетов, но выигрываем в наглядности и простоте вычислений. Из рисунка видно, что угол отклонения

$$\sigma = \gamma + \gamma' \quad (1)$$

углы γ и γ' просто выражаются через углы $\varepsilon'_1, \varepsilon_1, \varepsilon'_2, \varepsilon_2$, которые последовательно и

будем вычислять:

1) из закона преломления $n = \frac{\sin s_1}{\sin s_2}$ имеем

$$\varepsilon_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \varepsilon_1}{n}\right) = 18,7^\circ$$

2) из рисунка, следует, что угол падения ε_2 на вторую грань призмы равен

$$\varepsilon_2 = \theta - \varepsilon'_1 = 31,3^\circ. \quad \varepsilon_2 = \theta - \varepsilon'_1 = 31,3^\circ,$$

Угол ε_2 меньше предельного $\varepsilon_{2\text{пред}} = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) = 39,9^\circ$ потому на второй грани луч преломится и выйдет из призмы;

3) так как $\frac{\sin s_2}{\sin s_1} = \frac{1}{n}$, то $\varepsilon'_1 = \arcsin(n \sin \varepsilon_2) = 54,1^\circ$

Теперь найдем углы γ и γ' :

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon'_2 = 11,3^\circ, \text{ и}$$

$$\gamma' = \varepsilon'_1 - \varepsilon_2 = 22,8^\circ,$$

По формуле (1) находим $\sigma = \gamma + \gamma' = 34,1^\circ$

Задача 1. Два плоских прямоугольных зеркала образуют двугранный угол $\varphi=179^\circ$. На расстоянии $l=10$ см от линии соприкосновения зеркал и на одинаковом расстоянии от каждого зеркала находится точечный источник света. Определить расстояние d между мнимыми изображениями источника в зеркалах.

Задача 2. Вогнутое сферическое зеркало дает на экране изображение предмета, увеличенное в $\Gamma=4$ раза. Расстояние a от предмета до зеркала равно 25 см. Определить радиус R кривизны зеркала.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие виды изображений бывают?
2. Какие виды линз бывают?
3. Что называют фокусным расстоянием?
4. Как определить фокусное расстояние сферического зеркала? Дайте пояснение к формуле.
5. Что называют оптической силой?
6. Как определить оптическую силу сферического зеркала? Дайте пояснение к формуле.
7. Сформулируйте закон преломления света. Дайте пояснение.
8. Что называют предельным углом полного отражения?
9. Как определить предельный угол полного отражения? Дайте пояснение к формуле.
10. Что называют оптической силой тонкой линзы?
11. Как определить оптическую силу тонкой линзы? Дайте пояснение к формуле.
12. Как рассчитать оптическую силу двух тонких линз?
13. Запишите формулу тонкой линзы. Дайте пояснение к формуле.
14. Что называют угловым увеличением?
15. Как определить угловое увеличение лупы? Дайте пояснение к формуле.
16. Как определить угловое увеличение телескопа? Дайте пояснение к формуле.
17. Как определить угловое увеличение микроскопа? Дайте пояснение к формуле.

18. Перечислите законы геометрической оптики
19. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света. Дайте пояснение
20. Сформулируйте закон независимого распространения лучей. Дайте пояснение
21. Сформулируйте закон преломления света. Дайте пояснение
22. Сформулируйте закон отражения света. Дайте пояснение.

Задача 1. Двояковыпуклая линза имеет одинаковые радиусы кривизны поверхностей. При каком радиусе кривизны R поверхностей линзы главное фокусное расстояние f ее будет равно 20 см?

Задача 2. Преломляющий угол θ призмы равен 60° . Угол наименьшего отклонения луча от первоначального направления $\sigma = 30^\circ$. Определить показатель преломления n стекла, из которого изготовлена призма.

ТЕМА 21. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

Цель

Изучить спектр электромагнитных волн. Рассмотреть фотометрические величины. Сформулировать принцип Гюйгенса. Сформулировать принцип Ферма. Рассмотреть основы электромагнитной оптики. Изучить формулы Френеля.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Люминесцентная цилиндрическая лампа диаметром $d = 2,5$ см и длиной $l = 40$ см создает на расстоянии $r = 5$ м в направлении, перпендикулярном оси лампы, освещенность $E_v = 2$ лк. Принимая лампу за косинусный излучатель, определить; 1) силу света I в данном направлении; 2) яркость L ; 3) светимость M лампы.

Решение. 1. Большой из двух размеров лампы – длина – в 12 раз меньше расстояния, на котором измерена освещенность.

Следовательно, для вычисления силы света в данном направлении можно принять лампу за точечный источник и применить формулу $E = \frac{I}{r^2}$ откуда $I = Er^2$

Подставив значения величин в эту формулу и произведя вычисления, получим

$$I = 25 \text{ кд.}$$

2. Для вычисления яркости применим формулу

$$L = I/\sigma,$$

где σ – площадь проекции протяженного источника света на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения.

В случае цилиндрической люминесцентной лампы проекция имеет форму прямоугольника длиной l и шириной d . Следовательно,

$$L = I/(ld).$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$$L = 2,5 \text{ ккд/м}^2.$$

3. Так как люминесцентную лампу можно считать косинусным излучателем, то ее светимость

$$M = \pi L = 7,9 \text{ клк.}$$

Задача 1. Какую силу тока I покажет гальванометр, присоединенный к селеновому фотоэлементу, если на расстоянии $r = 75$ см от него поместить лампочку, полный световой поток Φ_0 которой равен 1,2 клм? Площадь рабочей поверхности фотоэлемента равна 10 см^2 , чувствительность $i = 300 \text{ мкА/лм}$.

Задача 2. На какой высоте h над центром круглого стола радиусом $r = 1$ м нужно повесить лампочку, чтобы освещенность на краю стола была максимальной?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Спектр электромагнитных волн – это...
2. Перечислите типы электромагнитного излучения и их краткие характеристики (диапазон длин волн и источники)
3. Перечислите основные характеристики электромагнитного излучения. Дайте пояснение
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса
5. Сформулируйте принцип Ферма
6. Световой поток – это...
7. Освещенность поверхности – это
8. Яркость святящейся поверхности – это
9. Светимость – это

Задача 1. При печатании фотоснимка негатив освещался в течение $t_1 = 3$ с лампочкой силой света $I_1 = 15$ кд с расстояния $r_1 = 50$ см. Определить время t_2 , в течение которого нужно освещать негатив лампочкой силой света $I_2 = 60$ кд с расстояния $r_2 = 2$ м, чтобы получить отпечаток с такой же степенью почернения, как и в первом случае?

Задача 2. Какую силу тока I покажет гальванометр, присоединенный к селеновому фотоэлементу, если на расстоянии $r = 75$ см от него поместить лампочку, полный световой поток Φ_0 которой равен 1,2 клм? Площадь рабочей поверхности

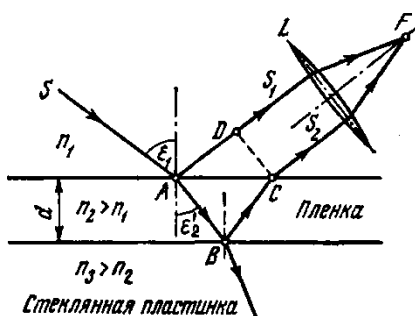
ТЕМА 22. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Цель

Рассмотреть условия наблюдения интерференционной картины. Дать определение понятию «когерентность». Рассмотреть интерференция в тонких пленках. Рассмотреть просветление оптики.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. На толстую стеклянную пластинку, покрытую очень тонкой пленкой, показатель преломления n_2 вещества которой равен 1,4, падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($\lambda = 0,6$ мкм). Отраженный свет максимально ослаблен вследствие интерференции. Определить толщину d пленки.



Решение: Из световой волны, падающей на пленку, выделим узкий пучок SA. Ход этого пучка в случае, когда угол падения $\epsilon_1 \neq 0$, показан на рисунке. В точках A и B падающий пучок частично отражается и частично преломляется. Отраженные пучки света AS_1 и BCS_1 падают на собирающую линзу L, пересекаются в ее фокусе F и интерферируют между собой.

Так как показатель преломления воздуха ($n_1 = 1,00029$) меньше показателя преломления вещества пленки ($n_2 = 1,4$), который, в свою очередь, меньше показателя преломления стекла ($n_3 = 1,5$), то в обоих случаях отражение происходит от среды оптически более плотной, чем та среда, в которой идет падающая волна. Поэтому фаза

колебания пучка света AS_1 при отражении в точке A изменяется на π рад и точно так же на π рад изменяется фаза колебаний пучка света BCS_2 при отражении в точке B . Следовательно, результат интерференции этих пучков света при пересечении в фокусе F линзы будет такой же, как если бы никакого изменения фазы колебаний ни у того, ни у другого пучка не было.

Как известно, условие максимального ослабления света при интерференции в тонких пленках состоит в том, что оптическая разность хода Δ интерферирующих волн должна быть равна нечетному числу полуволн; $\Delta = (2k + 1)(\lambda/2)$.

Как видно из рисунка, оптическая разность хода

$$\Delta = l_2 n_2 - l_1 n_1 = (|AB| + |BC|)n_2 - |AD|n_1$$

Следовательно, условие минимума интенсивности света примет вид

$$(|AB| + |BC|)n_2 - |AD|n_1 = (2k + 1)(\lambda/2).$$

Если угол падения ε_1 будет уменьшаться, стремясь к нулю, то $AD \rightarrow 0$ и $(|AB| + |BC| \rightarrow 2d$, где d – толщина пленки. В пределе при $\varepsilon_1 = 0$ будем иметь $\Delta = 2dn_2 = (2k + 1)(\lambda/2)$

откуда искомая толщина пленки

$$d = \frac{(2k+1)\lambda}{4n}.$$

Полагая $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, получим ряд возможных значений толщины пленки:

$$d_0 = \frac{\lambda}{4n_2} = 0,11 \text{ мкм}, d_1 = \frac{3\lambda}{4n_2} = 3d_0 = 0,33 \text{ мкм} \text{ и т.д.}$$

Задача 1. На тонкий стеклянный клин ($n = 1,55$) падает нормально монохроматический свет. Двугранный угол α между поверхностями клина равен $2'$. Определить длину световой волны λ , если расстояние b между смежными интерференционными максимумами в отраженном свете равно $0,3 \text{ мм}$.

Задача 2. На экране наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников света с длиной волны $\lambda = 480 \text{ нм}$. Когда на пути одного из пучков поместили тонкую пластинку из плавленого кварца с показателем преломления $n = 1,46$, то интерференционная картина сместилась на $m = 69$ полос. Определить толщину d кварцевой пластинки.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каковы основные положения и выводы корпускулярной и волновой теорий света?
2. Почему возникло представление о двойственной корпускулярно-

волновой природе света?

3. В чем заключается основная идея теории Планка?

Задача 1. Какой длины l_1 путь пройдет фронт волны монохроматического света в вакууме за то же время, за какое он проходит путь длиной $l_2=1$ м в воде?

Задача 2. В интерферометре Майкельсона на пути одного из интерферирующих пучков света ($\lambda=590$ нм) поместили закрытую с обеих сторон стеклянную трубку длиной $l=10$ см, откачанную до высокого вакуума. При заполнении трубки хлористым водородом произошло смещение интерференционной картины. Когда хлористый водород был заменен бромистым водородом, смещение интерференционной картины возросло на $\Delta m=42$ полосы. Определить разность Δn показателей преломления бромистого и хлористого водорода.

ТЕМА 24. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Цель

Дать понятия определениям «поляризованный свет» и «естественный свет». Рассмотреть явление Брюстера. Рассмотреть устройство и принцип работы анализатора. Сформулировать закон Малюса. Рассмотреть явление двойного лучепреломления. Рассмотреть явление дихроизм. Рассмотреть вращение плоскости поляризации. Рассмотреть оптическая активность в природе.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Пластина кварца толщиной $d_1 = 1$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 20^\circ$. Определить: 1) какова должна быть толщина d_2 кварцевой пластинки, помещенной между двумя «параллельными» николями, чтобы свет был полностью погашен; 2) какой длины l трубку с раствором сахара массовой концентрацией $C = 0,4$ кг/л надо поместить между николями для получения

того же эффекта? Удельное вращение $[\alpha]$ раствора сахара равно $0,665$ град/ $(\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3})$.

Решение. 1. Угол поворота плоскости поляризации кварцевой пластинкой определяется соотношением $\varphi = \alpha \cdot d$.

Пользуясь этой формулой, выразим искомую толщину d_2 пластинки:

$$d_2 = \frac{\varphi_2}{\alpha} \quad (1)$$

где φ_2 – угол поворота плоскости поляризации, при котором свет будет полностью погашен ($\varphi_2 = 90^\circ$).

Постоянное вращение α для кварца найдем также из формулы $\varphi = \alpha \cdot d$, подставив в нее заданные в условии задачи значения d_1 и φ_1 :

$$\alpha = \frac{\varphi_1}{d_1}$$

Подставив это выражение α в формулу (1), получим

$$d_2 = \frac{\varphi_2}{\alpha} d_1$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем толщину пластинки:

$$d_2 = 4,5 \text{ мм.}$$

2. Длину трубки с сахарным раствором найдем из соотношения $\varphi_2 = [\alpha]Cd$, выражающего угол поворота плоскости поляризации раствором сахара, где d — толщина раствора сахара (принимается равной длине l трубки). Отсюда получим

$$l = \varphi_2 / ([\alpha]C).$$

Подставив сюда значения φ_2 , $[\alpha]$, $C = 0,4 \text{ кг/л} = 400 \text{ кг/м}^3$ и произведя вычисления, найдем

$$l = 3,8 \text{ дм.}$$

Задача 1. В частично-поляризованном свете амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в $n = 2$ раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности. Определить степень поляризации $P^{\rightarrow\rightarrow}$ света.

Задача 2. Пластинку кварца толщиной $d_1 = 2$ мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi = 53^\circ$. Определить толщину d_2 пластинки, при которой данный монохроматический свет не проходит через анализатор.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Поляризованный свет – это.... Дайте пояснение
2. Естественный свет – это Дайте пояснение
3. Сформулируйте закон Брюстера. Запишите формулу. Дайте пояснение.
4. Сформулируйте закон Малюса. Запишите формулу. Дайте пояснение
5. Как определить степень поляризации света? Запишите формулу. Дайте пояснение.
6. Как определить угол поворота плоскости поляризации в твердых телах? Запишите формулу. Дайте пояснение.
7. Как определить угол поворота плоскости поляризации в чистых жидкостях? Запишите формулу. Дайте пояснение.
8. Как определить угол поворота плоскости поляризации в растворах? Запишите формулу. Дайте пояснение.

Задача 1. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения ε_n отраженный свет полностью поляризован?

Задача 2. Степень поляризации $P^{\rightarrow}$ частично-поляризованного света равна 0,5. Во сколько раз отличается максимальная интенсивность света, пропускаемого через анализатор, от минимальной?

ТЕМА 27. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА ВЕЩЕСТВОМ

Цель

Рассмотреть тепловое излучение и его характеристики. Дать определение понятию «абсолютно черное тело». Сформулировать законы теплового излучения (Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина). Рассмотреть формулу Планка. Изучить вывод законов теплового излучения абсолютно черного тела из формулы Планка.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны $\lambda = 500$ нм. Принимая Солнце за черное тело, определить. 1) энергетическую светимость M_e Солнца; 2) поток энергии $\Phi_{\text{е}}$, излучаемый Солнцем; 3) массу t электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за 1 с.

Решение 1. Энергетическая светимость M_e черного тела выражается формулой Стефана – Больцмана

$$M_e = \sigma T^4 \quad (1)$$

Температура излучающей поверхности может быть определена из закона смещения Вина. $\lambda_m = b/T$. Выразив отсюда температуру T и подставив ее в формулу (1), получим

$$M_e = \sigma(b\lambda_m)^4, \quad (2)$$

Произведя вычисления по формуле (2), найдем

$$M_e = 64 \text{ МВт/м}^2$$

2. Поток энергии Φ_e , излучаемый Солнцем, равен произведению энергетической светимости Солнца на площадь S его поверхности.

$$\Phi_e = 4\pi r^2 M_e \quad (3)$$

где r – радиус Солнца

Подставив в формулу (3) значения π , r и M_e и произведя вычисления, получим

$$\Phi_e = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

3. Массу электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за время $t = 1$ с, определим, применив закон пропорциональности массы и энергии $E = mc^2$. Энергия электромагнитных волн, излучаемых за время t , равна произведению потока энергии Φ (мощности излучения) на время $E = \Phi t$.

Следовательно, $\Phi_e = mc^2$, откуда $m = \Phi_e / c^2$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$$m = 4,3 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

Задача 1. Определить температуру T , при которой энергетическая светимость M_e черного тела равна 10 кВт/м^2 .

Задача 2. На какую длину волны λ_m приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости $(M_\lambda, T)_{\max}$ черного тела при температуре $t = 0^\circ\text{C}$?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называют абсолютно черным телом?
2. Сформулируйте закон смещения Стефана – Больцмана. Запишите формулу. Дайте пояснения
3. Энергетическая светимость – это....
4. Сформулируйте закон смещения Вина. Запишите формулу. Дайте пояснения
5. Запишите формулу Планка. Дайте пояснения.
6. Запишите зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости от температуры. Дайте пояснение.
7. Сформулируйте закон смещения Кирхгофа. Запишите формулу. Дайте пояснения

Задача 1. Определить энергию W излучаемую за время $t = 1$ мин из смотрового окошка площадью $S = 8 \text{ см}^2$ плавильной печи, если ее температура $T = 1,2 \text{ кК}$.

Задача 2. Температура верхних слоев Солнца равна $5,3 \text{ кК}$. Считая Солнце черным телом, определить длину волны λ_m , которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости $(M_\lambda, T)_{\max}$ Солнца.

ТЕМА 28. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Цель

Рассмотреть корпускулярно-волновой дуализм материи. Сформулировать гипотезу де Бройля. Рассмотреть соотношение неопределенностей. Рассмотреть волновую функцию и

ее статистический смысл. Рассмотреть временное и стационарное уравнения Шредингера. Рассмотреть физические основы электронной микроскопии.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы длина волны де Бройля λ была равна 0,1 нм?

Решение: Длина волны де Бройля связана с импульсом частицы p , который в свою очередь связан с кинетической энергией E :

$$\lambda = \frac{h}{p}; p = \sqrt{2mE}; \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

В свою очередь, кинетическую энергию электрон приобрёл, разгоняясь в электрическом поле, пройдя разность потенциалов, тогда эта энергия равна работе поля, т.е.

$$E = eU$$

Подставим в выражение для длины волны и выразим искомое напряжение:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}; \lambda^2 = \frac{h^2}{2meU}; U = \frac{h^2}{2me\lambda^2}$$

$$U = 150,8 \text{ В}$$

Задача 1. Определить длину волны де Бройля λ , характеризующую волновые свойства электрона, если его скорость $v = 1$ Мм/с. Сделать такой же подсчет для протона.

Задача 2. Электрон движется со скоростью $v = 200$ Мм/с. Определить длину волны де Бройля λ , учитывая изменение массы электрона в зависимости от скорости.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Корпускулярно волновой дуализм – это....
2. Сформулируйте гипотезу де Бройля.
3. Сформулируйте соотношение неопределенностей. Дайте пояснение
4. Волновую функцию – это.... Дайте пояснение.
5. Запишите временное уравнение Шредингера.
6. Запишите и стационарное уравнение Шредингера
7. Чему равны фазовая и групповая скорости фотона?
8. Как, исходя из соотношения неопределенностей, объяснить наличие естественной ширины спектральных линий?
9. Что определяет квадрат модуля волновой функции?

10. Почему квантовая механика является статистической теорией?
11. В чем отличие понимания причинности в классической и квантовой механике?
12. Как изменится коэффициент прозрачности потенциального барьера с увеличением его ширины в два раза?
13. Может ли частица находиться на дне «потенциальной ямы»?
14. Определяется ли это формой «ямы»?
15. В чем отличие квантово-механического и классического описания гармонического осциллятора? В выводах этих описаний?

Задача 1. Определить длину волны де Бройля λ электрона, если его кинетическая энергия $T = 1$ кэВ.

Задача 2. Найти длину волны де Бройля λ протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U : 1) 1 кВ; 2) 1 МВ

РАЗДЕЛ 5. ФИЗИКА АТОМА И ЯДРА

ТЕМА 29. МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА

Цель

Ввести понятия «атомные единицы энергии» и «атомные единицы массы». Рассмотреть модель атома Томсона. Рассмотреть модель атома Резерфорда. Рассмотреть модель атома Бора. Сформулировать постулаты Бора. Рассмотреть спектр водорода. Изучить развитие теории Бора.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Вычислить радиус первой орбиты атома водорода (Боровский радиус) и скорость электрона на этой орбите.

Решение. Согласно теории Бора, радиус r электронной орбиты и скорость v электрона на ней связаны равенством $mvr = n\hbar$. Так как в задаче требуется определить величины, относящиеся к первой орбите, то главное квантовое

число $n = 1$ и указанное выше равенство примет вид

$$m\vartheta r = \hbar \quad (1)$$

Для определения двух неизвестных величин r и v необходимо еще одно уравнение. В качестве второго уравнения воспользуемся уравнением движения электрона. Согласно теории Бора, электрон вращается вокруг ядра. При этом сила взаимодействия между электрическими зарядами ядра и электрона сообщает электрону центростремительное ускорение. На основании второго закона Ньютона можем записать:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (2)$$

(e и m – заряд и масса электрона), или

$$m\vartheta^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

Совместное решение равенств (1) и (2) относительно r дает

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar}{(me)^2}$$

Подставив сюда значения $\hbar$, e , и m произведя вычисления, найдем боровский радиус:

$$r = a = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

Из равенства (1) получим выражение скорости электрона на первой орбите:

$$\vartheta = \frac{\hbar}{mr}$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$$\vartheta = 2,18 \text{ Мм/с}$$

Задача 1. Определить потенциальную Π , кинетическую T и полную E энергии электрона, находящегося на первой орбите атома водорода.

Задача 2. Определить длину волны λ , соответствующую третьей спектральной линии в серии Бальмера.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Почему ядерная модель атома оказалась несостоятельной?

2. Почему из различных серий спектральных линий атома водорода первой была изучена серия Бальмера?
3. Какой смысл имеют числа m и n в обобщенной формуле Бальмера?
4. Чему равна частота излучения атома водорода, соответствующая коротковолновой границе серии Брэкета?
5. Разъясните смысл постулатов Бора.
6. Как с помощью постулатов Бора объясняется линейчатый спектр атома?
7. Какие основные выводы можно сделать на основании опытов Франка и Герца?
8. Пользуясь моделью Бора, укажите спектральные линии, которые могут возникнуть при переходе атома водорода в состояния с $n=3$ и $n=4$.
9. Нанесите на шкалу длин волн три линии каждой из первых двух спектральных серий атома водорода.
10. Почему спектр поглощения атома водорода содержит только серию Лаймана?

