Министерство образования Российской Федерации
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

**А. И. ШАВЛЮГИН**
**С.В. СЕМКИН**

# ОБЩАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум

Владивосток
Издательство ВГУЭС
2003

ББК 22.3я73
Ш 14

**Шавлюгин А. И., Семкин С.В.**
Ш 14 Общая физика: Лабораторный практикум. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2003. – 48 с.

Практикум создан на базе предыдущих изданий, разработанных коллективом авторов (1988–1994 гг. Смагин В.П., Родкина Л.Р., Доценко В.А., Кокотов С.И., Афремов Л.Л., Яшенкова Л.Н., Леванидов М.В., Ветер В.В.), и представляет собой сокращенный и переработанный вариант этих изданий. Содержание приведено в соответствие с современным состоянием лабораторной базы, исправлены некоторые неточности, обнаруженные в первом издании. Кроме того, задания для каждой лабораторной работы дополнены задачами на соответствующие разделы курса физики. Используется сквозная нумерация лабораторных работ, но, помимо этого, сохранена нумерация, соответствующая предыдущему изданию (в скобках после номеров нынешнего издания приведены номера предыдущего издания; сокращения имеют смысл: М – механика, Э – электричество и магнетизм, О – оптика).

ББК 22.3я73

# Лабораторная работа № 1
# ТЕОРИЯ ОШИБОК И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

## 1. Введение

**1. Прямые и косвенные измерения.**

Измерение – это экспериментальное сравнение данной величины с другой, такого же рода величиной, принятой за единицу меры.

Измерения могут быть прямыми и косвенными. Прямое измерение – это непосредственное сравнение измеряемой величины с единицей измерения с помощью приборов и устройств, проградуированных в соответствующих единицах (измерение линейных размеров линейкой, штангенциркулем; измерение времени секундомером; взвешивание и т.п.).

Косвенно измеряемая величина рассчитывается с помощью некоторой зависимости (формулы) от других величин, полученных прямыми измерениями (определение скорости $v = \frac{s}{t}$ по пути и времени; плотности $\rho = \frac{m}{V}$ по массе и объему и т.д.).

Любое измерение не дает абсолютно точного значения измеряемой величины – неточность приборов, влияние неучтенных факторов, трение и т.д., поэтому измеренные значения всегда отклоняются от истинных. Эти отклонения называются ошибками или погрешностями измерений. Исключения составляют целочисленные или дискретные измерения – подсчет предметов и т.п., которые могут быть проведены абсолютно точно.

Поэтому, проделав измерения, необходимо оценить точность измерений. Следовательно, задачами измерения являются: 1) получение приближенного значения измеряемой величины; 2) оценка величины погрешности.

**2. Типы ошибок.**

Все ошибки делят на две большие группы – систематические и случайные, не рассматривая грубые ошибки или промахи, вызванные невниманием экспериментатора или другими причинами. Грубые ошибки не подчиняются никаким закономерностям, соответствующие измерения должны быть устранены из расчетов.

Систематическая ошибка постоянна на протяжении всех измерений, проводимых данным методом или данным прибором. Систематическая ошибка может быть обусловлена неисправностью прибора, несовершенством методики измерений (например, неучетом сил трения) и т.д. Систематическую ошибку можно уменьшить, используя более точный прибор или другой метод измерения.

Случайные ошибки возникают вследствие самых различных как субъективных, так и объективных причин: колебаний напряжения в сети при электрических измерениях, неодинаковой толщины пластинки в различных ее местах при измерении толщины, изменений температуры в процессе измерений и т.д. Все эти причины приводят к тому, что несколько измерений одной и той же величины дают различные результаты. Случайные ошибки подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений.

**3. Источники ошибок.**

По происхождению различают ошибки следующих видов:

1) ошибки прибора;
2) ошибки округления;
3) ошибки измерений;
4) промахи;
5) ошибки вычислений.

1) Показания любого прибора, даже самого точного и совершенного, всегда отличаются от фактического значения измеряемой величины. Это отличие характеризуется ошибкой прибора, которая указывается в паспорте, прилагаемом к прибору. Ошибка прибора может содержать случайную и систематическую составляющие. Причины возникновения этой ошибки – несовершенство материалов, невозможность полного устранения вредных помех и т.д.

2) При считывании показаний со шкалы прибора результат всегда записывают при помощи конечного числа значащих цифр, т.е. всегда имеется ошибка округления.

3) Различные факторы в процессе измерений приводят к систематическим и случайным ошибкам измерений. Например, трение, подсветка фотоэлемента и др. могут быть причинами систематических ошибок. Различные случайные неконтролируемые факторы в процессе измерений приводят к случайным ошибкам.

4) В случае резких нарушений условий, при которых должны проводиться измерения, могут появиться промахи, т.е. большие искажения измеряемой величины. Резкие сотрясения установки, наводки при замыкании цепей в соседней установке, невнимательность экспериментатора и др. приводят к промахам.

5) Наконец, в процессе математической обработки результатов измерений, когда вычисления ведутся с конечным числом значащих цифр, могут появиться дополнительные ошибки, связанные с округлениями в процессе вычислений.

# 2. Некоторые понятия теории вероятностей

**1. Плотность распределения вероятностей, среднее значение, дисперсия, среднее квадратическое отклонение случайной величины.**

Результаты измерения одной и той же величины при неизменных условиях могут принимать различные значения самым непредсказуемым образом. Поэтому результаты измерений можно рассматривать как некоторую случайную величину (СВ).