Задача 1. Атомарный водород, возбужденный светом определенной длины волны, при переходе в основное состояние испускает только три спектральные линии. Определить длины волн этих линий и указать, каким сериям они принадлежат.

Задача 2. Фотон с энергией $\varepsilon = 16,5$ эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость v будет иметь электрон вдали от ядра атома?

ТЕМА 30. СТРОЕНИЕ И СПЕКТРЫ АТОМОВ

Цель: Рассмотреть водородоподобный атом. Рассмотреть спектры водорода и щелочных металлов. Дать определение понятию «спин электрона». Рассмотреть многоэлектронные атомы. Сформулировать постулаты периодического закона Менделеева. Рассмотреть спектры многоэлектронных атомов. Изучить основы спектрального анализа.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Найти возможные значения полных механических моментов атомов, находящихся в состояниях ^4P и ^5D .

Решение: Состояние ^4P : квантовые числа $L = 1$; $2S + 1 = 4$; $S = 1\frac{1}{2}$

Внутреннее квантовое число может принимать значения:

$$J = L + S, L + S - 1, |L - S|$$

$$J = 2\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

Полный механический момент атома:

$$M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{J(J - 1)}$$

$$M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{35}{4}}, M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{15}{4}}, M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{4}}$$

Состояние ^5D : квантовые числа $L = 2$; $2S + 1 = 5$; $S = 2$

Внутреннее квантовое число может принимать значения:

$$J = L + S, L + S - 1, |L - S|$$

$$J = 4, 3, 2, 1, 0$$

Полный механический момент атома:

$$M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{J(J - 1)}$$

$$M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{20}, M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{12}; M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{6}; M = \frac{h}{2\pi} \sqrt{2}; 0$$

Задача 1. Определить, сколько различных волновых функций соответствует главному квантовому числу $n=5$.

Задача 2. Построить и объяснить диаграмму, иллюстрирующую расщепление энергетических уровней и спектральных линий (с учетом правил отбора) при переходах между состояниями с $l = 2$ и $l = 1$. ($d \rightarrow p$ – переход).

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?
2. Каковы возможные значения l и ml для главного квантового числа $n = 5$?
3. Сколько различных состояний соответствует $n = 4$?
4. Сравните плотности вероятности обнаружения электрона в основном состоянии атома водорода согласно теории Бора и квантовой механики.
5. Почему атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в различных состояниях?

Задача 1. Определить длины волн спектральных линий, возникающих при переходе возбужденных атомов лития из состояния $3S$ в основное состояние $2S$. Ридберговские поправки для S – и P –термов равны $-0,41$ и $-0,04$

Задача 2. Энергия связи валентного электрона атома лития в состояниях $2S$ и $2P$ равна соответственно $5,39$ и $3,54$ эВ. Вычислить ридберговские поправки для S – и P –термов этого атома

ТЕМА 31. ЛАЗЕРЫ

Цель

Рассмотреть устройство и принцип работы лазера. Изучить свойства лазерного излучения. Рассмотреть применение лазерного излучения в медицине и промышленности.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Лазер мощностью 1 мВт излучает свет с длиной волны 632,8 нм. Вычислить поток квантов излучения.

Решение: Энергия одного фотона: $E_0 = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, тогда:

$$E = N \cdot E_0$$

$$E = P \cdot t$$

$$N \cdot E_0 = P \cdot t$$

Поток фотонов:

$$\Pi = \frac{N}{t} = \frac{P}{E_0}$$

Следовательно:

$$\Pi = \frac{P\lambda}{hc} = 31,8 \text{ Вт}$$

Задача 1. Лазер испускает излучение с длиной волны 330 нм. Определите энергию одного кванта света, испускаемого лазером.

Задача 2. Определите добротность резонатора гелий-неонового лазера из первой задачи по отношению к потерям на излучение, если длина активной зоны 40 см, а коэффициент отражения зеркала составляет 0,9.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое излучение называется спонтанным?
2. Какое излучение называется индуцированным?
3. Объясните устройство и принцип действия лазера.
4. Перечислите и объясните свойства лазерного излучения.

Задача 1. Лазерный усилитель представляет собой кювету, заполненную усиливающей свет средой (про такую среду говорят, что она обладает инверсной заселенностью). На вход лазерного усилителя падает лазерное

излучение с мощностью $P_1 = 1$ кВт. Мощность лазерного излучения на выходе из усилителя оказывается равной $P_2 = 10$ МВт. Найти силу, которую нужно прикладывать к усилителю, чтобы удерживать его в неподвижном положении.

Задача 2. Пучок лазерного излучения мощностью $W = 100$ Вт падает на непрозрачную пластинку под углом $\alpha = 30^\circ$. Пластинка поглощает 60 % падающей энергии, а остальную энергию зеркально отражает. Найдите абсолютную величину силы, действующей на пластинку со стороны света. Скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

ТЕМА 32. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Цель

Изучить состав атомного ядра. Рассмотреть энергия связи атомных ядер. Дать определение понятию «радиоактивное излучение». Рассмотреть виды радиоактивного излучения. Сформулировать законы радиоактивных распадов. Рассмотреть физические основы действия ионизирующих излучений на организм.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Определить период полураспада радиоактивного изотопа, если $2/3$ начального количества ядер этого изотопа распалось за время $t = 10$ мин.

Решение: Период полураспада радиоактивного изотопа

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1)$$

Где λ – постоянная радиоактивного изотопа

Число распавшихся ядер:

$$\Delta N = N_0 - N \quad (2)$$

Где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер; N – число нераспавшихся ядер в момент времени t , которое согласно закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Учитывая (2) и (3), найдем долю распавшихся ядер за время t

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Согласно условию задачи:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t} = \frac{2}{3}$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{3}; -\lambda t = \ln \frac{1}{3}$$

$$\text{Откуда } \lambda = \frac{\ln 3}{t}$$

Следовательно:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{\ln 3} t = 6,31 \text{ мин}$$

Задача 1. Хлор представляет собой смесь двух изотопов с относительными атомными массами $Ar_1 = 34,969$ и $Ar_2 = 36,966$. Вычислить относительную атомную массу Ar хлора, если массовые доли w_1 и w_2 первого и второго изотопов соответственно равны 0,754 и 0,246.

Задача 2. Какую часть массы нейтрального атома плутония составляет масса его электронной оболочки?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие частицы образуют ядро атома цинка? Сколько их?
2. Атомное ядро «составили» из N свободных нуклонов (масса каждого нуклона равна m).
3. Чему равны масса и удельная энергия связи этого ядра?
4. Чем отличаются изобары и изотопы?
5. Почему прочность ядер уменьшается при переходе к тяжелым элементам?
6. Как объясняется сверхтонкая структура спектральных линий?
7. Как и во сколько раз изменится число ядер радиоактивного вещества за время, равное трем периодам полураспада?
8. Как (по какому закону) изменяется со временем активность нуклида?

9. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после двух α -распадов ядер его атомов? после последовательных одного α -распада и двух β -распадов?

10. Как объясняется α -распад на основе представлений квантовой теории?

11. Как объясняется непрерывность энергетического спектра β -частиц

Задача 1. Какова вероятность W того, что данный атом в изотопе радиоактивного йода ^{131}I распадется в течение ближайшей секунды?

Задача 2. Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния ^{225}Ac останется через 5 сут? через 15 сут?

ТЕМА 33. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Цель

Рассмотреть искусственные превращения ядер. Рассмотреть ядерные реакции. Рассмотреть теорию альфа-распада. Рассмотреть теорию бета-распада. Рассмотреть модели ядра. Рассмотреть эффект Мессбауэра. Рассмотреть использование ядерной энергии в современном мире.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Определить, какая часть начального количества радиоактивного нуклида распадается за время t , равное средней продолжительности жизни этого нуклида.

Решение:

Согласно закону радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$ и условиям задачи:

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Т.к. $\lambda = \frac{1}{\tau}$:

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\frac{1}{\tau} t} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Учитывая, что $t = \tau$:

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} = 0,632$$

Задача 1. Сколько ядер урана-235 должно делиться за время $t=1$ с, чтобы тепловая мощность P ядерного реактора была равной 1 Вт?

Задача 2. Найти электрическую мощность P атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД η станции равен 16 %.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как объясняется α -распад на основе представлений квантовой теории?
2. Как объясняется непрерывность энергетического спектра β -частиц?
3. Изменится ли химическая природа элемента при испускании его ядром γ -кванта?
4. Какие явления сопровождают прохождение γ -излучения через вещество и в чем их суть?
5. В чем суть эффекта Мёссбауэра? Каковы его возможные применения?
6. Запишите схему e -захвата. Что сопровождает e -захват? В чем его отличие от $\beta^\pm$ -распадов?
7. Чем объяснить выброс нейтрино (антинейтрино) при $\beta^\pm$ -распадах?
8. По каким признакам можно классифицировать ядерные реакции?
9. Что представляет собой реакция деления ядер? Приведите примеры.
10. В результате какой реакции происходит превращение ядер ${}^{238}_{92}\text{U}$ в ядра ${}^{239}_{94}\text{U}$? Каковы ее перспективы?

Задача 1. Сколько ядер урана-235 должно делиться за время $t=1$ с, чтобы тепловая мощность P ядерного реактора была равной 1 Вт?

Задача 2. Найти электрическую мощность P атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД η станции равен 16 %.

ТЕМА 34. ЭЛЕМЕНТЫ ДОЗИМЕТРИИ

Цель

Дать определение понятиям «доза излучения» и «экспозиционная доза». Дать определение понятию «мощность дозы». Рассмотреть количественную оценку биологического действия ионизирующего излучения. Дать определение понятию эквивалентная доза. Рассмотреть устройство и принцип работы дозиметрических приборов. Изучить методы защита от ионизирующего излучения.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. На какую глубину нужно погрузить в воду источник узкого пучка γ -излучения (энергия гамма-фотонов равна 1,6 МэВ), чтобы интенсивность I пучка, выходящего из воды, была уменьшена в $k=1000$ раз?

Решение: $I = I_0 e^{-\mu x}$, согласно условию $\frac{I_0}{I} = k \Rightarrow I = \frac{I_0}{k}$. Тогда получаем:

$$\frac{I_0}{k} = I_0 e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{1}{k} = e^{-\mu x}$$
$$-\ln k = -\mu x \Rightarrow x = \frac{\ln k}{\mu}$$

Т.к. $\mu = 0,06 \text{ см}^{-1}$:

$$x = 115 \text{ см} = 1,15 \text{ м}$$

Задача 1. Интенсивность I узкого пучка γ -излучения после прохождения через слой свинца толщиной $x = 4 \text{ см}$ уменьшилась в $k = 8$ раз. Определить энергию ϵ гамма-фотонов и толщину x_1 слоя половинного ослабления.
2

Задача 2. Через свинец проходит узкий пучок γ -излучения. При каком значении энергии ϵ гамма-фотонов толщина x_1 слоя половинного ослабления
2
будет максимальной? Определить максимальную толщину x_{max} слоя половинного ослабления для свинца.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.
2. Линейная плотность ионизации, линейная передача энергии, средний пробег ионизирующей частицы.
3. Особенности взаимодействия с веществом альфа-, бета-, гамма-излучений и нейтронов.
4. Физические принципы защиты от ионизирующих излучений.
5. Понятие об основных биологических эффектах ионизирующих излучений.
6. Принцип работы ионизационной камеры.
7. Принцип работы трекового детектора
8. Схема счетчика Гейгера-Мюллера

Задача 1. Узкий пучок γ -излучения (энергия ϵ гамма-фотонов равна 2,4 МэВ) проходит через бетонную плиту толщиной $x_1 = 1$ м. Какой толщины x_2 плита из чугуна дает такое же ослабление данного пучка γ -излучения?

Задача 2. Чугунная плита уменьшает интенсивность I узкого пучка γ -излучения (энергия ϵ гамма-фотонов равна 2,8 МэВ) в $k = 10$ раз. Во сколько раз уменьшит интенсивность этого пучка свинцовая плита такой же толщины?

ТЕМА 35. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Цель

Рассмотреть такие частицы как электрон, фотон, протон. Рассмотреть строение нейтрон. Изучить свойства нейтрона. Рассмотреть фундаментальные взаимодействия. Рассмотреть мюон. Рассмотреть античастицы. Рассмотреть нейтрино. Рассмотреть способы регистрации нейтрино. Рассмотреть нерешенные проблемы физики элементарных частиц.

Типовые задания для выполнения практических

Пример. Известно, что в углеродно-азотном, или углеродном, цикле число ядер углерода остается неизменным. В результате этого цикла четыре ядра водорода ${}^1_1\text{H}$ (протона) превращаются в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, а также образуются три γ -кванта, два позитрона и два нейтрино. Записав эту реакцию, определите выделяющуюся в этом процессе энергию

Решение: $4{}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2{}^0_{+1}\text{e} + 2{}^0_0\nu_e + 3\gamma + Q$

$$\Delta m = 4m_{{}_1^1\text{H}} - (m_{{}_2^4\text{He}} + 2m_e)$$

$$Q = \Delta mc^2 = 25,8 \text{ МэВ}$$

Задача 1. Принимая, что энергия релятивистских мюонов в космическом излучении составляет 3 ГэВ, определить расстояние, проходимое мюонами за время их жизни, если собственное время жизни мюона 2,2 мкс, а энергия покоя 100 МэВ.

Задача 2. Нейтральный пион распадается на два γ -кванта: $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$. Принимая массу покоя пиона равной $264,1m_e$, определить энергию каждого из возникших γ -квантов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какова природа первичного и вторичного космического, излучения? Назовите их свойства.
2. Приведите схемы распада мюонов. Чем объясняется выброс мюонного нейтрино (антинейтрино)?
3. Приведите схемы распада π -мезонов. Дайте характеристику π -мезонам.
4. Какие фундаментальные типы взаимодействий осуществляются в природе и как их можно охарактеризовать? Какой из них является универсальным?
5. Какие законы сохранения выполняются для всех типов взаимодействий элементарных частиц?
6. Что является фундаментальным свойством всех элементарных частиц?

7. Назовите свойства нейтрино и антинейтрино. В чем их сходство и различие?

8. Какие характеристики являются для частиц и античастиц одинаковыми? Какие – разными?

9. Что такое странность и четность элементарных частиц? Для чего они вводятся? Всегда ли выполняются законы их сохранения?

10. Какие имеются группы элементарных частиц? Каковы критерии, по которым элементарные частицы относятся к той или иной группе?

Задача 1. При столкновении нейтрона и антинейтрона происходит их аннигиляция, в результате чего возникают два γ -кванта, а энергия частиц переходит в энергию γ -квантов. Определить энергию каждого из возникших γ -квантов, принимая, что кинетическая энергия нейтрона и позитрона до их столкновения пренебрежимо мала

Задача 2. Определите, какие из приведенных ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа: 1) $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$; $K^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$; $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+$; $K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Перечень основной литературы:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Лань 2022. – 472с. ISBN 978-5-8114-9890-1
2. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М.: Лань 2022. – 500с. ISBN 978-5-8114-8926-8
3. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц Санкт-Петербург.: Лань СПб 2019. – 450с. ISBN 978-5-8114-4598-1

1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев. – 3-ие изд.- М.: ООО «Издательский дом «Оникс 21 век»: ООО Издательство «Мир и Образование», 2003. – 432с.: ISBN 5-329-00742-9 (ООО «Издательский дом «Оникс 21 век»); ISBN 5-94666-074-8 ООО Издательство «Мир и Образование»
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1981.-400 с.,
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1983.-463 с.,
4. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1985.-351 с.,
5. Матвеев А.Н. Атомная физика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1989.-439 с., ISBN 5-06-000056-7
6. Калашников С.Г. Электричество: Учебн. Пособие. – 6-е изд. Стереот. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с. – ISBN 5-9221-0312-1

2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации к лабораторным занятиям по дисциплине "Физика"
2. Методические рекомендации к самостоятельной работе по дисциплине "Физика".

3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

- 1 <http://demo.home.nov.ru> – Мир физики: физический эксперимент;
- 2 <http://experiment.edu.ru> – естественнонаучные эксперименты - Физика: Коллекция Российского общеобразовательного портала;
- 3 <http://fizkaf.narod.ru> – кафедра и лаборатория физики Московского института открытого образования;
- 4 <http://genphys.phys.msu.ru> – сайт кафедры общей физики физфака МГУ.
- 5 <http://www.edu.delfa.net> – кабинет физики Санкт-Петербургской академии постдипломного педагогического образования;
- 6 <http://www.phys.spb.ru> – сайт физического факультета СПбГУ;
- 7 <http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/mech.php>
- 8 <https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-01-classical-mechanics-fall-2016/>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКА

Методические указания для обучающихся по организации и проведению самостоятельной работы

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия
Направленность (профиль)
«Нанотехнологии и наноматериалы»

Ставрополь
2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно

эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика» являются:

- подготовка к практическому занятию
- самостоятельное изучение литературы;
- подготовка к экзамену.

Практические занятия проводятся с целью закрепления усвоенной информации, приобретения навыков ее применения при решении практических задач в соответствующей предметной области.

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
2 семестр			
Подготовка к теме: Кинематика и динамика материальной точки	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 1
Подготовка к теме: Законы сохранения	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 2
Подготовка к теме: Неинерциальные системы отсчета.	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Механика твердого тела	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие №1
Подготовка к теме: Релятивистская механика	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Гравитация	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Колебательное движение	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 3
Подготовка к теме: Гидродинамика	Подготовленный отчет для лабораторной работе	Список лабораторных работ	Лабораторное занятие № 2
Подготовка к теме: Предварительные сведения	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 4 Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Статистическая физика	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Термодинамика	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 5 Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Кристаллическое состояние	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие №3

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
2 семестр			
	работе	Список лабораторных работ	
Подготовка к теме: Жидкое состояние	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Фазовые равновесия и превращения	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Физическая кинетика	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Электрическое поле в вакууме	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 6 Лабораторное занятие № 4
Подготовка к теме: Электрическое поле в диэлектриках	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 6
Подготовка к теме: Проводники в электрическом поле	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Энергия электрического поля	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Постоянный электрический ток	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 7 Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Магнитное поле в вакууме	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Магнитное поле в веществе	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие №5
Подготовка к теме: Электромагнитная индукция	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 8 Практическое занятие № 18

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
2 семестр			
Подготовка к теме: Уравнения Максвелла	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие № 6
Подготовка к теме: Классическая теория электропроводности металлов	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие № 7
Подготовка к теме: Электрический ток в газах	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Электрические колебания	Подготовленный отчет для лабораторной работе	Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторное занятие № 8
3 семестр			
Подготовка к теме: Геометрическая оптика	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 1 Лабораторная работа № 1
Подготовка к теме: Фотометрия	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 2
Подготовка к теме: Интерференция света	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 3 Лабораторная работа № 2
Подготовка к теме: Дифракция света	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 4 Лабораторная работа № 3

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
2 семестр			
Подготовка к теме: Поляризация света	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторная работа № 4
Подготовка к теме: Оптика движущихся сред	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 4
Подготовка к теме: Взаимодействие электромагнитных волн с веществом	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Тепловое излучение	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 6 Лабораторная работа № 5
Подготовка к теме: Боровская теория атома	Собеседование Решение типовых задач	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий	
Подготовка к теме: Квантовомеханическая теория водородоподобного атома	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 7 Лабораторная работа № 6
Подготовка к теме: Многоэлектронные атомы	Собеседование Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Лабораторная работа № 7
Подготовка к теме: Молекулы и кристаллы	Собеседование	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18
Подготовка к теме: Атомное ядро	Собеседование Решение типовых задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Вопросы для собеседования Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 18 Практическое занятие № 8 Лабораторная работа № 8
Подготовка к теме: Элементарные частицы	Собеседование Решение типовых	Вопросы для собеседования	Практическое занятие № 18

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
2 семестр			
	задач Подготовленный отчет для лабораторной работе	Примеры типовых заданий Список лабораторных работ	Практическое занятие № 9 Лабораторная работа № 9
Подготовка к экзамену	Собеседование	Вопросы для подготовки к экзамену	

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

При подготовке к практическим занятиям необходимо:

- повторить материал соответствующих лекций;
- внимательно изучить описание практического занятия, изложенное в практикуме;
- ответить на вопросы по содержанию практического или лабораторного занятия, задаваемые преподавателем на предварительном опросе перед выполнением заданий.
-

В результате выполнения заданий достигаются следующие результаты обучения:

- развитие мышления и творческих способностей студента,
- приобретение и закрепление навыков самостоятельной работы,
- приобретение и закрепление навыков оформления и составления письменных заданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Перечень основной литературы:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Лань 2022. – 472с. ISBN 978-5-8114-9890-1
2. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М.: Лань 2022. – 500с. ISBN 978-5-8114-8926-8

3. Савельев И.В. Курс общей физики: [учеб. пособие]: в 3-х томах. /И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева, Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц Санкт-Петербург.: Лань СПб 2019. – 450с. ISBN 978-5-8114-4598-1

1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев. – 3-ие изд.- М.: ООО «Издательский дом «Оникс 21 век»; ООО Издательство «Мир и Образование», 2003. – 432с.: ISBN 5-329-00742-9 (ООО «Издательский дом «Оникс 21 век»); ISBN 5-94666-074-8 ООО Издательство «Мир и Образование»

2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1981.-400 с.,

3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1983.-463 с.,

4. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1985.-351 с.,

5. Матвеев А.Н. Атомная физика: Учеб. Для студентов вузов/ А.Н. Матвеев.,- М.: Высшая школа, 1989.-439 с., ISBN 5-06-000056-7

6. Калашников С.Г. Электричество: Учебн. Пособие. – 6-е изд. Стереот. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с. – ISBN 5-9221-0312-1

2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации к лабораторным занятиям по дисциплине "Физика"

2. Методические рекомендации к самостоятельной работе по дисциплине "Физика".

3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1 <http://demo.home.nov.ru> – Мир физики: физический эксперимент;

2 <http://experiment.edu.ru> – естественнонаучные эксперименты - Физика: Коллекция Российского общеобразовательного портала;

3 <http://fizkaf.narod.ru> – кафедра и лаборатория физики Московского института открытого образования;

4 <http://genphys.phys.msu.ru> – сайт кафедры общей физики физфака МГУ.

- 5 <http://www.edu.delfa.net> – кабинет физики Санкт-Петербургской академии постдипломного педагогического образования;
- 6 <http://www.phys.spb.ru> – сайт физического факультета СПбГУ;
- 7 <http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/mech.php>
- 8 <https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-01-classical-mechanics-fall-2016/>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия
Направленность (профиль)
«Нанотехнологии и наноматериалы»

Ставрополь
2026

Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	74
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПОМЕЩЕНИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА	74
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	80
ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	80
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	95
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ	95
МЕТОДОМ СТОКСА	95
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	99
ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5	106
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	106
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6	113
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МОСТИКОМ УИТСТОНА	113
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7	121
ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАМКИ С ТОКОМ В.....	121
РАДИАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	121
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8	126
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ	126
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ	126
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9	131
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10	134
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11	138
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ p - n -ПЕРЕХОДА	138
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12	145

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПОМЕЩЕНИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: получить знания, теоретических и практических основ безопасной работы в научно-исследовательских лабораториях, а также уметь оценивать и контролировать риски уменьшать их либо полностью устранять.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Студенты, начавшие изучать дисциплину «Физика», допускаются к выполнению лабораторных только после прохождения вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности и после собеседования по вопросам техники безопасности. Проведение всех видов инструктажа регистрируется в журнале.

Проведение вводного инструктажа, контроль выполнения правил техники безопасности во всей лаборатории и ведение журнала инструктажа осуществляет преподавателем или инженером (лаборантом), которые прикреплены к данной лаборатории.

Все студенты, работающие в лаборатории, должны находиться в ней в необходимой спецодежде: белом халате из хлопчатобумажной ткани; при необходимости применять фартуки, средства индивидуальной защиты глаз и рук.

Требование в соответствии с инструкцией перед началом работы

Перед началом работы с аналитическим оборудованием необходимо соблюдать следующие правило:

- убедитесь, что измерительный комплекс заземлен;
- самостоятельно не проводить монтаж не каких частей измерительных установок, разбирать изделия разрешено только специалистам, имеющим соответствующие нормативные документы;
- не подключайте к измерительному оборудованию дополнительные устройства без консультации со специалистами (преподавателем или лаборантом);

- не применять к научно-исследовательскому оборудованию ударных нагрузок и сильных механических воздействий;

- оберегать измерительные установки от воздействия предельных температур, прямого солнечного излучения, попадания жидкости.

Требование в соответствии с инструкцией во время работы:

- во время работы необходимо выполнять только те задачи, которые поставлены преподавателем в соответствии с учебным планом;

- соблюдать правило перемещения в помещении;

- использовать лабораторное оборудование только по назначению;

- знать химические и физические свойства анализируемого материала, продуктов реакции, химических реактивов, особенно их токсичность, огнеопасность и взрывоопасность;

Требование в соответствии с инструкцией при работе с электрооборудованием

При работе с электрооборудованием в лабораториях студенту запрещается:

- прикасаться к открытым токоведущим частям и корпусам электрооборудования, кабелям, проводам;

- класть на электрические щитки, пульты управления, электрические машины и пускатели какие-либо предметы;

- использовать научно-исследовательские установки не по назначению;

- вскрывать защитные кожуха пусковой аппаратуры и проникать за ограждения распределительных устройств.

Для уменьшения влияния возможных сетевых помех на процесс измерений рекомендуется подключать блоки измерительных комплексов через сетевой фильтр.

Необходимо соблюдать правила безопасности работы с приборами, содержащими источник лазерного излучения. Предупреждающий о наличии лазерного излучения обозначается ярлыком. Ярлыки различаются в зависимости от длины волны и мощности лазерного излучения (рисунок 1).



Рисунок 1 – Предупреждающие ярлыки о наличии лазерного излучения

При наличии сканеров необходимо помнить, что, применение усилий больших, чем это необходимо для установки запрещено. Избегайте ударов по сканеру и его боковых смещений. Помните, что толщина стенок сканера составляет всего 0.5 мм.

Условие эксплуатации научно-исследовательского оборудования

Для размещения аналитических установок требуется помещение общей площадью не менее 6 кв. м, с классом чистоты не хуже 8 (по ГОСТ Р ИСО 14644-1-2002).

Для обеспечения качественной и безопасной работы измерительного оборудования рекомендуется соблюдать следующие условия эксплуатации и размещения:

1. Температура окружающей среды:
 - абсолютный диапазон (15 – 35°C);
 - рекомендуемый диапазон (20 – 25°C);
 - дрейф температуры: не более 1 °C в час.
2. Относительная влажность:
 - абсолютный диапазон (20 – 80%) (без конденсации влаги);
 - рекомендуемый диапазон (30 – 50%) (без конденсации влаги).
3. Амплитуда вибраций в полосе частот 1÷1000 Гц не более 0.5 мкм.
4. Атмосферное давление: (760±25 мм. рт. ст.)/ (100±4 кПа).
5. Рабочее помещение должно быть оборудовано контуром защитного заземления и однофазной электрической сетью (110/220 В) с заземлением.
6. Параметры электропитания:

- напряжение питания сети переменного тока $110\pm 10/220\pm 22$ В;
- частота питающего напряжения $50.0\pm 0.4/60\pm 0.5$ Гц;

7. Рабочее помещение должно быть защищено от механических вибраций и акустических шумов как внутренних, так и внешних.

8. Столы, предназначенные для установок измерительных блоков, должны быть устойчивым и, по возможности, массивными.

9. Для получения наилучшей виброустойчивости комплексов следует размещать на наливных полах с мраморным покрытием, рядом с несущими стенами здания (опорами, балками и т.п.).

10. Измерительный установки следует размещать на отдельных столах, подальше от компьютера и мониторов, чтобы избавиться от электромагнитных помех.

11. Измерительные комплексы должен быть защищен от воздействия прямых солнечных лучей.

12. На работу измерительных установок отрицательно влияют тепловые потоки, сквозняки, резкие изменения температурного фона и влажности.

Требование в соответствии с инструкцией в аварийных ситуациях

Во время работы могут возникнуть следующие аварийные ситуации:

- возникновение пожара, взрыва;
- поражение электрическим током;
- попадание кислоты или щелочи на кожу или в глаза;
- выделение или образование едких, ядовитых, огне- или взрывоопасных веществ.

При возникновении аварийной ситуации студент обязан прекратить работу, немедленно сообщить о случившемся либо инженеру (лаборанту) лаборатории.

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям электробезопасности при работе с электроустановками по ГОСТ 12.1.019-79, а так же пожаробезопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 [1] и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

Требование в соответствии с инструкцией по окончанию работы

После окончания работы необходимо выключить оборудование и водопроводные краны, а также удалить из помещения отходы горючих и огнеопасных веществ, отработанные жидкости (сливы), мусор, загрязненную ветошь, перекрыть общий газовый и водопроводный краны, отключить электропитание. Снять спецодежду, привести ее в порядок и убрать в шкаф. Тщательно вымыть лицо и руки с мылом или очищающей пастой.

Задания для выполнения лабораторной работы

1. Прохождения вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности.
2. Освоить правила по технике безопасности перед началом работы, во время работы и по окончании работы.
3. Изучить все аспекты в области безопасной работы, в случаях аварийной ситуации.
4. Овладеть навыками безопасной работы с электрическим оборудованием в соответствии с ГОСТ 12.1.019-2017.
5. Овладеть навыками безопасной работы с вредными веществами в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76.
6. Прохождение собеседования по вопросам техники безопасности.
7. Регистрация в журнале инструктажей.

Содержание отчета

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать наименование и цель работы, законспектированные правила поведения в научно-исследовательской лаборатории.

Контрольные вопросы по усвоению теоретического материала

1. Перечислите правила работы с высокоточным оборудованием.
2. Какие жидкости относятся к легковоспламеняющимся?
Перечислите правила работы с легковоспламеняющимися жидкостями.
3. Куда следует сливать агрессивные жидкости?

4. В соответствии с какими нормативными документами необходимо проверять степень работоспособности лабораторий?
5. Первая помощь при термических ожогах?
6. Первая помощь при отравлении химическими веществами?
7. Основные правила эксплуатации научно-исследовательского оборудования?
8. Какие правила необходимо соблюдать при работе с электрооборудованием?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
2. ГОСТ 12.4.009-83. Система стандартов безопасности труда. ПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ.
3. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. Общие требования и номенклатура видов защиты.
4. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. ВРЕДНЫЕ ВЕЩЕСТВА. Классификация и общие требования безопасности. Основные виды. Размещение и обслуживание.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить основные погрешности прямых и косвенных измерений

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Каждая лабораторная работа физического практикума посвящена изучению определенного физического явления, измерению той или иной величины, характеризующей данное явление или свойства тела, опытному установлению функциональной зависимости между величинами.

Всякое такое исследование состоит из одного или нескольких измерений. Уметь измерить некоторую величину означает не только правильно обращаться с физическими приборами, освоить метод измерения, но и обработать результат измерения. Важность последнего возникает в связи с тем, что невозможно никакими измерениями получить истинное значение определяемой величины с абсолютной точностью. Любые измерения связаны с теми или иными погрешностями, которые устранить полностью не представляется возможным. Поэтому необходимо указать тот интервал, в котором с определенной гарантией находится значение измеряемой величины. Чем уже этот интервал, тем точнее измерение данной величины. Вопрос о том, насколько результат измерения приближается к истинному значению измеряемой величины, и с какой степенью надежности мы можем принять результат измерения за интересующую нас истинную величину, решается теорией ошибок.

Погрешности делятся на систематические и случайные.

Систематические погрешности связаны с ограниченной точностью приборов (например, неравноплечность весов), неточностью самого метода измерения (например, пренебрежение силами сопротивления и трения), неправильной установки прибора (сбит нуль шкалы прибора). Характерная особенность этого типа погрешностей заключается в том, что они из опыта в опыт приносятся в разной мере, но с одинаковым знаком (дают либо

завышенный, либо заниженный результат). Т.к. причины, вызывающие систематические погрешности, в большинстве случаев известны, то эти погрешности в принципе можно исключить, вводя соответствующие поправки. Для этого нужно производить проверку приборов, сравнивать показания приборов с

показаниями эталонного, совершенствовать метод измерений.

Случайные погрешности всегда присутствуют в эксперименте. Вызываются большим числом случайных причин, действие которых на результат каждого измерения различно и не может быть заранее учтено. Они могут быть вызваны случайным сотрясением зданий, влиянием незначительного движения воздуха, трением подвижных элементов приборов, несовершенством наших органов чувств. Характерной особенностью погрешностей является то, что они из опыта в опыт привносятся в разной мере и с разными знаками. При многократном измерении одной и той же величины они являются причиной разброса результатов.

Исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно, но математическая теория случайных величин позволяет уменьшить их влияние на окончательный результат и установить ошибку измерений.

Разновидностью случайных погрешностей является грубый промах. Это, очевидно, неправильные отсчеты по прибору, неправильная запись результата и т.д. В большинстве случаев промахи хорошо заметны, так как соответствующие им отсчеты резко отличаются от других. При обработке результатов измерений такие отсчеты следует исключать.

ДОВЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ И ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ

Допустим, a - измеряемая величина, n - число измерений. Если систематическая погрешность отсутствует, разумно предположить, что результаты отдельных измерений a_i расположатся вблизи истинного значения a измеряемой величины. Причем отклонения в сторону больших или меньших значений будут равновероятны. Тогда в качестве наилучшего приближения к истинному значению следует взять среднеарифметическое значение $\langle a \rangle$ от-

дельных измерений:

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

Точность соответствия среднего значения истинному зависит от ряда факто-

ров, в первую очередь - от точности каждого отдельного измерения и от числа этих измерений.

Выполнив измерения, требуется указать результат эксперимента так, чтобы им могли воспользоваться другие. Необходимо не только привести результат, но и дать информацию о его точности. Принято, как уже отмечалось, указывать интервал значений измеряемой величины

$$a = \langle a \rangle \pm \Delta a,$$

в пределах которого с определенной вероятностью может оказаться истинное значение измеряемой величины.

Величина Δa называется полушириной доверительного интервала. Интервал $\langle a \rangle \pm \Delta a$ называется доверительным интервалом.

Вероятность того, что $\langle a \rangle$ отличается от истинного не более чем на Δa , называется доверительной вероятностью (надежностью) α .

Поясним смысл этой величины примером. Пусть результат серии измерений записан в виде $a = 25 \pm 2$ (доверительный интервал $23 \div 27$) при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ (доверительная вероятность 0,95 означает, что из числа n (например, 1000) измерений, отличающихся друг от друга, в n_α измерениях (950) результаты будут отличаться не более чем на $\Delta a = 2$, а результаты остальных измерений ($n - n_\alpha$) выйдут за пределы доверительного интервала.

Доверительная вероятность α определяет долю однотипных измерений, результаты которых попадают в доверительный интервал.

ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Известно несколько способов определения доверительного интервала по результатам серии прямых измерений. По одному из методов необходимо произвести следующие операции:

1. По формуле (1) рассчитать среднеарифметическое значение всех полученных при измерении значений.
2. Рассчитать отклонения от среднеарифметического каждого значения

измеряемой величины.

$$\begin{aligned}\Delta a_1 &= \langle a \rangle - a_1 \\ \Delta a_2 &= \langle a \rangle - a_2 \\ \Delta a_3 &= \langle a \rangle - a_3 \\ &\dots \quad \dots \quad \dots \\ \Delta a_n &= \langle a \rangle - a_n\end{aligned}\tag{2}$$

3. Рассчитать среднеквадратичную погрешность результатов серии измерений

$$S_{\langle a \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \Delta a_i^2}{n(n-1)}}\tag{3}$$

4. По числу проведенных измерений (например, $n = 8$) и заданному значению надежности α (для учебных лабораторий надежность $\alpha = 0,95$) из таблицы значений коэффициентов Стьюдента (см. Приложение 1) найти значение коэффициента $t_{\alpha n}$. При $n = 8$ и $\alpha = 0,95$ имеем $t_{\alpha n} = 2,4$.

5. Рассчитать полуширину доверительного интервала по формуле:

$$\Delta a_{\text{сл}} = t_{\alpha n} S_{\langle a \rangle}.\tag{4}$$

После вычисления $\Delta a_{\text{сл}}$ найти относительную погрешность

$$\delta_{\alpha} = \frac{\Delta a_{\text{сл}}}{\langle a \rangle} \cdot 100\%.\tag{5}$$

Окончательный результат прямых измерений приводится с указанием доверительного интервала, относительной погрешности и доверительной вероятности

$$a = \langle a \rangle \pm \Delta a_{\text{сл}};$$

$$\alpha = 0,95 ;$$

$$\delta = \dots\%.$$

Часто в научной и справочной литературе даются значения каких-либо величин, измеренных заранее без указания доверительного интервала, относительной погрешности и доверительной вероятности. В таких случаях погрешность принимается равной половине единицы наименьшего разряда,

представленного в числе. Например, дана масса тела $m = 532,4$ г. В этом случае $\Delta m = 0,05$ г, т.е. $m = 532,4 \pm 0,05$ г.

Вычисление погрешности проводят не более, чем с двумя значащими цифрами. При записи результатов достаточно ограничиться одной цифрой в погрешности, если она больше или равна трем.

Например, $n = 5$, результаты измерения a_i и расчета погрешности Δa внесены в табл.1.

Таблица 1

№ п.п	a_i	$\langle a \rangle$	Δa_i	Δa_i^2	$S_{\langle a \rangle}$	$\Delta a_{сл}$
1	118,8	120,26	1,46	2,13	0,574	1,61
2	121,6		1,34	1,80		
3	120,2		0,06	0,00		
4	121,5		1,24	1,54		
5	119,2		1,06	1,12		

Казалось бы $a = 120,26 \pm 1,61$. Но так как a может отличаться от $\langle a \rangle$ на целые единицы, то нет смысла приводить в окончательном результате десятые и сотые доли. Для правильной записи необходимо ошибку определить до одной значащей цифры, а затем округлить $\langle a \rangle$ так, чтобы его последняя значащая цифра соответствовала значащей цифре ошибки. Таким образом, окончательный результат

$$a = 120 \pm 2;$$

$$\alpha = 0,95;$$

$$\delta = 2\%.$$

Если при прямых измерениях систематическая и случайная погрешности соизмеримы, то погрешность измерения рассчитывается по формуле:

$$\Delta a = \sqrt{\Delta a_{\text{сис}}^2 + \Delta a_{\text{сл}}^2} \quad (6)$$

где $\Delta a_{\text{сис}}$ - систематическая погрешность; $\Delta a_{\text{сл}}$ - случайная погрешность (полуширина доверительного интервала).

ПРИБОРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

При снятии показаний прибора их обычно округляют до ближайшего деления шкалы, поскольку оценивать на глаз доли деления ненадежно. Если случайные погрешности невелики (меньше одного деления шкалы прибора), то все измерения дадут один и тот же результат. В этом случае достаточно ограничиться двумя - тремя измерениями, чтобы убедиться в отсутствии промаха, проводить обработку результатов не нужно, но следует учесть приборную погрешность.

Различают два вида приборных погрешностей: погрешность отсчета и погрешность показания прибора.

Погрешность отсчета, связанная с округлением показаний, принимается равной $1/2$ цены деления шкалы прибора.

Погрешность показаний можно определить при сравнении показаний данного прибора и более точного эталонного. Эта погрешность может быть обусловлена как систематическими, так и случайными погрешностями.

На приборе может быть указана как абсолютная, так и относительная погрешность. Вместо максимальной погрешности может быть указан класс точности прибора, который для разных приборов означает разное. Например, для магазина сопротивлений, емкостей класс точности выражает в процентах максимальную относительную погрешность

$$\delta = \frac{\eta}{x_i} 100\% ,$$

где x_i - показания прибора.

Абсолютная приборная погрешность

$$\Delta = (x_i \delta) 100 .$$

для стрелочных измерительных приборов класс точности означает выраженное в процентах отношение максимальной абсолютной погрешности к предельному значению измеряемой величины, т.е. к наибольшему по значению $x_{\max}$, которое может быть измерено по шкале измерительного прибора

$$\delta = \frac{\eta}{x_{\max}} 100\% ,$$

тогда абсолютная приборная погрешность

$$\Delta = (x_{\max} \delta) 100 .$$

Класс точности прибора обычно указывается на шкале прибора.

Значения приборной погрешности позволяют выбрать оптимальное число измерений. Оптимальное число измерений такое, при котором случайные погрешности измерений одного порядка с приборными. Дальнейшее увеличение числа измерений нецелесообразно, т.к. в этом случае уже приборные погрешности, не зависящие от числа измерений, играют определяющую роль.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Косвенные измерения - измерения, в которых искомая величина определяется через величины, связанные с ней функциональной зависимостью.

Допустим, определяем величину $z = f(a, b, c, \dots)$, где $a, b, c, \dots$ - прямые измерения; $\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots$ - средние значения результатов прямых измерений.

Среднее значение величины z

$$z = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots)$$

Для определения погрешности Δz поступим следующим образом:

1.1.1. Изменим результат одного из прямых измерений, например a на величину погрешности Δa и найдем, как при этом изменится z :

$$\Delta z = |z(\langle a \rangle + \Delta a, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots) - z(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots)|.$$

Если погрешность Δa невелика, то

$$\Delta z_a = \left| \frac{\partial z}{\partial a} \Delta a \right|.$$

При вычислении этой производной все величины, кроме a , считаются постоянными (частная производная).

Аналогичным образом найдем погрешности при определении величины, обусловленные погрешностями результатов других прямых измерений:

$$\Delta z_b = \left| \frac{\partial z}{\partial b} \Delta b \right|$$

и т.д. Специальными расчетами доказывается, что

$$\Delta z = \sqrt{\Delta z_a^2 + \Delta z_b^2 + \Delta z_c^2}.$$

Относительная погрешность δ_z

$$\delta_z = \frac{\Delta z}{\langle z \rangle} = \frac{\Delta z_a}{\langle z \rangle} + \frac{\Delta z_b}{\langle z \rangle} + \dots$$

1.1.2. Если при прямых измерениях величин $a, b, c, \dots$ случайные погрешности намного превышают систематические или прямые измерения нельзя повторить в одних и тех же условиях, то расчет погрешности косвенно измеряемой величины z можно производить по методике оценки случайных погрешностей прямых измерений (см. раздел 3), полагая, что значение подчиняется законам распределения случайных величин. Это положение строго доказывается в высшей математике. Для расчета погрешности в этом случае необходимо следующее:

1. Вычислить значение z для каждого измерения величин $a, b, c, \dots$

$$z_1 = f(a_1, b_1, c_1, \dots)$$

$$z_2 = f(a_2, b_2, c_2, \dots)$$

... ..

$$z_n = f(a_n, b_n, c_n, \dots)$$

2. Рассчитать среднее арифметическое $\langle z \rangle$:

1

$$\langle z \rangle = \sum_{i=1}^n z_i$$

где n - число прямых измерений.

3. Рассчитать отклонение каждого z_i от среднего арифметического:

$$\square z_1 = \langle z \rangle - z_1$$

$$\square z_2 = \langle z \rangle - z_2$$

$$\square z_3 = \langle z \rangle - z_3$$

... ..

$$\square z_n = \langle z \rangle - z_n$$

4. Рассчитать среднеквадратичную погрешность результата серии измерений

$$S_{\langle z \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \Delta z_i^2}{n(n-1)}}.$$

5. Погрешность Δz рассчитать по формуле:

$$\Delta z = t_{\alpha n} S_{\langle z \rangle}, \quad (4)$$

где $t_{\alpha n}$ - коэффициент Стьюдента, который находится из таблицы по числу проведенных измерений n и заданной надежности α (см. Приложение 2).

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

При обработке полученного экспериментального материала для того, чтобы получить наглядное представление о зависимости одной физической величины от другой, часто прибегают к построению графиков. Графиками пользуются также для быстрого нахождения значения одной величины (функции) по данному значению другой величины (аргумента). При этом точность в определении этих величин ограничивается точностью построения графика, а если не требуется большой точности, то применять их удобнее, чем таблицы. Наконец, при построении графика сглаживаются возникшие в результате случайных ошибок эксперимента скачки в ходе функции.

Для построения графика чаще всего используют прямоугольную (декартову) систему координат, хотя не исключено применение и других систем. Если график выполняется на миллиметровой бумаге, то его построение и использование значительно упрощается. На графике принято по горизонтальной оси откладывать независимую переменную (аргумент), т.е. величину, значение которой задается наблюдателем в ходе эксперимента, а по вертикальной оси ту величину, которая при этом определяется (функцию).

Перед построением графика следует исходя из пределов, в которых заключены значения функции и аргумента, выбрать разумные масштабы по осям абсцисс Ox и по оси ординат Oy . Эти масштабы выбираются произвольно, независимо друг от друга, но так, чтобы график не был слишком мелким или растянутым по одной из осей. Иногда интервал, в котором заключены значения аргумента или функции, лежит далеко от нуля. В этом случае целесообразно начинать деления на соответствующей оси не с нуля, а с некоторого значения, лишь немногим меньшего, чем наименьшее значение, которое надо отложить на этой оси. В противном случае на графике получается много свободного места, а сама кривая - в очень мелком масштабе (рис. 1-а).

Масштабные деления наносят на оси, около них пишут соответствующие цифры. Экспериментальные значения на осях не отмечают. Стрелками можно указать направления, в которых возрастают откладываемые величины. У концов осей пишут обозначения этих величин с указанием единиц измерения. Иногда вдоль осей пишут полностью названия откладываемых величин. Далее на график наносят соответствующие экспериментальные точки. Проводить перпендикуляры от точек к осям координат не следует. Они затрудняют пользование графиком.

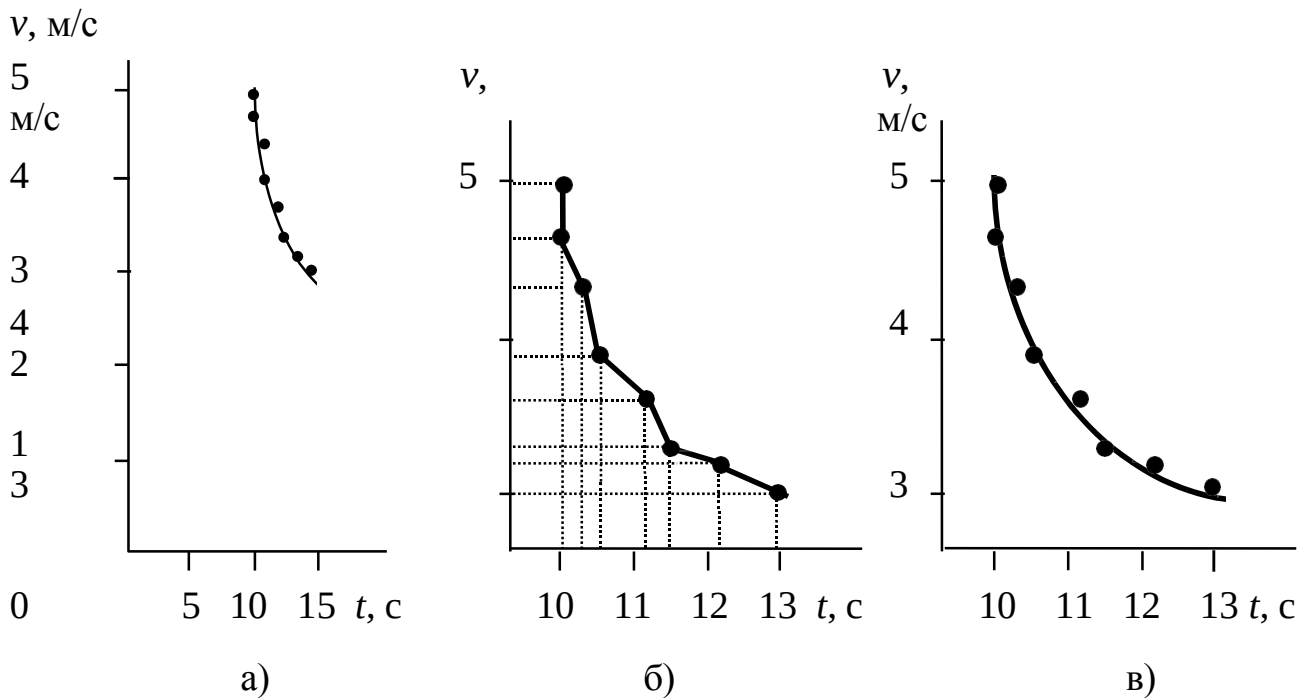


Рис.1. Примеры неправильного (а,б) и правильного (в) построения графиков

В том случае, когда ошибка аргумента мала по сравнению с ошибкой в значении функции, то на графике величину ошибки функции изображают вертикальным отрезком, на середине которого находится экспериментальная точка. Длина отрезка равна удвоенной величине ошибки в данном масштабе. Отрезок сверху и снизу ограничивают (рис.2).

Кривую на графике следует проводить, не просто соединяя точки друг с другом, а выбирая среди точек так называемое преимущественное направление. Эта кривая должна быть по возможности плавной и проходить таким образом, чтобы примерно одинаковое число точек находилось бы над кривой

и под ней. Если на графике нанесены величины ошибок в виде вертикальных отрезков, то кривая, как правило, должна лежать в пределах этих отрезков. Однако, если при этом вблизи какой-либо точки получается излом кривой, то лучше провести плавную кривую вне пределов ошибки. Для построения на графиках кривых линий пользуются лекалами.

При проведении кривой выявляется некоторый разброс точек, обусловленный наличием ошибок измерений. Чем меньше ошибки измерений, тем лучше точки ложатся на кривую. При этом отдельные грубые просчеты и явно ошибочные измерения легко обнаружить, так как соответствующие им точки будут расположены далеко от кривой.

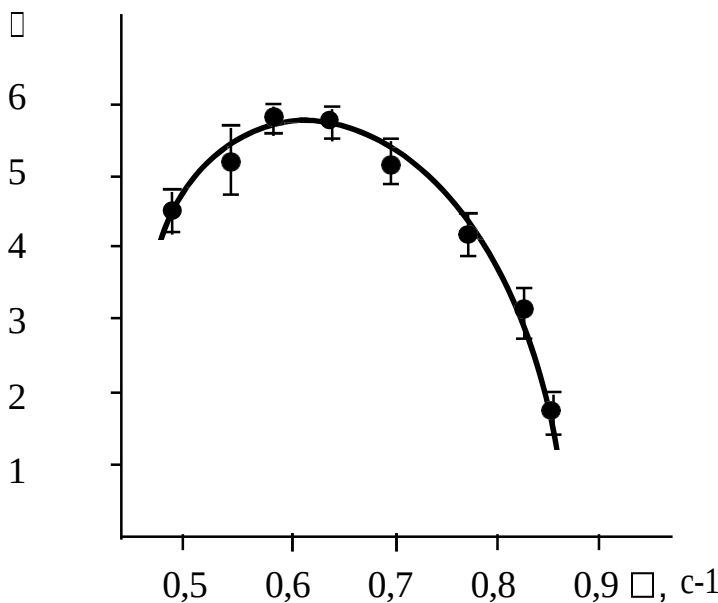


Рис.2. Построение графика с указанием доверительных интервалов

На рис.1 показаны примеры неправильного (а), (б) и правильного (в) построения одного и того же графика.

Иногда на одной или на обеих осях наносят не равномерную шкалу, а откладывают в каком-либо масштабе значение некоторой функции величин x и y .

Из функциональных масштабов чаще всего используют логарифмический масштаб. При построении графиков в этом случае применяют специальную разграфленную типографским способом бумагу: полулогарифми-

ческую с линейным масштабом по оси абсцисс и логарифмическим масштабом по оси ординат и логарифмическими масштабами по обеим осям. На полулогарифмической бумаге зависимость вида $y = a^{bx}$ изображается прямой линией. На логарифмической бумаге в виде прямой линии получается зависимость $y = ax^b$.

Логарифмический масштаб очень удобен при изображении на графиках величин, пределы изменения которых составляют несколько порядков.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Для работы в физической лаборатории необходимо иметь тетрадь для конспектов. В этой тетради студент при подготовке к лабораторному занятию составляет конспект теоретического материала к лабораторной работе. Отчет по работе оформляется на отдельных листах (формат 11) или в тетради по следующему плану (см. Приложение 3):

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Факультет, группа, фамилия.
3. Цель работы.

Цель работы формулируется обычно в методическом указании к лабораторной работе. Иногда студент должен сформулировать ее самостоятельно. Цель работы должна быть указана и в случае, если она дублирует название работы.

4. Измерительные приборы и их характеристики.

В перечень измерительных приборов вносятся лишь те приборы, с помощью которых в данной работе производятся измерения. При этом необходимо указывать основные характеристики приборов: диапазон измерений с нижним и верхним пределами измерений, класс точности или приборную погрешность.

5. Принадлежности и материалы.

6. Краткое теоретическое введение.

В теоретическом введении кратко описывают суть физических явлений, положенных в основу данной работы; приводят аналитические и графические зависимости, необходимые для понимания явления; расшифровывают обозначения величин, входящих в формулы; чертят схемы установки по правилам, принятым при выполнении эскизов в техническом черчении. Выделяют рабочие формулы, т.е. формулы, с помощью которых рассчитывают косвенно измеряемую в работе величину. Например, при измерении ускорения свободного падения по высоте и времени падения груза рабочей формулой является не $h = gt^2/2$, а $g = 2h/t^2$.

6. Таблицы измерений.

Таблицы, как правило, необходимо составлять самостоятельно, пользуясь следующими правилами. В таблицах слева направо должны быть расположе-

ны колонки: номера измерений по порядку, прямо измеряемые величины, а затем - косвенно. В верхнюю строчку записывают обозначения величин и единицы их измерений (наименование единиц записывают через запятую после символа величины). В остальные строки записывают измеряемые значения. Прямо измеренные величины записывают в тех единицах, в которых проводилось измерение. Косвенно измеряемые величины должны быть вычислены в единицах СИ.

7. Расчет измеряемых величин.

8. Оценка погрешностей.

Оценку погрешностей измерений производят по правилам, изложенным в разделе 7.

9. Результаты измерений, графики.

Окончательный результат записывают по форме, указанной в разделе 7, для величин, измерение которых было целью работы. Если целью работы было нахождение зависимости между различными величинами, то результаты измерений представляют в виде графика по правилам, указанным в разделе 8. Графики выполняют на миллиметровой бумаге карандашом, с тем, чтобы после замечаний преподавателя можно было внести необходимые исправления. Миллиметровую бумагу подклеивают к отчету.

10. Выводы.

В выводах отмечают, насколько удовлетворительны полученные результаты измерений, т.е. достаточно ли они точны, совпадают ли они с табличными данными (если такие имеются), чем вызваны погрешности. Если целью работы является нахождение зависимости между различными величинами, в выводах описываются особенности полученной зависимости, приводят сравнение ее с теоретически ожидаемой, анализируют причины отклонений полученных экспериментально результатов от ожидаемых.

КОЭФФИЦИЕНТЫ СТЬЮДЕНТА

n/α	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,3	12,7	31,8	63,7	630,6
3	2,9	4,3	7,0	9,9	36,6
4	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
13	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
15	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
16	1,8	2,1	2,6	2,9	4,0
17	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
18	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
19	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
20	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить явления вязкости в жидкости определить коэффициент внутреннего трения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

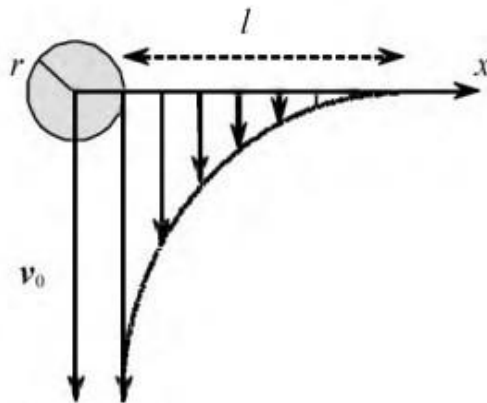


Рисунок 2.1.1

Рассмотрим движение шарика с малой скоростью v_0 в жидкости. Распределение скоростей в соседних слоях жидкости, увлекаемых шариком, имеет вид, изображенный на рис.2.1.1.

В непосредственной близости к поверхности шарика скорость слоев жидкости $v = v_0$, а по мере удаления она уменьшается и становится практически равной нулю на некотором расстоянии l от поверхности.

Чем больше радиус шарика r , тем большая масса жидкости вовлекается им в движение и l должно быть пропорционально r :

$$l = \alpha r.$$

Для шара коэффициент пропорциональности $\alpha = 2/3$.

Среднее значение градиента скорости

$$\left\langle \frac{dv}{dx} \right\rangle = \frac{v_0 - 0}{l} = \frac{v_0 - 0}{\alpha r} = \frac{v_0}{\alpha r}.$$

Сила сопротивления

$$F_c = f_{тр} S = - \eta \left\langle \frac{dv}{dx} \right\rangle S = - \eta \frac{v_0}{\alpha r} S = - \eta \frac{v_0}{\alpha r} 4\pi r^2 = - 6 \pi \eta r v_0, \quad (2.1.1)$$

где $f_{\text{тр}}$ - сила трения, действующая на единицу площади, $S = 4\pi r^2$ - площадь поверхности шарика, η - коэффициент внутреннего трения жидкости.

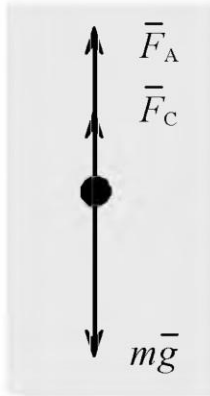


Рисунок 2.1.2

При падении шарика в вязкой жидкости на него действуют силы (рис.2.1.2):

- сила тяжести mg

$$mg = \rho_{\text{ш}} gV = \rho_{\text{ш}} g \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (2.1.2)$$

где V - объем шарика, r - радиус шарика, $\rho_{\text{ш}}$ - плотность материала шарика;

- выталкивающая сила Архимеда F_A

$$F_A = \rho_{\text{ж}} gV, \quad (2.1.3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости;

- сила сопротивления движению (сила Стокса) F_C .

$$F_C = 6 \pi \eta r v_0.$$

Согласно второму закону Ньютона с учетом (2.1.1) - (2.1.3)

$$m \bar{g} + \bar{F}_A + \bar{F}_C = m \bar{a} \quad \text{или} \quad mg - F_A - F_C = ma,$$

$$\rho_{\text{ш}} gV - \rho_{\text{ж}} gV - 6 \pi \eta r v_0 = ma.$$

В начале движения скорость движения шарика возрастает, но по мере увеличения скорости сила сопротивления также возрастает и наступает момент, когда сила тяжести уравнивается суммой сил Архимеда и Стокса; равнодействующая всех сил становится равной нулю:

$$\rho_{\text{ш}} gV - \rho_{\text{ж}} gV - 6 \pi \eta r v_0 = 0 \quad (2.1.4)$$

и движение шарика становится равномерным.

Решая уравнение движения (2.1.4) относительно коэффициента внутреннего трения (вязкости) η жидкости, получим

$$\eta = \frac{\rho_{\text{ш}} g V - \rho_{\text{с}} g V}{6 \pi r v_0} = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{с}}) g V}{6 \pi r v_0} = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{с}}) g r^2}{9 v_0}.$$

Скорость v_0 равномерного движения шарика можно определить, зная расстояние L равномерного участка пути и время t движения на участке.

Тогда
$$\eta = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{с}}) g r^2 t}{9 L}$$

или
$$\eta = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{с}}) g d^2 t}{18 L}, \quad (2.1.5)$$

где d - диаметр шарика.

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ:

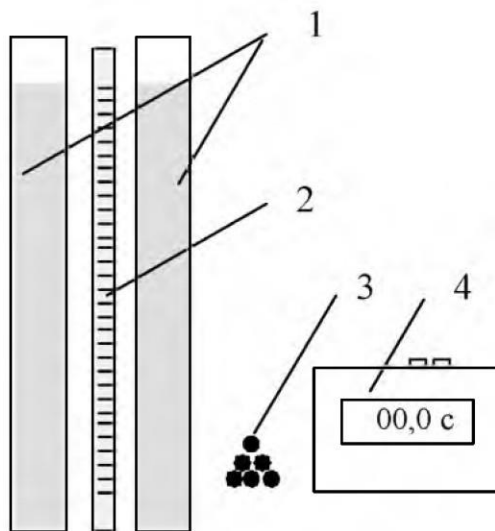


Рисунок 2.1.3

Экспериментальная установка для определения коэффициента внутреннего трения (вязкости) η жидкости методом Стокса (рис.2.1.3) состоит из сосудов 1 с исследуемыми жидкостями, установленных вертикально, измерительной миллиметровой линейки 2, металлических шариков 3 различного диаметра, электронного секундомера 4 и штангенциркуля или микрометра.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установив верхнюю и нижнюю метки на линейке, измерить расстояние L между ними. Верхняя метка должна быть на 5–10 см ниже уровня жидкости.
2. Измерив диаметр шарика d , опустить его в сосуд с жидкостью.
3. Измерить время t движения шарика между метками.
4. Повторив опыт не менее 5 раз, рассчитать коэффициент внутренне-

го трения (вязкости) η жидкости по формуле (2.1.5) и оценить погрешность измерений.

5. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.1.1.

Таблица 2.1.1 Экспериментальные результаты

№ п.п	L , м	d , м	t , с	η , Па·с	η , Па·с	Примечание
1						$\rho_{\text{ш}} = \dots \text{кг/м}^3$
2						$\rho_{\text{ж}} = \dots \text{кг/м}^3$
...						$g = 9,8 \text{ м/с}^2$

6. Повторить эксперимент по п.п.1-5 для другой жидкости.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с [5]

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

От чего зависит коэффициент вязкости η жидкости?

Как влияет на результат измерений диаметр сосуда?

Можно ли измерить коэффициент вязкости η жидкости, если плотность $\rho_{\text{ш}}$ шарика меньше плотности $\rho_{\text{ж}}$ жидкости?

ЛИТЕРАТУРА

1. Курс физики.т.1 / Под редакцией В.Н. Лозовского.-СПб.: Изд.Лань, 2000
2. Савельев И.В. Курс физики.-М.: Наука, 2002, т.2.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.-М.: Высшая школа, 1999.
4. Трофимова. Курс физики.-М.: Высшая школа, 2001.
5. Голубин М.А., Хабибулин И.М., Шестопалова В.И. Введение в лабораторный практикум.- Ставрополь.: Изд.СевКавГТУ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2

где m_i - масса i -й частицы тела (тело разбито на n частиц); r_i - расстояние от i -й частицы до оси вращения.

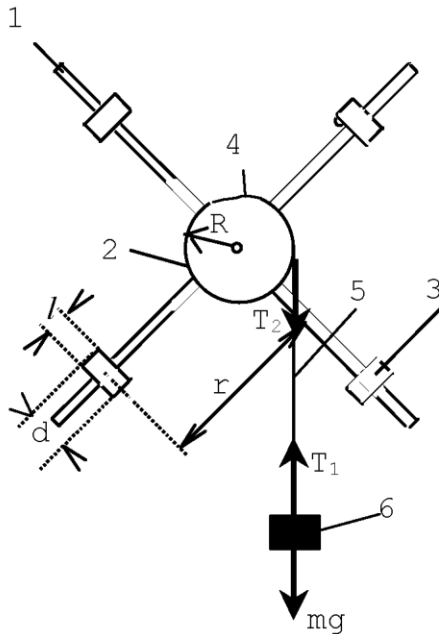


Рисунок 6 – Маятник Обербека

Изучение основных законов поступательного и вращательного движения можно производить на экспериментальной установке, называемой маятником Обербека. Особенностью этой установки является то, что одна ее часть совершает поступательное движение, а другая – вращательное. Он представляет собой крестовину, образованную четырьмя стержнями 1 (рис.6), закрепленными в бобышке 2 под прямым углом друг к другу. На каждом стержне могут свободно перемещаться и закрепляться цилиндры 3 одинаковой массы. На шкив 4 намотана нить 5, один конец которой прикреплен к шкиву. К другому концу нити подвешивается груз 6.

Причиной вращательного движения крестовины маятника является действие на него момента M силы реакции нити T_2 . Вращательному движению крестовины препятствует момент силы трения в подшипниках - $M_{тр}$. Для описания вращательного движения крестовины маятника запишем основной закон динамики вращательного движения в векторной форме

$$J\ddot{\varphi} = \vec{M} + \vec{M}_{тр}. \quad (27)$$

Проекции векторов $\vec{M}$ и $\vec{M}_{тр}$ на ось вращения имеют противоположные знаки. С учетом этого уравнение (27) в проекции на ось вращения имеет вид

$$J\ddot{\varphi} = M - M_{тр}, \quad (28)$$

Откуда

$$\varepsilon = \frac{M - M_{mp}}{J}. \quad (29)$$

Поскольку в выражении (29) величина ε является функцией двух переменных (суммарного момента сил и момента инерции), то изучение закона динамики вращательного движения твердого тела можно выполнять путем раздельного изучения двух зависимостей.

1) Изучение зависимости углового ускорения ε от суммарного момента сил $\sum_{i=1}^n M_i$ при постоянном значении момента инерции.

Если момент инерции системы J не изменяется, то уравнение (29) можно переписать в виде

$$\varepsilon = -\frac{M_{mp}}{J} + \frac{1}{J}M, \quad (30)$$

где $\frac{M_{mp}}{J} = const$.

Из выражения (30) видно, что угловое ускорение ε линейно зависит от M , а график зависимости $\varepsilon = f(M)$ при $J = const$ – прямая, не проходящая через начало координат. Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси "М", численно равен M_{mp} ; угловой коэффициент прямой, численно равный $\frac{1}{J}$, может быть найден из графика:

$$\frac{1}{J} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta M}, \quad (31)$$

где ΔM – произвольный отрезок на оси M ,

$\Delta\varepsilon$ – соответствующий отрезок на оси ε .

Формулу для расчета момента силы реакции нити M найдем следующим образом. Так как радиус вектор ρ совпадает в данном случае с радиусом шкива R , то согласно (25) $M = RT_2$. Если пренебречь массой нити и силами трения в блоке, то силы реакции, действующие на блок и на груз, равны $T_1 = T_2 = T$.

Силу натяжения T найдем из второго закона Ньютона для поступательного движения груза

$$T = m(g - a). \quad (32)$$

Ускорение груза постоянно, т.к. действующие на него силы не меняются

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (33)$$

где t – время, в течение которого груз из состояния покоя проходит путь h .

Тогда

$$M = mR(g - \frac{2h}{t^2}) \quad (34)$$

Поэтому изменяя массу груза m , можно изменять момент силы M .

Ускорение груза a равно линейному ускорению точек на поверхности шкива, поэтому для углового ускорения крестовины имеем

$$\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (35)$$

2) Изучение зависимости углового ускорения ε от момента инерции J при постоянном значении суммарного момента сил.

Если в выражении (29) оставлять постоянным действующий момент сил $(M - M_{mp}) = \text{const}$, а изменять момент инерции, то угловое ускорение ε будет меняться обратно пропорционально суммарному моменту инерции системы:

$$\varepsilon = (M - M_{mp}) \frac{1}{J}.$$

При этом график зависимости $\varepsilon = f\left(\frac{1}{J}\right)$ – прямая, проходящая через начало координат. Угловый коэффициент прямой, численно равный $(M - M_{mp})$, может быть найден следующим образом:

$$M - M_{mp} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\left(\frac{1}{J}\right)}, \quad (36)$$

где $\Delta\left(\frac{1}{J}\right)$ - произвольный отрезок на оси $\left(\frac{1}{J}\right)$, $\Delta\varepsilon$ - соответствующий отрезок на оси ε .

В случае маятника Обербека момент инерции крестовины с цилиндрами вычисляют по формуле

$$J = J_k + 4J_{\text{ц}} + 4m_0r^2, \quad (37)$$

где J_k - момент инерции крестовины без цилиндров 3 (рис.6), $J_{\text{ц}}$ - момент инерции цилиндра относительно оси, проходящей через его центр масс и параллельно оси вращения, m_0 - масса цилиндра, r - расстояние от оси вращения до центра масс цилиндра.

Величина $J_0 = J_k + 4J_{\text{ц}}$ остается постоянной в данной работе, а изменение J осуществляется за счет изменения расстояния r . Поэтому момент инерции J можно представить как

$$J = J_0 + 4m_0r^2. \quad (38)$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ I

Исследование зависимости углового ускорения маятника Обербека от момента силы при постоянном значении момента инерции.

1. Изучить экспериментальную установку и занести в таблицу 6 в графу "Примечание" значение радиуса шкива R , диаметра d и высоты l привески, массы m_0 .

2. Установить цилиндры примерно на середине стержней. Измерить расстояние r от оси вращения до цилиндров.

3. Подвесить к нити груз и , вращая крестовину против часовой стрелки, перевести груз в положение, выбранное Вами. Во всех следующих опытах начальное положение груза должно оставаться одним и тем же.

4. Предоставив грузу возможность падать, включить одновременно секундомер. В момент, когда нить полностью разматывается, секундомер останавливают. Произвести отсчет времени опускания груза t по секундомеру, а

так же путь h , проходимый грузом при падении. Результаты измерений занести в таблицу 6.

5. Повторить измерения по п.п.3-4 не менее пяти раз.
6. Произвести измерения по п.п. 3-6 для других значений масс груза m .
7. Определить косвенно измеряемые величины ε и M по формулам (34) и (35).
8. Оценить погрешность величин ε, M .
9. Построить график зависимости $\varepsilon = f(M)$. Убедиться, что график представляет собой прямую линию, проходящую через все доверительные интервалы.
10. Найти по графику угловой коэффициент прямой (31). Исходя из этого значения, с помощью формулы (38) рассчитать постоянную составляющую J_0 момента инерции системы.
11. По графику определить момент силы трения $M_{тр}$. Для этого следует измерить длину отрезка, отсекаемого прямой на оси " M ".

ЗАДАНИЕ II

Исследование зависимости углового ускорения маятника Обербека от момента инерции при постоянном значении момента силы.

1. Установить цилиндры на максимальном расстоянии r от оси вращения. Измерить это расстояние.
2. Подвесить на нить заданное число грузов и, повторяя пункты 3-6 задания I, произвести отсчет времени опускания груза при различных положениях цилиндров на крестовине.
3. Определить косвенно измеряемые величины ε и J по формулам (35) и (38) соответственно, при этом величину J_0 считать равной значению, измеренному в задании I.

4. Построить график зависимости $\varepsilon = f\left(\frac{1}{J}\right)$. Убедиться, что он представляет собой прямую линию, проходящую через доверительные интервалы.

ТАБЛИЦА 6 - Экспериментальная зависимость углового ускорения маятника Обербека от момента силы при постоянном моменте инерции цилиндров.

Прямые измерения						Косвенные измерения											Прим		
Измер. величины		№ измерения					$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					Средн знач	$\varepsilon, \text{рад/с}^2$					Средн знач	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	$\langle M \rangle$	1	2	3	4	5	$\langle \varepsilon \rangle$	$h=$
$m_1=$	$t, \text{с}$																		$R=$
$m_2=$	$t, \text{с}$																		$r=$
$m_3=$	$t, \text{с}$																		$l=$
$m_4=$	$t, \text{с}$																		$d=$
$m_5=$	$t, \text{с}$																		$m_0=$

ТАБЛИЦА 7 - Экспериментальная зависимость углового ускорения маятника Обербека от момента инерции при постоянном моменте силы.

Прямые измерения						Косвенные измерения									Прим
Измер. величины		№ измерения					$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2$					Средние значения		
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	$\langle \varepsilon \rangle$	$h=$	
$r_1=$	$t, \text{с}$													$R=$	
$r_2=$	$t, \text{с}$													$r=$	
$r_3=$	$t, \text{с}$													$l=$	
$r_4=$	$t, \text{с}$													$d=$	
$r_5=$	$t, \text{с}$													$m_0=$	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сравнить основной закон динамики поступательного и вращательного движения.

2. На рисунке 1 покажите направление момента M силы реакции T_2 и момента трения $M_{\text{тр}}$ силы трения.
3. Почему с увеличением расстояния r увеличивается время t падения груза.
4. При каком условии наклон прямой на графике $\varepsilon = f(M)$ увеличится (уменьшится)?
5. Каков физический смысл величины, равной наклону прямой на графике $\varepsilon = f(1/J)$?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т.1. М. 2002.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Построение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электрического поля, созданного электродами различной формы.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: электролитическая ванна, электроды различной формы, блок питания, цифровой вольтметр.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Электрические заряды взаимодействуют между собой посредством электрического поля, которое представляет собой особую форму материи. В случае неподвижных зарядов поле называют электростатическим.

Электрическое поле характеризуется в каждой своей точке двумя характеристиками: силовой - вектором электрической напряженности $\vec{E}$ и энергетической (скалярной) - потенциалом φ .

Напряженностью E электрического поля в данной точке называется векторная величина, численно равная и совпадающая по направлению с силой F , действующей со стороны поля на единичный положительный заряд q_0 , помещенный в рассматриваемую точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Принято считать, что вектор напряженности направлен от положительного заряда (рис.1-а) и к отрицательному заряду (рис.1-б).

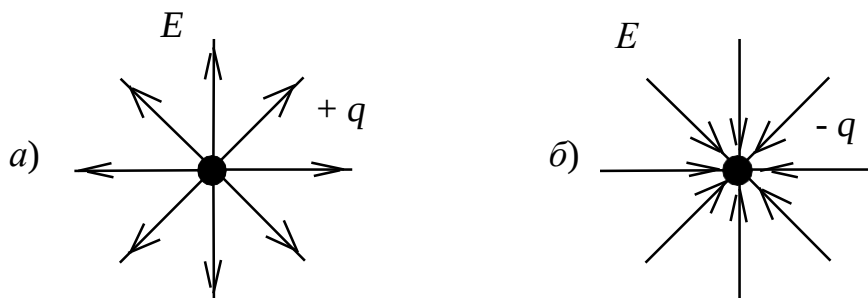


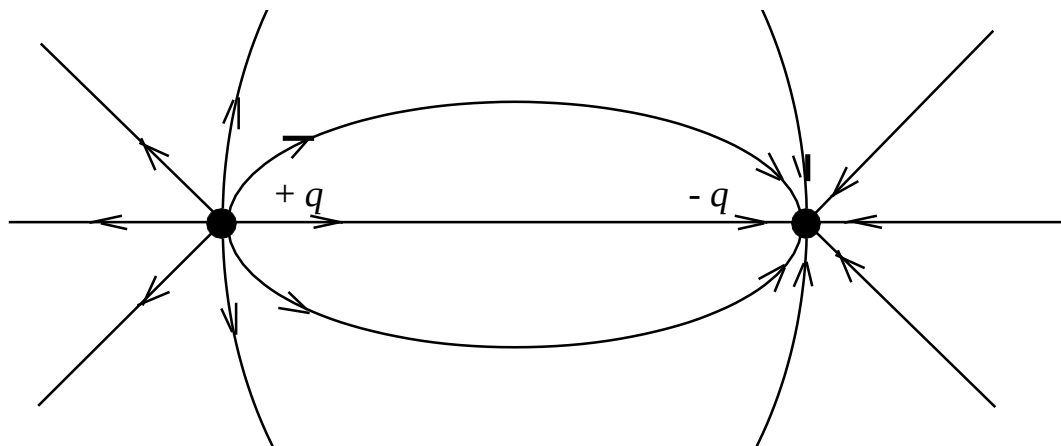
Рис.1

Если электрическое поле создано системой зарядов, т.е. существует несколько полей, то вектор напряженности $\vec{E}$ результирующего поля равен геометрической сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

Это соотношение носит название принципа суперпозиции электрических полей. С его помощью можно в общем виде рассчитать электрические поля сколь угодно сложных систем электрических зарядов.

Таким образом, для описания электрического поля нужно задать вектор напряженности в каждой точке поля. Сделать это можно аналитически или графически, используя силовые линии. Силовой линией, или линией вектора напряженности электрического поля, называют линию, для которой направление касательной в любой точке совпадает с направлением вектора напряженности поля (рис.2).



Густота силовых линий, проходящих через единицу поверхности перпендикулярной к силовым линиям, пропорциональна величине напряженности поля в данном месте. Изображения силовых линий поля (карта поля), наглядно показывают, чему равна напряженность в разных частях поля и как она изменяется в пространстве. Вследствие наглядности этот способ представления по-

лей широко применяется в электротехнике.

Потенциалом электростатического поля в данной точке называется скалярная величина, численно равная отношению потенциальной энергии W положительного заряда к величине заряда q_0 , помещенного в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{W}{q_0},$$

т.е. потенциал не зависит от величины пробного заряда q_0 и характеризует свойства поля в данной его точке.

Связь между напряженностью поля и потенциалом выражается как:

$$E = - \frac{d\varphi}{dr},$$

т.е. напряженность поля это быстрота изменения потенциала по координате dr или в общем виде:

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi,$$

знак "минус" означает, что вектор напряженности $\vec{E}$ электрического поля направлен в сторону убывания потенциала φ .

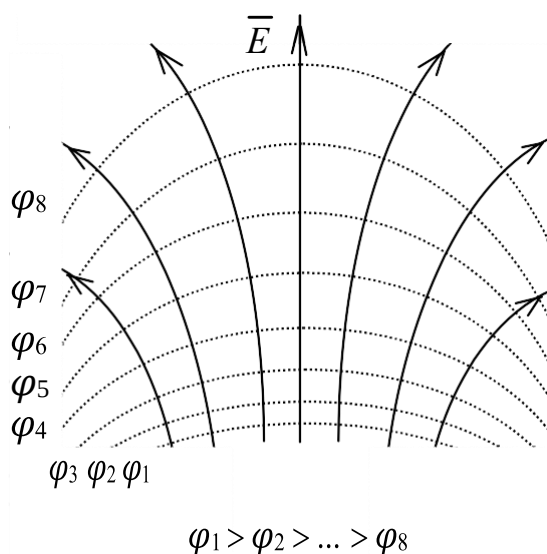


Рис.3

Объединяя в электрическом поле точки, обладающие одинаковым потенциалом, мы получаем некоторые поверхности, называемые поверхностями равного потенциала или эквипотенциальными поверхностями. Прочерчивая эквипотенциальные поверхности, соответствующие различным значениям потенциала, мы сразу получаем наглядное представление о том как изменяется потенциал в данном поле. Т.к. все точки эквипотенциальной поверхно-

сти находятся при одинаковом потенциале, то перемещение заряда вдоль нее

не требует работы. Это означает, что сила действующая на заряд, все время перпендикулярна перемещению. Следовательно, силовые линии всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям (рис.3). Поэтому, зная эквипотенциальные поверхности, можно построить силовые линии, и наоборот.

Если внести в электростатическое поле (рис.4-а) проводник, то в нем произойдет разделение положительных и отрицательных зарядов. Появившиеся в результате разделения заряды называют индуцированными зарядами. Разделение зарядов происходит до тех пор, пока их электрические поля не скомпенсируют внешнее поле. В установившемся состоянии результирующее поле внутри проводника равно нулю ($\vec{E} = 0$) и заряды находятся в равновесии.

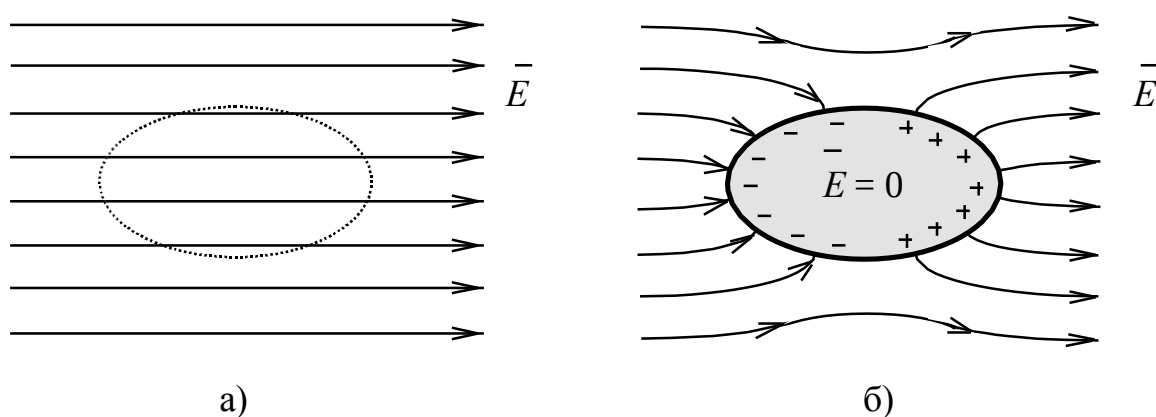


Рис.4

Согласно теореме Гаусса: поток вектора $\vec{E}$, сквозь замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов внутри этой поверхности, делённой на ϵ_0 :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

А так как в проводнике всюду $\vec{E} = 0$, то поток вектора $\vec{E}$ через любую замкнутую поверхность в проводнике, также равен нулю, т.е. согласно (7) внутри проводника избыточных зарядов нет. Избыточные заряды появляются лишь на поверхности проводника.

Отсутствие поля внутри проводника означает, что потенциал φ в проводнике одинаков во всех его точках, т.е. любой проводник в электростатиче-

ском поле представляет собой эквипотенциальную область и его поверхность является эквипотенциальной. Из этого факта следует, что непосредственно у этой поверхности линии напряженности $\vec{E}$ перпендикулярны этой поверхности (рис.4-б).

При внесении в электрическое поле диэлектрика (рис 5-а), в нем появляются поверхностные связанные заряды, объёмные же избыточные заряды во всех точках такого диэлектрика будут равны нулю.

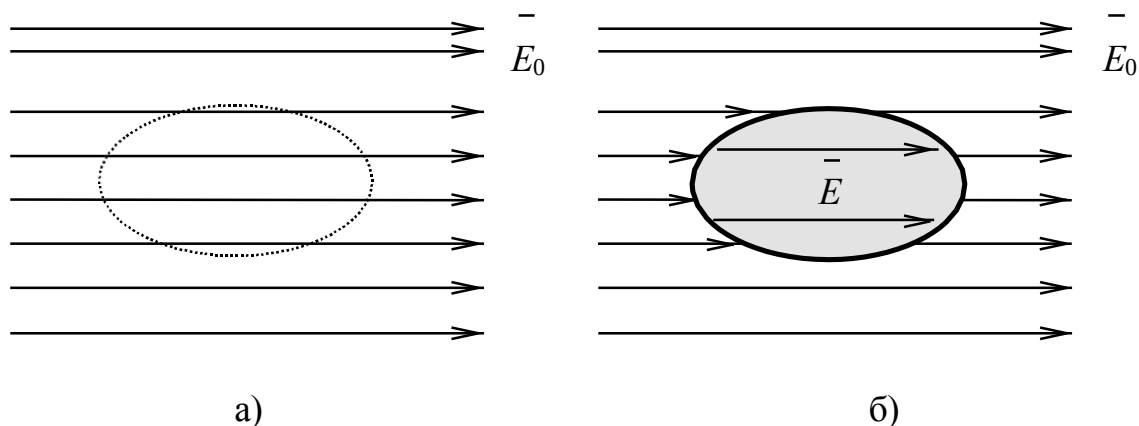


Рис.5

Поле связанных зарядов направлено навстречу внешнему полю, поэтому оно ослабляет внешнее поле в ϵ раз (рис 5-б), т.е.

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon},$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость вещества.

Потенциал φ в среде:

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{\epsilon},$$

где φ_0 - потенциал электрического поля при отсутствии диэлектрика.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

Метод исследования электростатического поля с помощью силовых ли-

ний и эквипотенциальных поверхностей полезен при изучении сложных электростатических полей, точный расчет которых затруднителен из-за сложности граничных условий (многоэлектродные радиолампы, электростатические линзы, фотоэлектронные умножители). При этом принципиальное значение имеет правило подобия потенциалных полей, позволяющее в большом масштабе воспроизводить подлежащие изучению поля. Правило подобия утверждает, что если размеры электродов, создающих поле, и все расстояния между электродами изменены в одной пропорции, то структура поля остаётся прежней.

Для построения силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электрического поля, созданного электродами различной формы, используется установка, функциональная схема которой, приведена на рис.6.

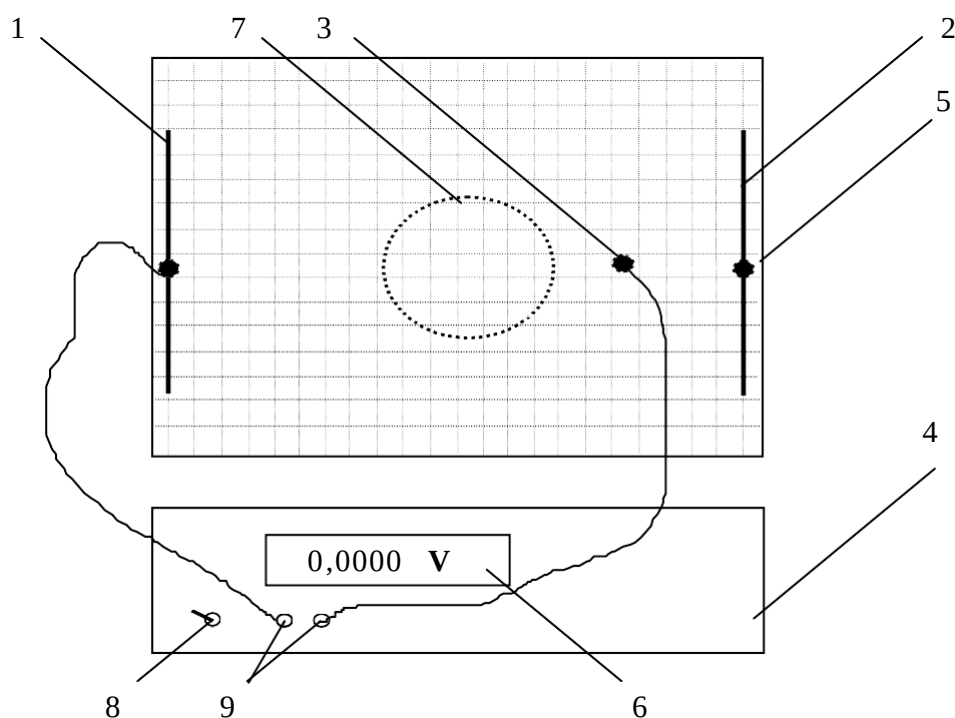


Рис. 6

Проверив исправность соединения электродов 1 и 2 с блоком питания 4 и исправность соединения электрода 1 и подвижного электрода (зонда) 3 с клеммами 9 вольтметра, включить установку тумблером 8. Блок питания 4 системы электродов, находящихся в электролитической ванне 5, создаёт элек-

трическое поле между электродами. Подвижный электрод 3, соединенный с цифровым вольтметром 6, служит для нахождения точек одинакового потенциала в электростатическом поле, создаваемом электродами 1 и 2.

Перемещая зонд, необходимо зафиксировать и нанести на свою масштабную сетку 8-10 точек для каждого из требуемых потенциалов, исходя из положения зонда на масштабной сетке в электролитической ванне, выбирая 5-7 значений потенциала таким образом, чтобы эквипотенциальные поверхности охватывали всю площадь ванны.

На своей масштабной сетке, соединив точки с равными потенциалами, провести эквипотенциальные линии и силовые линии электрического поля.

Для изучения электрического поля в присутствии проводящих и непроводящих поверхностей, поместить кольцо 7 (металлическое или из диэлектрика) и провести определение положения эквипотенциальных поверхностей.

В выводах сравнить абсолютные значения диэлектрической проницаемости диэлектриков и характер их зависимости от напряженности электрического поля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Какие поля называются электростатическими? Сформулируйте и докажите теорему Остроградского-Гаусса. Каковы основные характеристики электростатического поля?

Каково условие потенциальности силового поля? Докажите, что электростатическое поле является потенциальным.

Какова связь между потенциалом и напряженностью электростатического поля? Как направлены линии напряженности к поверхности электродов и металлического кольца? Как влияет материал кольца на карту поля?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МОСТИКОМ УИТСТОНА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение сопротивления проводников.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: нуль-гальванометр, магазин сопротивлений, реохорд, источник постоянного тока, набор сопротивлений.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В электродинамике важнейшим понятием является понятие электрического тока. Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

Выделяют следующие 3 вида токов: конвекционный, когда электрические заряды перемещаются вместе с макроскопическими телами, на которых они находятся (заряженное тело перемещается в пространстве); ток в вакууме, когда микроскопические электрические заряды движутся в пустоте независимо от макроскопических тел (потoki электронов в электронной лампе); ток проводимости, когда микроскопические электрические заряды движутся внутри неподвижного макроскопического тела (направленное движение свободных электрических зарядов в проводнике под действием внешнего электрического поля E).

Рассмотрим ток проводимости в проводнике.

При наличии свободных носителей тока - заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, и электрического поля в проводнике возникает электрический ток.

За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

Для количественной характеристики электрического тока служат две основные величины: плотность тока $\vec{j}$ и сила тока I .

Плотность тока $\vec{j}$ - векторная величина, определяемая величиной заряда, проходящего в единицу времени через единицу площади поперечного сечения. Ее особенность заключается в том, что плотность тока описывает состояние

проводника в каждой конкретной точке.

$$j = \frac{dq}{dS dt},$$

где dq - заряд, прошедший через поперечное сечение dS за время dt .

Учитывая, что $dq = e dN$, где e - заряд электрона, а dN - их количество в объеме dV проводника и зная выражение для концентрации носителей заряда $n = dN/dV$, получим:

$$j = \frac{n e dV}{dS dt}$$

При этом длина взятого проводника определяется как $dl = dV/dS$, а скорость носителей находится по формуле $v = dl/dt$.

Тогда для плотности тока электронов в проводнике можно записать:

$$j = nev. \quad (1)$$

Скорость носителя заряда зависит от свойств проводника и величины электрического поля. Для характеристики скорости движения носителей заряда вводится понятие подвижности носителей заряда. Подвижность μ носителя - величина, численно равная скорости его движения при напряженности электрического поля $E = 1$ В/м.

$$\mu = \frac{v}{E}.$$

Тогда формула (1) примет вид:

$$j = ne\mu E.$$

Введя обозначение $ne\mu = \gamma$, где γ - удельная проводимость вещества, окончательно получим:

$$j = \gamma E. \quad (2)$$

Данное выражение представляет собой закон Ома в дифференциальной форме. Он связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке.

Помимо понятия удельной проводимости существует и понятие удельное сопротивление. Удельное сопротивление ρ является величиной, обратной

удельной проводимости σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Вторая количественная характеристика электрического тока - сила тока. Сила тока I - скалярная величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени.

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Особенность данного параметра в том, что сила тока в отличие от плотности тока характеризует электрическое состояние во всем проводнике, а не в отдельных его точках.

Между силой и плотностью тока существует зависимость

$$j = \frac{dI}{dS}$$

Если сила и плотность тока не меняются во времени, то в проводнике имеется постоянный (стационарный) ток.

Закон Ома в интегральной форме в отличие от его дифференциальной записи содержит величины, характеризующие общее электрическое состояние всего проводника. Он выражает экспериментальную зависимость между силой тока i , текущего по проводнику и напряжением U на его концах:

$$I = \sigma U = \frac{1}{R} U, \quad (3)$$

где σ - электрическая проводимость, а R - сопротивление проводника.

Уравнение (3) представляет собой закон Ома для однородного (не содержащего источников тока) участка цепи.

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для однородного линейного проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Если цепь содержит источник тока, то:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}$ - электродвижущая сила источника тока; R - суммарное сопротивление всей цепи; r - внутреннее сопротивление источника.

Выражение (5) является обобщенным законом Ома.

Обобщенный закон Ома позволяет рассчитать практически любую сложную цепь. Однако непосредственный расчет разветвленных цепей, содержащих несколько контуров, довольно сложен. Эта задача решается с помощью двух правил Кирхгофа. Первое правило Кирхгофа вытекает из закона сохранения электрического заряда: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (6)$$

Узлом называется любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током.

Второе правило Кирхгофа вытекает из обобщенного закона Ома: для любого замкнутого контура сумма произведений сил токов на сопротивление соответствующих участков этого контура (или сумма падений напряжений) равна сумме Э.д.с. в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k. \quad (7)$$

В настоящей работе применяется метод сравнения сопротивлений, не требующий измерения ни тока, ни напряжения. Метод основан на сравнении сопротивления испытываемого проводника с уже известным сопротивлением (набранным в магазине сопротивлений).

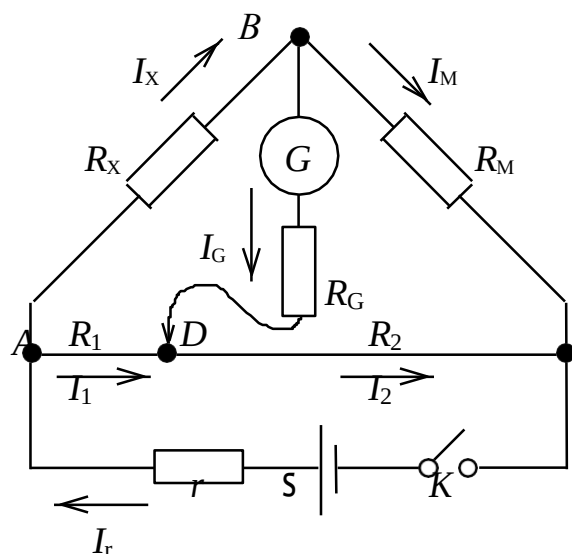


Рис.1

Измерения осуществляют в мостовой схеме, изображенной на рис.1, где R_M -сопротивление магазина; R_X - искомое сопротивление; AC - реохорд, представляющий собой барабан с нихромовой проволокой, по которой может перемещаться контакт D , разделяющий ее на два сопротивления - R_1 и R_2 ; G - чувствительный нуль-гальванометр; S - источник тока. Такая схема носит название мостика Уитстона.

Применим правила Кирхгофа для этой цепи.

Согласно первому правилу Кирхгофа (6) для узлов A , B и C будем иметь:

$$\begin{aligned} I_r - I_1 - I_X &= 0, \\ I_X - I_G - I_M &= 0, \\ I_M + I_2 - I_r &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Для контуров $ABCSA$, $ABDA$, $BCDB$ в соответствии со вторым правилом Кирхгофа (7), можно записать:

$$\begin{aligned} I_X R_X + I_M R_M + I_r r &= 0, \\ I_X R_X + I_G R_G - I_1 R_1 &= 0, \\ I_M R_M - I_2 R_2 - I_G R_G &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Из шести уравнений (8) и (9) можно определить сопротивление R_X при условии, что известен ток I_G , идущий через гальванометр, а также задана э.д.с источника S и все сопротивления, в том числе внутреннее сопротивление источника тока r и гальванометра R_G .

Решение этой задачи значительно упрощается, если, изменяя известные сопротивления R_1 , R_2 и R_M , добиться отсутствия тока через гальванометр ($I_G = 0$). Тогда из уравнений (8) находим:

$$I_X = I_M, \quad I_1 = I_2,$$

а из уравнений (9)

$$I_X R_X = I_1 R_1, \quad I_M R_M = I_2 R_2.$$

Отсюда легко вывести, что

$$R_X / R_M = R_1 / R_2 \quad \text{или} \quad R_X = (R_1 / R_2) \cdot R_M. \quad (10)$$

Таким образом, в случае равновесного моста ($I_G = 0$) при определении искомого сопротивления R_X э.д.с источника, внутреннее сопротивление источника тока и гальванометра роли не играют.

Так как реохорд представляет собой однородный проводник постоянно- го сечения, его сопротивление может быть вычислено по формуле (4). Под- ставляя (4) в выражение (10) будем иметь:

$$\frac{\rho l_1}{\rho l_2} S = \frac{R_X}{R_M}.$$

Отсюда находим величину искомого сопротивления

$$R_X = \frac{l_1}{l_2} R_M, \quad (11)$$

где l_1 и l_2 - длина участков AD и DC соответственно (длина может быть выра- жена в относительных единицах).

Точность сравнения R_X и R_M будет больше, когда отношение $R_X / R_M = l_1 / l_2$ не сильно отличается от единицы. Поэтому при измерении неизвестного со- противления R_X с помощью моста Уитстона желательно, чтобы сопротивление R_M не сильно отличалось от R_X . Погрешность измерений будет минимальной при $l_1 = l_2$, т.к. при этом $R_X = R_M$. Отсюда можно сделать вывод, что движок реохорда при измерениях желательно располагать вблизи его середины.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения сопротивления используется установка, функциональ- ная схема и передняя панель которой приведены на рис.1 и рис.2.

Выбрав переключателем 5 одно из пяти исследуемых сопротивлений R_x , движок реохорда 1 установить вблизи его середины (положение движка соответствует значению l_1 , $30 - l_1 = l_2$). Нажав кнопку 3, подобрать магазином сопротивлений 4 такое сопротивление R_M при котором ток через гальванометр 2 не течет (значения рукоятки 4а умножить 1000 Ом, 4б - 100 Ом, 4в - 10 Ом, 4г - 1 Ом и суммировать).

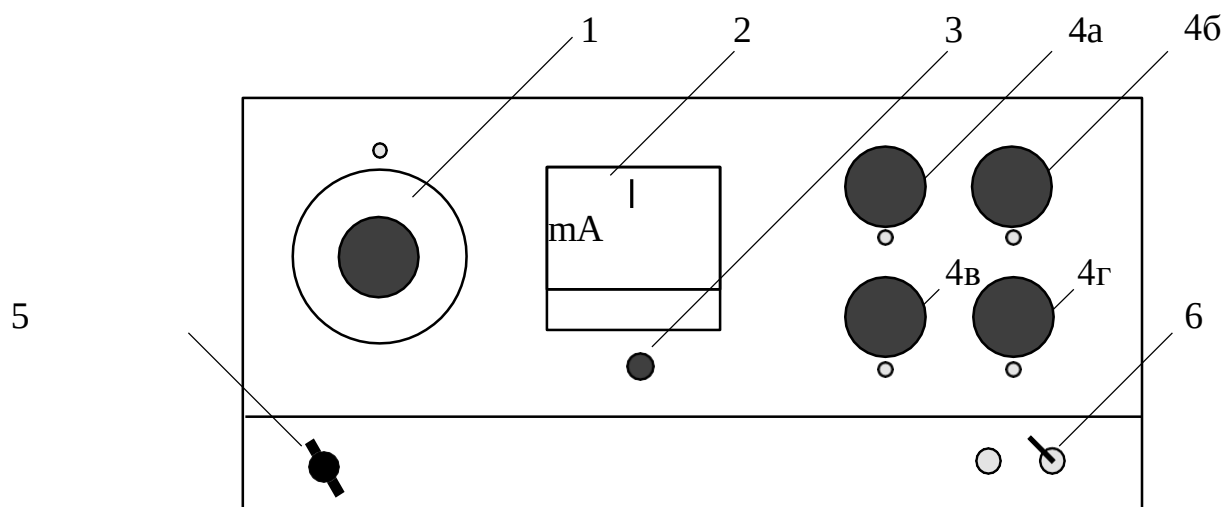


Рис.2

Повторить опыт не менее 3 раз для каждого исследуемого сопротивления, изменяя положение движка реохорда.

Рассчитать значения исследуемых сопротивлений по формуле (11) и определить погрешность измерений.

Оценить мостовой метод измерения сопротивлений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что такое электрическое сопротивление, единицы измерения. Закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.

Запишите правила Кирхгофа.

Какова зависимость сопротивления от материала проводника и его геометрических размеров.

Физический смысл удельного сопротивления и его размерность.

Каким образом можно измерять малые сопротивления мостиком Уитстона?

Как определить общее сопротивление нескольких проводников, соединенных параллельно? соединенных последовательно?

Какими элементами измерительной схемы обусловлена высокая погрешность результатов?

Каким образом можно повысить точность результатов измерений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАМКИ С ТОКОМ В РАДИАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение зависимости угла поворота рамки в магнитном поле от величины тока.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: постоянный магнит, рамка, блок питания, угломер, миллиамперметр.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Согласно закону Ампера на элемент $d\vec{l}$ проводника с током I , помещенный в магнитное поле индукцией $\vec{B}$, действует сила $d\vec{F}$, равная

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}].$$

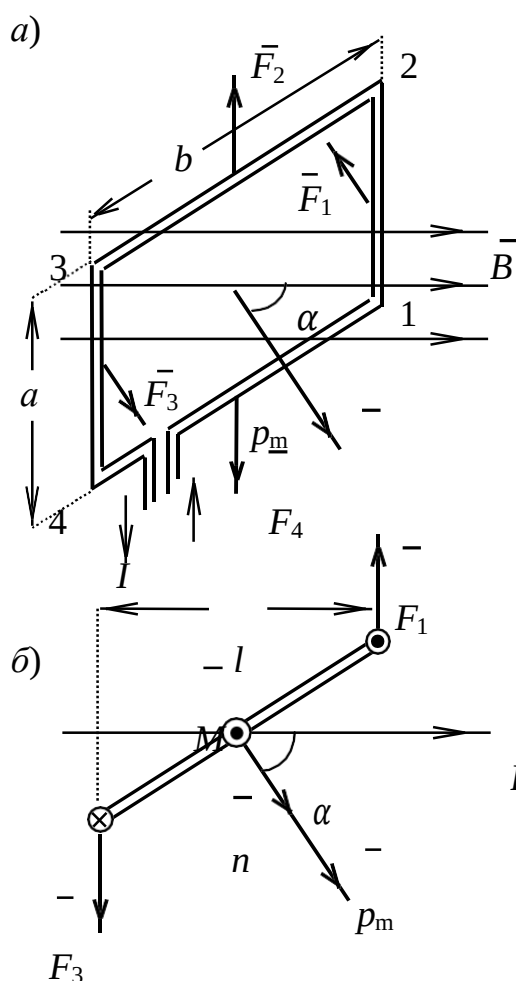


Рис.1

Пусть проводник, изогнутый в виде прямоугольной рамки, свободно подвешен на неупругой нити в однородном магнитном поле (рис.1). В отсутствие тока в рамке она находится в состоянии безразличного равновесия. При пропускании через рамку постоянного тока она поворачивается таким образом, что ее плоскость располагается перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля.

На рамку действуют моменты сил, $\vec{B}$ обусловленные действием сил Ампера на проводники с током.

Силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$, приложенные к проводникам 2-3 и 4-1, направлены вдоль вертикальной оси рамки в противоположные стороны. Эти силы стремятся деформиро-

вать рамку и вращения не вызывают.

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$, действующие на проводники 1-2 и 3-4, направлены перпендикулярно плоскости рис.1-а в противоположные стороны и по закону Ампера численно равны

$$F_1 = F_3 = I a B, \quad (1)$$

где I - сила тока в проводнике, B - индукция магнитного поля, a - длина проводников 1-2 и 3-4.

Результирующий вращающий момент $\vec{M}$, действующий на рамку, равен моменту пары сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$ с плечом $\frac{l}{2} = \frac{1}{2} b \sin \alpha$, где α - угол между направ-

лениями векторов $\vec{B}$ и нормали $\vec{n}$, b - длина проводников 2-3 и 4-1.

$$M = 2F_1 \frac{l}{2} = F_1 b \sin \alpha,$$

или с учетом выражения (1)

$$M = I a b B \sin \alpha = I S B \sin \alpha, \quad (2)$$

где $S = a b$ - площадь рамки.

Величина, равная произведению тока I в рамке на площадь S этой рамки и совпадающая по направлению с вектором нормали $\vec{n}$, называют магнитным моментом $\vec{p}_m$

$$\vec{p}_m = I S \vec{n}. \quad (3)$$

С учетом этого выражение (2) можно представить в виде

$$M = p_m B \sin \alpha = p_m B \sin(\widehat{\vec{p}_m \vec{B}}). \quad (4)$$

Вектор вращающего момента $\vec{M}$, действующего на рамку с током в магнитном поле, равен векторному произведению магнитного момента на магнитную индукцию внешнего поля:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}].$$

Нетрудно доказать, исходя из закона Ампера, что эта формула справед-

лива для любой рамки с током независимо от его формы. Таким образом, вектор $\vec{p}_m$ определяет взаимодействие между контуром тока и внешним магнитным полем.

Из формулы (3) следует, что вращающий момент $\vec{M}$ равен нулю и контур находится в равновесии, если магнитный момент контура $\vec{p}_m$ параллелен или антипараллелен направлению индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля ($\sin\alpha = 0$). Равновесие является устойчивым, если векторы $\vec{p}_m$ и $\vec{B}$ параллельны друг другу.

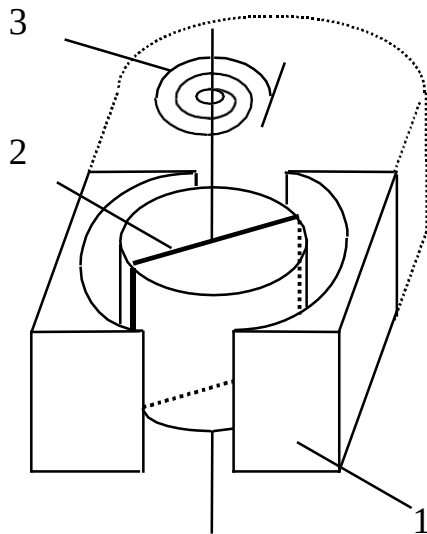


Рис.2

Используя постоянный магнит 1 специальной формы (рис.2), можно создать такое магнитное поле, что при любом положении рамки 2 вектор магнитной индукции $\vec{B}$ этого поля будет параллелен плоскости рамки, т.е. $\sin(\vec{p}_m, \vec{B}) = 1$. Тогда при пропускании через рамку тока I на нее будет действовать вращающий момент, равный согласно (3) и (4)

$$M = I S N B,$$

где N - число витков провода в рамке.

Под действием вращающего момента $\vec{M}$ рамка поворачивается, закручивая пружину 3 на угол φ . В пределах упругой деформации угол закручивания φ пропорционален вращающему моменту M

$$\varphi = k M,$$

где k - коэффициент, зависящий от упругих свойств пружины.

Таким образом, угол поворота рамки пропорционален току I

$$\varphi = k I S N B = \beta I, \quad (5)$$

где $\beta = k S N B$.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для изучения зависимости угла поворота рамки в магнитном поле от величины тока. используется установка, передняя панель которой, приведена на рис.3.

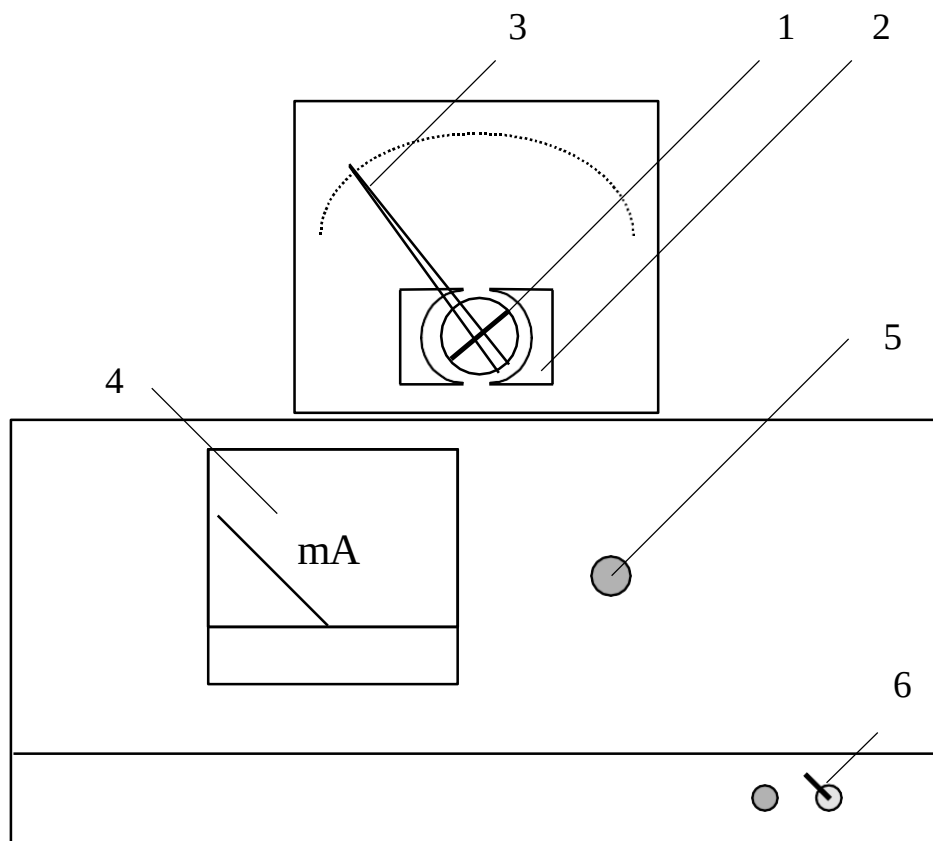


Рис.3

Основой установки является постоянный магнит 2, между полюсами которого находится легкая рамка 1, намотанная на алюминиевый цилиндр. Спиральные пружины (на рис.3 не показаны) служат для подводки тока в рамку и создания противодействующего вращению рамки момента. На рамке укреплен стрелка 3, конец которой перемещается вдоль шкалы.

Пропуская через рамку ток, величина которого регулируется потенциометром 5 и может быть измерена миллиамперметром 4, построить зависимость угла поворота φ от величины тока I в рамке. (Получить не менее 10 значений тока).

Определив из графика зависимости $\varphi = f(I)$ постоянную β , по формуле

(5) определить индукцию B магнитного поля, в котором находится рамка.

Оценить случайную погрешность определения индукции магнитного поля.

Значения N - числа витков провода в рамке, k - коэффициента упругости пружины, S - площади рамки указаны на установке.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Как определить направление силы Ампера?

Как действует на плоский контур тока однородное и неоднородное магнитное поле?

Почему при параллельности векторов $\vec{p}_m$ и $\vec{B}$ равновесие рамки с током является устойчивым, а при антипараллельности - неустойчивым?

Опишите принцип действия приборов магнитоэлектрической системы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Как известно, магнитное поле существует вокруг проводников с током и вокруг постоянных магнитов (природа магнитных полей проводников с током и постоянных магнитов одинакова). Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Для графического представления магнитного поля вводится понятие силовых линий магнитного поля. Силовой линией магнитного поля называется линия касательная в каждой точке поля к вектору магнитной индукции.

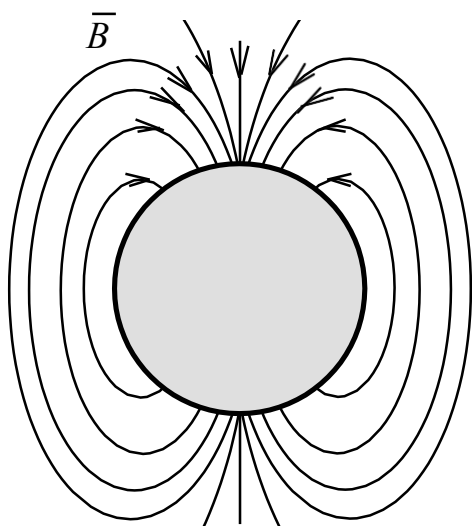


Рис.1

Землю окружает собственное магнитное поле (рис.1), которое является неоднородным. У поверхности Земли (за исключением магнитных полюсов) вектор магнитной индукции $\vec{B}_z$ можно разложить на вертикальную $\vec{B}_v$ и горизонтальную $\vec{B}_g$ составляющие. Горизонтальная составляющая $\vec{B}_g$ магнитного поля Земли имеет большее практическое значение, чем вертикальная, поэтому будем рассматривать и определять только

эту компоненту магнитного поля. Для этого создадим магнитное поле B_k и рассмотрим результат их взаимодействия.

Магнитное поле подчиняется принципу суперпозиции, т.е. магнитное поле $\vec{B}$, создаваемое несколькими движущимися зарядами или токами, равно

векторной сумме магнитных полей $\vec{B}_n$, создаваемых каждым зарядом или током в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

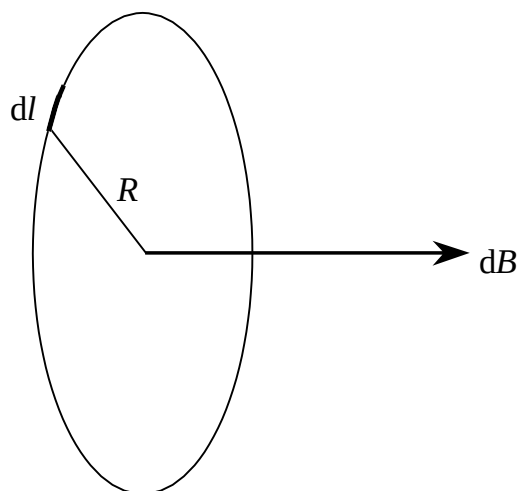


Рис.2

или в скалярном виде

В данной лабораторной работе изучается суперпозиция горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и магнитного поля катушки с током.

Определим магнитную индукцию поля, создаваемого кольцом радиуса R . Малые элементы длиной dl можно считать прямолинейными, поэтому к ним применим закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B}_\tau = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3} \quad (1)$$

$$dB_\tau = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin\alpha. \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, $\vec{r}$ - радиус-вектор от участка dl до исследуемой точки, r - величина радиус-вектора, α - угол между направлением тока и радиус-вектором $\vec{r}$.

Как следует из рис.2, все элементы кругового проводника с током создают в центре магнитные поля, направленные по нормали к витку.

Сложение векторов $d\vec{B}$ в центре кольца заменим сложением их модулей (учитывая, что $\sin\alpha = 1$ и $r=R$):

$$dB_\tau = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2}. \quad (3)$$

Тогда

$$B = \int B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl = \frac{\mu_0}{2R} I. \quad (4)$$

Для катушки

$$B_k = \frac{\mu_0}{2} \frac{In}{R}, \quad (5)$$

где n – число витков, R – радиус катушки, I – сила тока катушки.

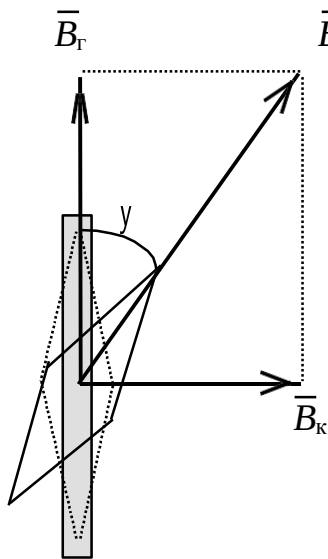


Рис.3

Для регистрации направления магнитного поля будем использовать магнитную стрелку, помещенную в центр катушки (тангенс-гальванометр). Если установить катушку так, чтобы магнитная стрелка находилась в ее плоскости, то при пропускании тока через катушку на стрелку будут действовать магнитное поле Земли и перпендикулярное ему магнитное поле катушки. Стрелка установится вдоль силовой линии результирующего поля (рис.3).

Из рис.3 видна связь между углом γ поворота стрелки и соотношением магнитного поля Земли B_r и катушки B_k :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{B_k}{B_r}. \quad (6)$$

Учитывая значение индукции магнитного поля катушки (5), получим:

$$B_r = \frac{\mu_0 I N}{2R \operatorname{tg} \gamma}. \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли используется установка, функциональная схема которой, приведена на рис.4.

Лабораторная установка состоит из вертикально установленной катушки 1, внутри которой помещена магнитная стрелка 2. При нажатии кнопки 5 через катушку проходит ток, величина которого регулируется потенциометром 7 и

регистрируется миллиамперметром 3. Направление тока в катушке может быть изменено тумблером 6.

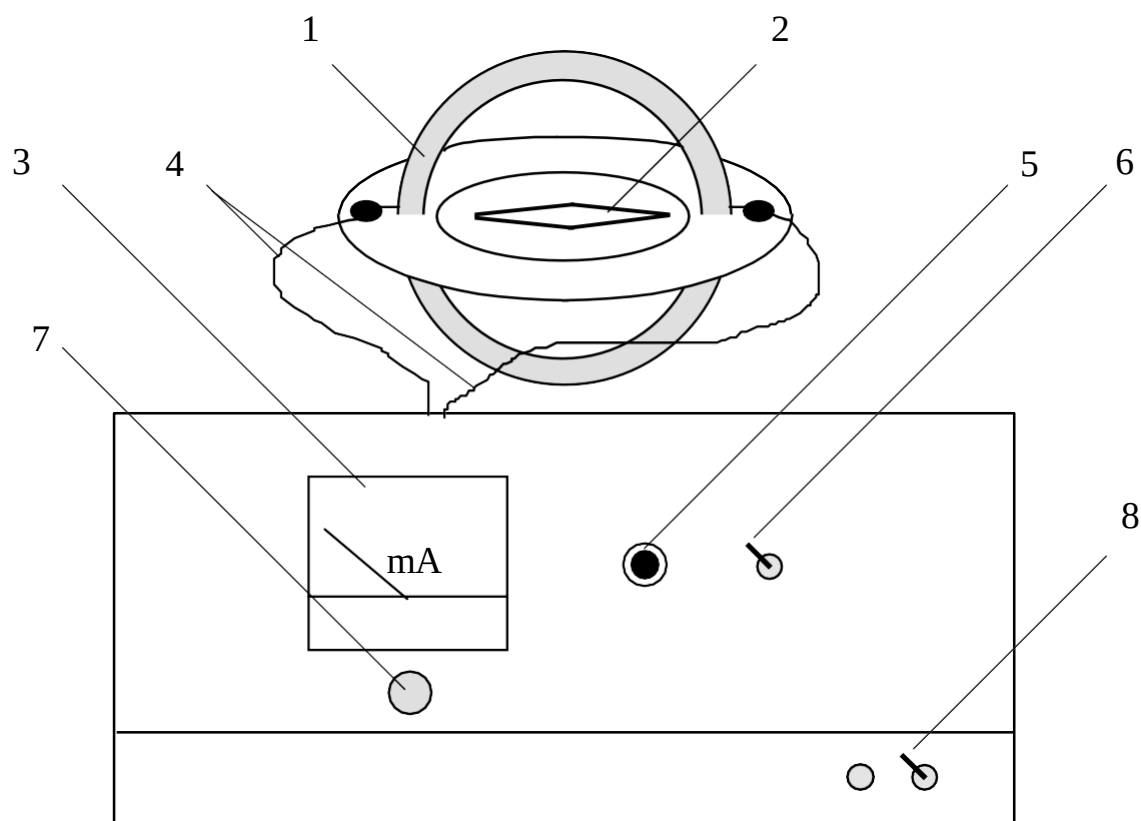


Рис.5

Угол α отклонения магнитной стрелки определяется по шкале лимба тангенс-гальванометра.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Подключив установку к сети и включив сетевой тумблер 8, установить катушку 1 так, чтобы магнитная стрелка 2 находилась в плоскости катушки.

Нажав кнопку 5, установить значение тока в катушке потенциометром 7 и направление тока тумблером 6, и измерить угол отклонения α магнитной стрелки от первоначального положения.

Изменяя величину тока и его направления повторить измерения не менее 5 раз.

По формуле (4) вычислить значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, определить погрешность измерений и объяснить ее.

Значения N и R указаны на установке.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Сформулируйте и запишите закон Био-Савара-Лапласа.

Выведите формулу индукции магнитного поля прямого тока.

Выведите формулу индукции магнитного поля на оси кругового тока.

Почему следует ориентировать катушку тангенс-гальванометра в направлении магнитного меридиана?

Почему следует изменять направление тока в катушке?

Оцените погрешность измерений горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, вызванную размерами магнитной стрелки.

Красная граница фотоэффекта различна для различных металлов и так же, как и работа выхода, существенно зависит от состояния поверхности металла и в особенности от наличия пленок адсорбированного газа. Граница фотоэффекта для металла с малой работой выхода (щелочные металлы) лежит в видимой области спектра, а для металлов с большой работой выхода (серебро, платина и др.) - в ультрафиолетовой области.

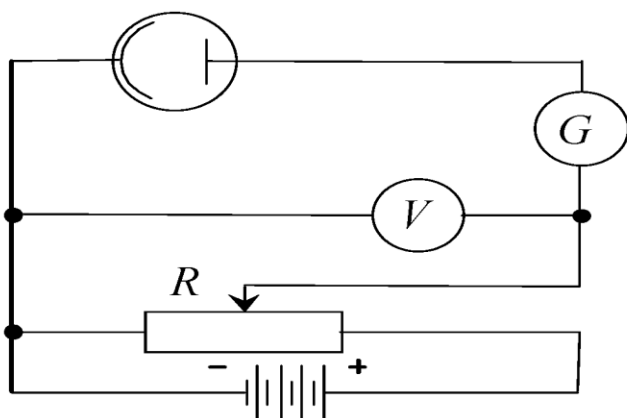


Рис. 1

В данной работе явление фотоэффекта изучается на промышленном вакуумном фотоэлементе, представляющем собой стеклянный откачанный баллон, на внутреннюю поверхность которого нанесен фоточувствительный слой (фотокатод). Собирающий электрод (анод) расположен в центре баллона. Простейшая

схема включения фотоэлемента показана на рис. 1. При освещении фотокатода в цепи фотоэлемента возникает ток, измеряемый гальванометром G . Напряжение между анодом и катодом можно изменять потенциометром R . С помощью этой схемы можно:

1. Получить вольт-амперную характеристику - зависимость фототока от напряжения на фотоэлементе при постоянном световом потоке Φ . На рис. 2 показаны две вольт-амперные характеристики, полученные для различных значений Φ ($\Phi_2 > \Phi_1$). При некотором ускоряющем фотоэлектроны напряжении ($U > 0$) фототок достигает насыщения. Сила тока насыщения J_n зависит от интенсивности светового потока Φ . При перемене знака потенциалов на электродах фотоэлемента, т.е. при задерживающем фотоэлектроны напряжении ($U < 0$), с увеличением U фототок уменьшается и при напряжении U_3 падает до нуля. Напряжение U_3 , при котором фототок равен нулю, называют задерживающим потенциалом.

2. Вычислить максимальную скорость фотоэлектрона. При задерживающем напряжении фототок постепенно спадает до нуля, отсюда следует, что фотоэлек-

троны обладают различными энергиями. При напряжении U_3 задерживаются все электроны, включая и самые быстрые. Следовательно, определив экспериментально задерживающий потенциал U_3 , можно вычислить максимальную энергию фотоэлектронов:

$$\left(\frac{m v^2}{2} \right)_{\text{МАКС}} = e U_3, \quad (3)$$

а отсюда и скорость фотоэлектронов, покидающих катод:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 e U_3}{m}} \quad (4)$$

Измерив зависимость $U_3(\nu)$, можно проверить основной закон фотоэффекта - закон Эйнштейна. Определив тангенс угла наклона прямой $U_3(\nu)$ (рис. 3), находят постоянную Планка h . Точка пересечения прямой с осью частот определяет красную границу фотоэффекта ν_0 . Отрезок φ , отсекаемый продолжением прямой на оси U_3 , дает потенциал выхода для вещества, из которого сделан фотокатод.

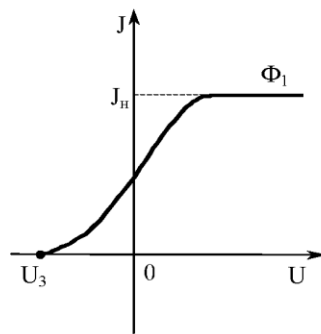


Рис. 2

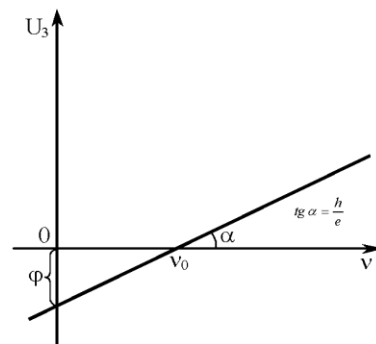


Рис. 3

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из универсального монохроматора УМ-2, микроамперметра A (цифровой прибор ЦД-68000), вольтметра постоянного тока V , блока питания и управления БПУ (стабилизированного источника постоянного тока), фотоэлемента СЦВ-51-ФЭ.

Схема установки показана на рис. 4. Свет от раскаленной вольфрамовой нити электрической лампочки $\mathcal{L}$ через входную щель $\mathcal{Щ}_1$ попадает в монохроматор $\mathcal{M}$, где разлагается на спектр. Через щель $\mathcal{Щ}_2$ монохроматический свет попадает

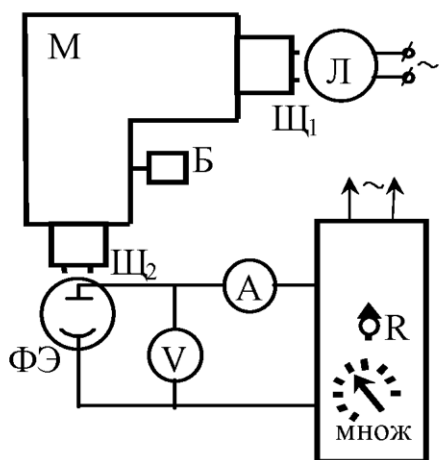


Рис. 4

на фотоэлемент $\mathcal{ФЭ}$. Основная часть монохроматора - призма $\mathcal{П}$. Поворот этой призмы осуществляется при помощи градуированного барабана $\mathcal{Б}$. К монохроматру прилагается градуировочный график, устанавливающий соответствие между делениями n барабана и длиной волны света ν , выходящего из щели $\mathcal{Щ}_2$. Фотоэлемент $\mathcal{ФЭ}$ питается от стабилизированного источника постоянного напряжения $\mathcal{ИП}$.

Величину этого напряжения можно изменить "грубо" посредством делителя (ручка "множитель"), "точно" - посредством потенциометра (ручка R) и контролировать вольтметром V . В положении 1 ручки "множитель" на анод фотоэлемента подается отрицательный потенциал (запирающее напряжение U_3). Его величину можно изменять плавно от 0 до 1 В ручкой R . Цена деления вольтметра при этом 0,1 В.

При переводе ручки "множитель" в положение 2, 3, 4, 5 и т.д. на анод фотоэлемента подается положительный потенциал. Его величина определяется по вольтметру V умножением его показаний на соответствующий множитель:

Положение ручки "множитель"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Применяемый множитель	$\times 0,1$	$\times 1$	$\times 2$	$\times 3$	$\times 4$	$\times 5$	$\times 6$	$\times 7$	$\times 8$	$\times 9$	$\times 10$
Потенциал на аноде	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

В небольших пределах напряжение на аноде изменяется ручкой R .

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами, входящими в установку. Поставить тумблер "Сеть" в положение "включено", тумблеры "Лампа" и "Схема" - в положение "выключено".

2. Включить цифровой прибор. Он должен показывать отсутствие тока в цепи ($\pm 00,000$ А).

ВНИМАНИЕ!!! Включение и регулировка прибора Щ68000 разрешается только в присутствии лаборанта или преподавателя.

3. Установить барабан B монохроматора на одно из делений (по указанию преподавателя).

4. По градуировочному графику определить длину волны λ . Вычислить соответствующую ей частоту ν .

5. Установить ручку "множитель" в положение 1, а ручку R - в крайнее правое положение.

6. Включить лампу L осветителя, переведя тумблер "Лампа" в крайнее левое положение, и определить величину тока в цепи фотоэлемента.

7. Включить источник питания $ИП$. Для этого перевести тумблер "Схема" в крайнее левое положение.

8. Вращая ручку R вправо, по цифровому прибору произвести отсчет величин тока при соответствующем отрицательном напряжении на аноде U_3 . Отметить момент исчезновения тока в цепи ($00,000$ А).

9. Перевести ручку "множитель" последовательно в положения 2, 3, 4, ..., 11, измеряя каждый раз значения тока в цепи фотоэлемента при неизменном световом потоке, падающем на него. Построить график $J = f(U_A)$, найти величину тока насыщения.

10. Возвратить ручку "множитель" в положение 1.

11. Устанавливая барабан B монохроматора в нескольких положениях шкалы (по указанию преподавателя), получить значения U_3 при отсутствии тока в цепи.

12. По полученным данным построить зависимость $U_3 = f(\nu)$.

13. Вычислить по формуле (4) величину v_{max} и потенциал выхода φ .
14. Составить таблицы, в которые внести значения измеренных и вычисленных величин.
15. Оценить погрешность измерений ν и φ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. В чем заключается физическая сущность внешнего фотоэффекта?
2. Почему невозможно объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики?
3. Каков физический смысл запирающего потенциала?
4. Как определить работу выхода электрона из металла? В чём заключается физическая сущность этого понятия?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.3., М., 1979, § 91.
2. Трофимова Т.И. Курс физики, М., 1994, §§ 202-204.
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, т.3., М., 1972, §§ 35-38.

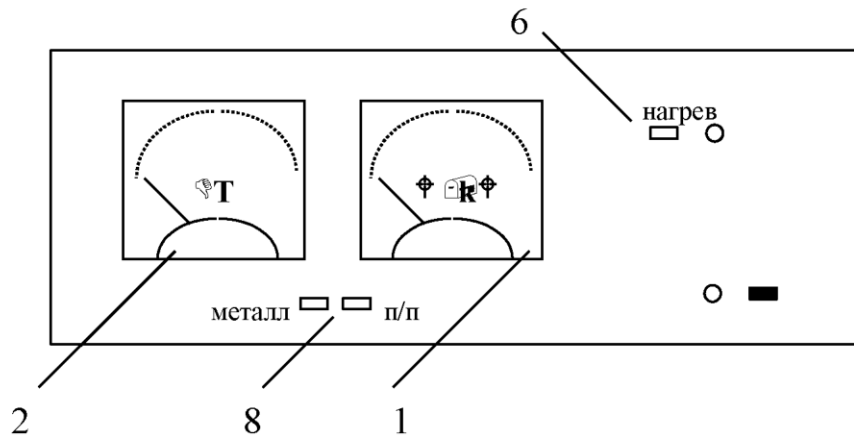


Рис.8.1.2

По полученным экспериментальным результатам необходимо построить зависимость сопротивления металла от температуры $R = f(T)$ и проводимости полупроводника от температуры $\ln \sigma = f(1/T)$.

По угловому коэффициенту зависимости $\ln \sigma = f(1/T)$ определить энергию активации $\lambda E_{\text{пр}}$ полупроводника.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

В чем различие энергетического спектра состояний электронов в полупроводниках и диэлектриках?

Какова температурная зависимость удельного сопротивления полупроводников и металлов?

Какова температурная зависимость подвижности свободных носителей заряда в металлах и полупроводниках?

Каковы особенности собственной и примесной проводимости полупроводников?

Как экспериментально определить ширину запрещенной зоны собственного полупроводника, энергию активации примесного полупроводника?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ p - n -ПЕРЕХОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определение коэффициентов выпрямления полупроводниковых диодов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Переходный слой между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводность n -типа, а другая - p -типа, называют *электронно-дырочным переходом* или *p - n -переходом*.

Рассмотрим физические процессы, протекающие на контакте двух полупроводниковых материалов, обладающих разным типом электропроводимости. До вхождения в контакт оба полупроводниковых материала электрически нейтральны: в полупроводнике n -типа заряд основных носителей - электронов - компенсируется зарядом ионизированных доноров, а в полупроводнике p -типа заряд дырок - зарядом ионизированных акцепторов. В случае контакта полупроводников, на границе оказывается большой перепад концентраций электронов и дырок, что вызывает возникновение диффузионных потоков основных носителей заряда: электронов из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа и дырок во встречном направлении. Диффундирующие носители заряда создают *диффузионные токи*. Диффузия носителей заряда приводит к нарушению электрической нейтральности полупроводников. В приконтактной области электронного полупроводника остается нескомпенсированный положительный заряд доноров, а в дырочном полупроводнике - нескомпенсированный отрицательный заряд акцепторов. Между этими объемными зарядами возникает электрическое поле, которое препятствует диффузии основных носителей заряда, образуется потенциальный барьер. Для перехода границы полупроводников основные носители заряда должны обладать энергией, достаточной для преодоления электрического поля. По мере роста нескомпенсированных зарядов доноров и

акцепторов потенциальный барьер увеличивается и диффузионные потоки электронов и дырок уменьшаются.

Неосновные носители заряда, совершая тепловое движение, могут попасть в область действия образовавшегося электрического поля, которая переносит их через границу в соседний полупроводник. Неосновные носители заряда создают потоки носителей, направленные навстречу диффузионным. Токи неосновных носителей называют *дрейфовыми*, т. к. они обусловлены действием электрического поля. По мере нарастания напряженностей электрического поля, потоки неосновных носителей растут. Состояние термодинамического равновесия в

переходной области наступит

тогда, когда потоки неосновных носителей уравниваются потоки основных. Через границу

полупроводников проходят четыре тока: два диффузионных тока I_{nn} и I_{pp} основных носителей и два дрейфовых тока I_{np} и I_{pn} неосновных носителей заряда. В состоянии равновесия сумма токов, проходящих через переход, равна нулю, т. е. $I_{nn} + I_{pp} + I_{np} + I_{pn} = 0$.

В состоянии

термодинамического равновесия уровень Ферми в обоих полупроводниках проходит на одной высоте (рис. 5.1), что ведет к искривлению энергетических зон и образованию потенциального барьера. Электрону, находящемуся на дне зоны проводимости полупроводника n -типа, для перехода в полупроводник p -типа нужно преодолеть потенциальный барьер $\Delta\phi$, в то время как электроны, находящиеся в зоне проводимости полупроводника p -типа, свободно «скатываются» в полупроводник n -типа.

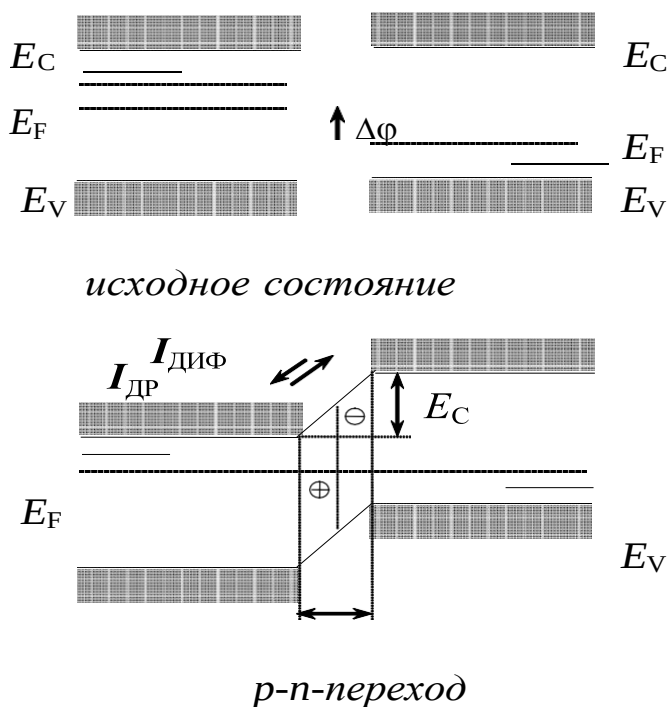


Рисунок 5.1

Концентрация подвижных электронов и дырок, способных преодолеть потенциальный барьер:

$$n = n_0 \exp [-e\varphi_{\text{КРП}} / (kT)] ,$$

$$p = p_0 \exp [-e\varphi_{\text{КРП}} / (kT)] ,$$

где n_0 и p_0 - равновесные концентрации электронов и дырок в кристалле соответственно; $\varphi_{\text{КРП}}$ - контактная разность потенциалов.

Приложим к p - n -переходу внешнее напряжение: плюс - к n - и минус - к p -области (такое включение p - n -перехода называют *обратным*). Такая полярность внешнего напряжения соответствует полярности контактной разности потенциалов и приводит к увеличению высоты потенциального барьера на величину $eU_{\text{ВН}}$, где $U_{\text{ВН}}$ - приложенное напряжение (рис. 5.2б).

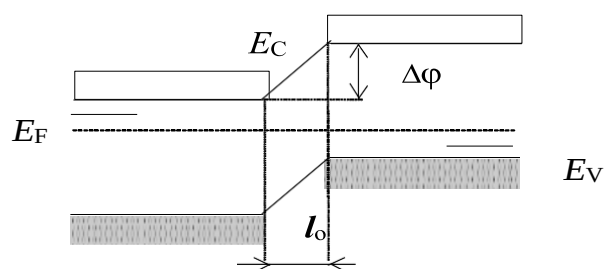
Из-за увеличения высоты потенциального барьера в n -области уменьшается количество электронов, а в p -области - количество дырок, имеющих энергию, достаточную для его преодоления:

$$n = n_0 \exp [- (e\varphi_{\text{КРП}} + eU_{\text{ВН}}) / kT] ,$$

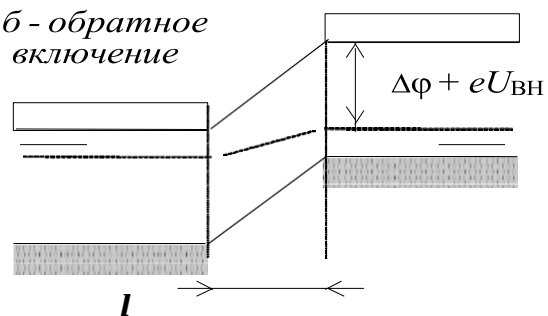
$$p = p_0 \exp [- (e\varphi_{\text{КРП}} + eU_{\text{ВН}}) / kT] .$$

При определенной высоте потенциального барьера потоки основных носителей заряда через p - n -переход практически прекращаются, и ток через переход будет обусловлен только потоками неосновных носителей, скатывающихся с потенциального барьера.

а - равновесное состояние



б - обратное включение



в - прямое включение

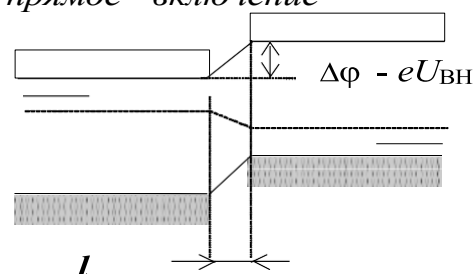


Рисунок 5.2

Таким образом, при данной полярности внешнего напряжения через p - n -переход проходит только ток генерации неосновных носителей заряда, величина которого определяется их концентрацией. Концентрация неосновных носителей заряда зависит от температуры и не зависит от напряжения в сравнительно широких пределах. Ток, обусловленный генерацией неосновных носителей заряда, называют *током насыщения* I_s .

При изменении полярности приложенного внешнего напряжения (такое включение называется прямым): плюс - к p -области, минус - к n -области, высота потенциального барьера уменьшается (рис. 5.2в). Количество основных носителей заряда, имеющих энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера, увеличится:

$$n = n_o \exp[- (e\varphi_{KPP} - eU_{BH}) / kT],$$

$$p = p_o \exp[- (e\varphi_{KPP} - eU_{BH}) / kT].$$

Это приводит к возрастанию диффузионного тока через переход; дрейфовый ток не изменяется.

Изменение высоты потенциального барьера с помощью внешнего напряжения приводит к изменению ширины p - n -перехода. При увеличении внешнего напряжения в прямом направлении ширина перехода уменьшается, а концентрация носителей заряда увеличивается; при возрастании напряжения в обратном направлении ширина перехода увеличивается, а концентрация носителей уменьшается.

При включении перехода в любом направлении дрейфовые токи остаются постоянными, а изменяются диффузионные токи. Концентрация носителей заряда, способных преодолеть потенциальный барьер, изменяется по экспоненциальному закону, поэтому изменение диффузионного тока :

$$I_{диф} = I_s \exp [eU_{BH} / (kT)].$$

Полный ток через переход при прямом направлении ($U_{BH} > 0$):

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др} = I_s \exp \{ [eU_{BH} / (kT)] - 1 \},$$

при обратном направлении ($U_{BH} < 0$):

$$I_{обр} = I_{др} - I_{диф} = I_s \{ 1 - \exp [eU_{BH} / (kT)] \}.$$

При прямом направлении перехода можно пренебречь дрейфовой составляющей:

$$I_{\text{ПР}} = I_s \exp [eU_{\text{ВН}} / (kT)],$$

а при обратном - диффузионной:

$$I_{\text{ОБР}} = I_s.$$

Графически зависимость тока I от величины напряжения U , приложенного к p - n -переходу представлена на рис. 5.3.

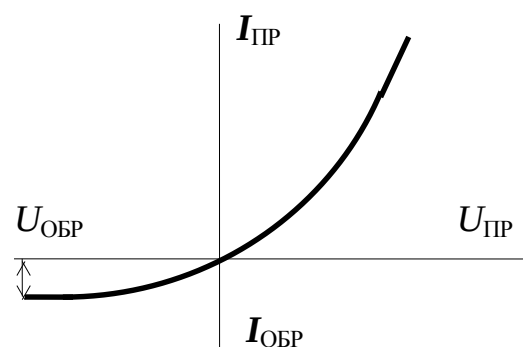


Рисунок 5.3

Оборудование и материалы

Для определения коэффициентов выпрямления полупроводниковых диодов используется установка, принципиальная схема и передняя панель которой приведены на рис. 5.4.1 и рис. 5.4.2.

Исследуемые диоды 6 попеременно включаются в измерительную цепь переключателем 4. Изменяя напряжение в цепи потенциометром 1, по вольтметру 2 и миллиамперметру 5 снимают вольтамперную характеристику

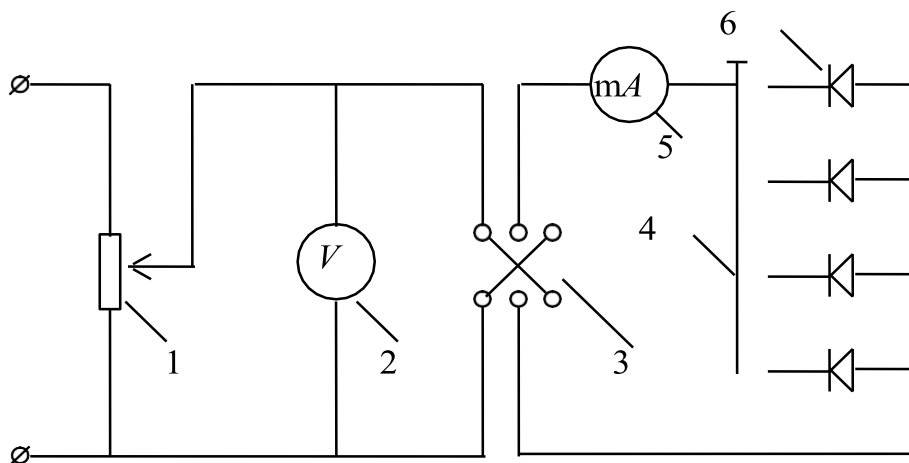


Рисунок 5.4.1

исследуемого диода (миллиамперметр 5 имеет два предела измерения: при прямом смещении - mA , при обратном - μA). Изменение полярности подаваемого на диоды напряжения осуществляется переключателем 3.

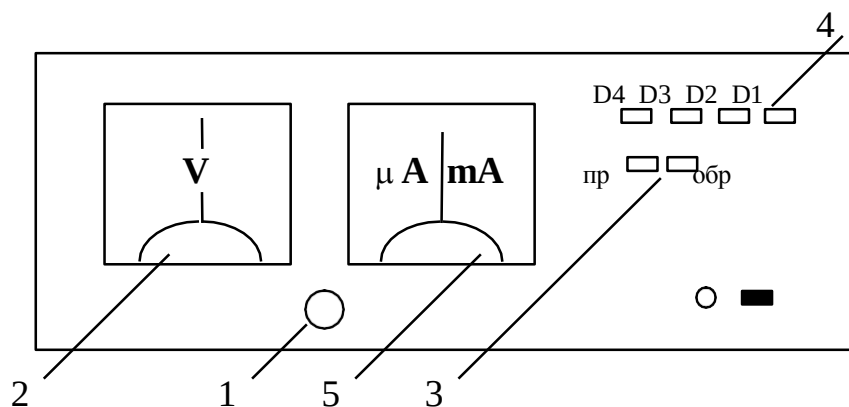


Рисунок 5.4.2

Указания по технике безопасности

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях.

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

Указания по порядку выполнения работы

Построив по полученным экспериментальным данным вольтамперные характеристики исследуемых диодов, можно определить их коэффициент выпрямления k . Коэффициентом выпрямления называется отношение прямого $I_{пр}$ и обратного $I_{обр}$ токов при одинаковых напряжениях $U_{пр} = U_{обр}$.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

Контрольные вопросы

В чем различие энергетического спектра состояний электронов в полупроводниках и диэлектриках?

Почему при контакте полупроводников разного типа электропроводности начинается процесс диффузии основных носителей

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИСПУСКАНИЯ СВЕТА ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

Цель работы: определение частоты излучения светодиодов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МАТЕРИАЛ

Рассмотрим зависимость коэффициента поглощения K полупроводников от частоты оптического излучения (рис. 7.1).

Собственный полупроводник будет K поглощать в интервале частот, соответствующих условию $h\nu \geq E_g$, и не поглощать, если $h\nu < E_g$.

Поглощение полупроводников можно изменять, вводя легирующие примеси, которые увеличивают поглощение либо в области низких частот (материалы p -типа), либо при частотах, которые соответствуют энергиям несколько меньше E_g (материалы n -типа).

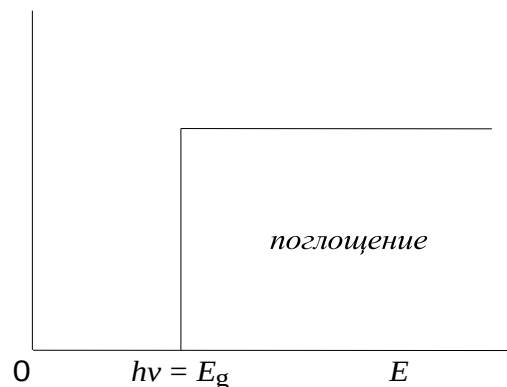


Рисунок 7.1

Электронно-дырочная рекомбинация

Очевидно, что помимо образования электронов проводимости и дырок проводимости, возможен и обратный процесс - *рекомбинация* электронов и дырок (рис. 7.2). Процесс рекомбинации является относительно редким явлением, поскольку, для рекомбинации электрон и дырка должны достаточно долго находиться в одном и том же месте. Рекомбинация носителей осуществляется различными путями: переходом электронов из зоны проводимости в валентную зону (рис. 7.2а); через локальные энергетические уровни, расположенные в запрещенной зоне (рис. 7.2б, в).

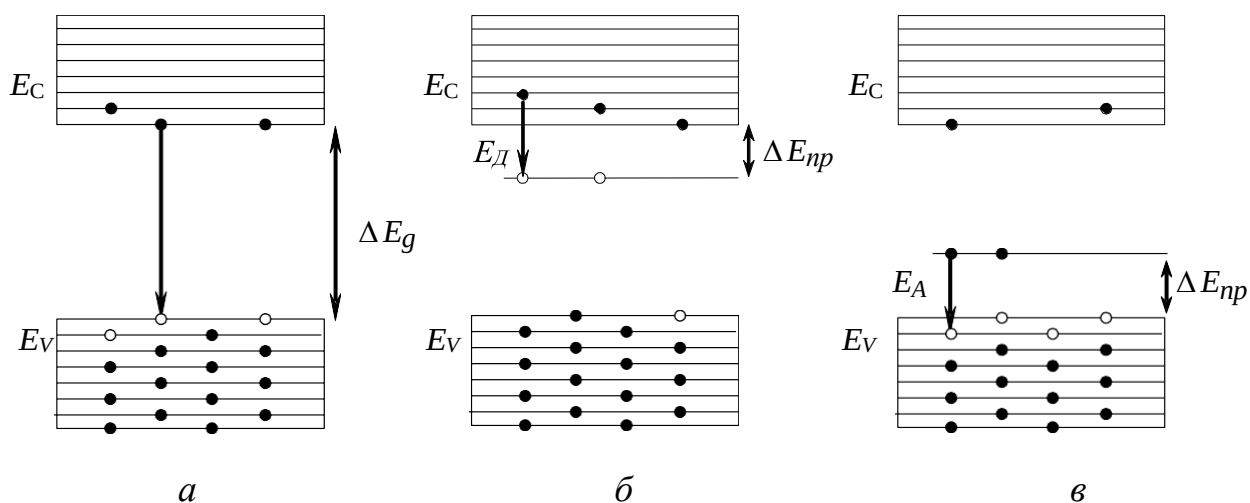


Рисунок 7.2

Процесс рекомбинации сопровождается выделением энергии. Выделение энергии может происходить в виде фотона (*фотонная рекомбинация*), может переходить в энергию решетки, т. е. выделяться в виде фононов (*фононная рекомбинация*), может быть передана свободному электрону (*ударная рекомбинация* или *рекомбинация Оже*).

Как уже отмечалось, возможно испускание света при рекомбинации электронов и дырок (фотонная рекомбинация). Для увеличения вероятности этого процесса следует, прежде всего, увеличить число электронов проводимости и дырок. Это достигается, например, при использовании сильно легированных полупроводников. При контакте сильно легированных полупроводников, обладающих разным типом электропроводности уровень Ферми не находится в запрещенной зоне: уровень Ферми *n*-области находится в зоне проводимости, а *p*-области - в валентной зоне. При этом ширина *p-n*-перехода очень мала ($\sim 10^{-10}$ м).

Использование такого *p-n*-перехода гарантирует высокую концентрацию дырок и электронов, но, как видно из рис. 7.3а, электроны и дырки находятся в разных местах, что препятствует рекомбинации. Если приложить к *p-n*-переходу большое прямое смещение (рис. 7.3б), сравнимое по величине с шириной запрещенной зоны, то будет обеспечена высокая вероятность появления электронов проводимости и дырок одновременно в

одном и том же месте и, следовательно, высокая вероятность рекомбинации. Эта конструкция позволяет получить значительный выход световой энергии и называется *светодиодом*.

Параметры светодиодов определяются его вольтамперной характеристикой (рис. 7.4). Различия прямых ветвей вольтамперной характеристики связаны с разницей в ширине запрещенной зоны применяемых материалов. Чем меньше длина волны излучения, тем больше прямое падение напряжения на светодиоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви вольтамперной характеристики имеют малое допустимое обратное напряжение, т. к. ширина *p-n*-перехода в светодиодах незначительна.

Оборудование и материалы

Для определения частоты излучения светодиодов используется установка, принципиальная схема и передняя панель которой приведены на рис. 7.5.1 и 7.5.2.

Исследуемые диоды 5 попеременно включаются в измерительную цепь переключателем 4. Изменяя потенциометром 1 напряжение источника питания, миллиамперметром 3 и вольтметром 2 измеряют силу тока в светодиоде и напряжение на нем, получая вольтамперную характеристику исследуемого светодиода.

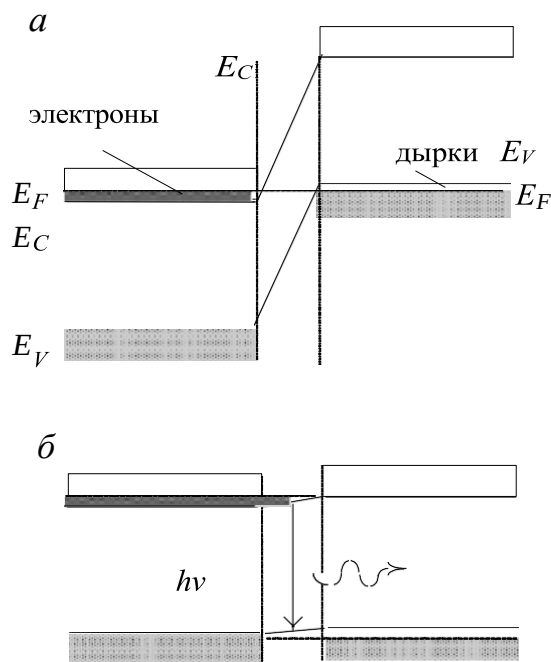


Рисунок 7.3

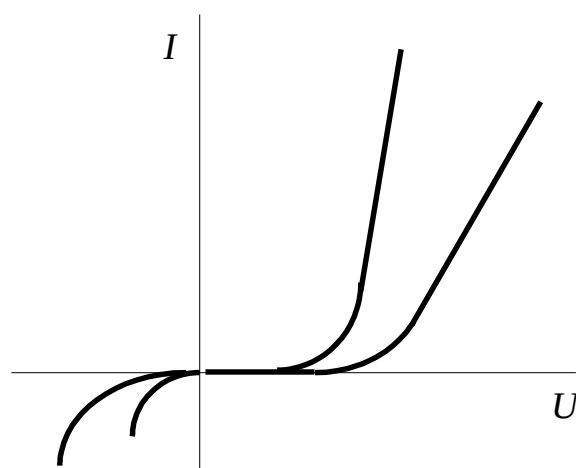


Рисунок 7.4

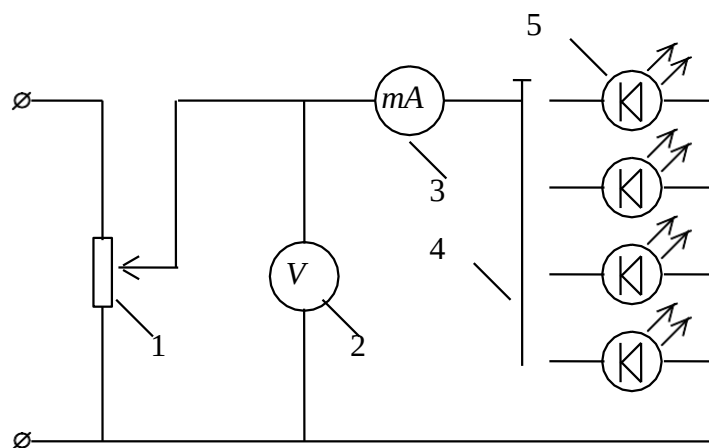


Рисунок 7.5.1

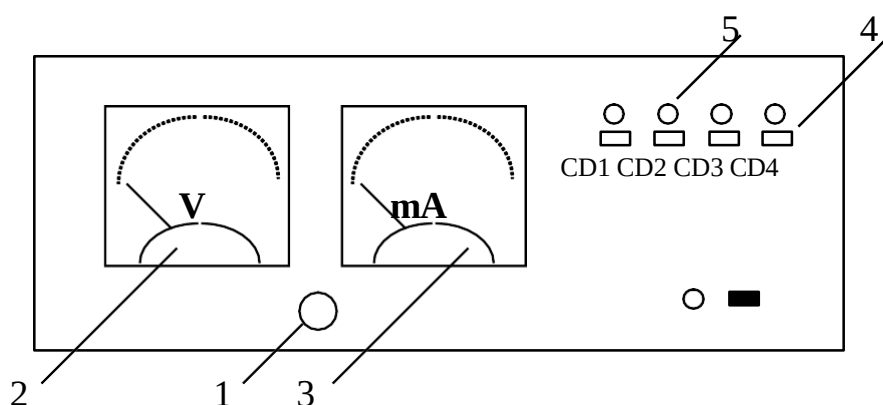


Рисунок 7.5.2

Указания по технике безопасности

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях.

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

Указания по порядку выполнения работы

Построив по полученным экспериментальным данным вольтамперные характеристики исследуемых светодиодов и экстраполируя прямолинейные участки зависимостей $I = f(U)$ до пересечения с осью U , можно определить прямые смещения U_0 , при которых начинается испускание света каждым из исследуемых светодиодов.

Так как прямое смещение U_0 таково, что $\Delta E = eU_0$, то, очевидно, энергия

фотона, излучаемого светодиодом, равна:

$$h\nu = eU_0,$$

где e - заряд электрона, h - постоянная Планка. Из этого соотношения можно определить частоту ν излучения светодиода.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

Контрольные вопросы

В чем различие энергетического спектра состояний электронов в полупроводниках и диэлектриках?

Как происходит излучение света в полупроводниках?

Рассмотрите явление излучения света в полупроводниках с точки зрения законов сохранения энергии и импульса.

Поясните механизм излучения света полупроводниками через локальные уровни в запрещенной зоне.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. Черевко, А. Г. Физика конденсированного состояния. Часть 1. Кристаллы и их тепловые свойств Электронный ресурс : Учебное пособие / А. Г. Черевко. - Физика конденсированного состояния. Часть 1. Кристаллы и их тепловые свойств, 2022-08-28. - Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. - 81 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 2227-8397, экземпляров неограничено

2. Сирота, Д. И. Физика твердого тела : Сборник задач с подробными решениями : учеб. пособие / Д. И. Сирота. - Изд. стер. - М. : URSS Либроком, 2014. - 184 с. - Библиогр.: с. 183. - ISBN 978-5-397-04305-2, экземпляров 18

3. Гуртов В. А. Физика твердого тела для инженеров Электронный ресурс : Учебное пособие / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко ; ред. Л. А. Алешина. - Москва : Техносфера, 2012. - 560 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-94836-327-1, экземпляров неограничено

4. Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния : пособие / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук ; под ред. Н.К. Мышкин. - Минск : Белорусская наука, 2009. - 648 с. [Электронный ресурс].

5. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - Москва : Бином. Лаб. знаний, 2011. - 293 с. : ил., табл. ; 22 см. - (Учебник для высшей школы). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 288-293. - ISBN 978-5-9963-0290-1, экземпляров 18

6. Физика твердого тела Электронный ресурс : Учебное пособие / А. А. Корнилович [и др.]. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. - 71 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-2160-4, экземпляров неограничено.