Способы описания СВ изучаются в таких разделах математики, как теория вероятностей и математическая статистика.

Важнейшим понятием теории вероятностей является плотность распределения вероятностей: если СВ $X$ задана плотностью распределения $f(x)$, тогда вероятность того, что $X$ принимает значения в интервале от $x$ до $x+\Delta x$ определяется по формуле

$$P(x < X < x+\Delta x) = f(x)\Delta x .$$

Вероятность попадания $X$ в интервал конечной длины $(a,b)$ определяется по формуле $P(a < x < b) = \int_a^b f(x)dx$.

Плотность распределения вероятностей содержит в себе самую полную информацию о случайной величине. С ее помощью можно вычислить любые числовые характеристики СВ, например математическое ожидание (среднее значение) $M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$, дисперсию $D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x)dx - (M(x))^2$, среднее квадратическое отклонение $\sigma(x) = \sqrt{D(x)}$. Математическое ожидание представляет собой наиболее типичное значение $X$, а дисперсия и среднее квадратическое отклонение характеризуют степень разброса значений случайной величины относительно среднего значения.

**2. Нормальное распределение. Распределение Стьюдента.**

Плотность нормального распределения вероятностей (распределения Гаусса) имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left( -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right), \tag{1}$$

причем, вычисления показывают, что параметры $\sigma$ и $\mu$ равны соответственно среднему значению и среднему квадратическому отклонению случайной величины.

Обычно случайные ошибки прямых измерений подчиняются закону нормального распределения вероятностей. Кроме того, нормальное распределение является предельной формой, в которую переходят многие другие виды распределений. Например, при небольшом числе измерений случайные ошибки подчиняются распределению Стьюдента $S_n(x)$, которое в пределе $n \to \infty$ переходит в нормальное распределение вероятностей.

**3. Доверительный интервал, доверительная вероятность.**

Вероятность того, что истинное значение (математическое ожидание) $x_0$ некоторой случайной величины находится внутри интервала $(\bar{x} - \Delta x < x_0 < \bar{x} + \Delta x)$, где $\bar{x}$ – среднее значение величины по результатам опыта, называется доверительной вероятностью (ДВ), а интервал – доверительным интервалом (ДИ):

$$P(\bar{x} - \Delta x < x_0 < \bar{x} + \Delta x) = \alpha . \qquad (2)$$

Для характеристики случайной ошибки необходимо задать два числа: величину самой ошибки и величину доверительной вероятности. Указание одной только величины ошибки в значительной мере лишено смысла, так как при этом мы не знаем, сколь надежны наши данные. Для нормального распределения вероятностей вероятность того, что истинное значение измеряемой величины отличается от среднего результата измерений не более чем на величину среднего квадратического отклонения $\sigma$, равна 0,68, не более чем на $2\sigma$ – 0,95, не более чем на $3\sigma$ – 0,997.

При малом числе измерений заданному значению $\alpha$ соответствует несколько больший ДИ, чем указано выше. Множители, определяющие величину интервала в долях $\sigma$ в зависимости от $\alpha$ и числа измерений, называются коэффициентами Стьюдента и их значения можно найти в справочных таблицах.

## 3. Методы обработки результатов измерений

Использование результатов теории случайных ошибок оправдано лишь в том случае, если повторные измерения дают результаты, заметно отличающиеся друг от друга. Если ошибка какого-либо измерения определяется в основном погрешностью прибора, то достаточно ограничиться единичным измерением. Если же случайная ошибка в большой степени влияет на точность результата, то ее можно уменьшить многократным повторением измерений.

**1. Ошибки прямых измерений.**

В случае многократных измерений за оценку измеряемой величины принимается ее среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \tag{3}$$

где $n$ – число измерений. За оценку среднего квадратического (стандартного) отклонения принимается корень квадратный из исправленной выборочной дисперсии, вычисляемый по формуле

$$S_{nx} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}. \tag{4}$$

Предполагая, что случайные ошибки прямых измерений имеют нормальное распределение, для данного числа измерений $n$ и ДВ $\alpha$ из таблиц находят значение коэффициента Стьюдента $t_{n\alpha}$ и вычисляют случайную ошибку

$$\Delta x = t_{n\alpha} S_{nx}. \tag{5}$$

Полная ошибка измеряемой величины определяется как среднее геометрическое случайной и приборной ошибок, т.е.

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{сл})^2 + (\Delta x_{пр})^2}, \tag{6}$$

а в качестве приборной ошибки берется цена наименьшего деления измерительного прибора (линейки, секундомера, весов и т.д.). При работе с электроизмерительными приборами приборная ошибка определяется по классу точности прибора.

**2. Ошибки косвенных измерений (воспроизводимые условия).**

Пусть $u = f(x,y)$ – некоторая величина, измеряемая косвенно по $n$-кратным измерениям $x_i$, $y_i$, $i = 1,2,...,n$. Отметим, что здесь рассматриваются так называемые воспроизводимые условия, то есть измеренные значения являются результатами $n$ измерений одной и той же величины в одних и тех же условиях и отличаются друг от друга только в пределах ошибки.

Вначале рассчитывают средние значения $\bar{x}$ и $\bar{y}$ прямых измерений по формуле (3). Затем, подставляя в выражение $u = f(x,y)$ найденные средние значения, находят среднее значение $\bar{u}$ косвенно измеряемой величины $u$:

$$\bar{u} = f(\bar{x},\bar{y}). \tag{7}$$

Для расчета ошибки $\Delta u$ определяют ошибки $\Delta x$ и $\Delta y$ прямых измерений по формуле (6), задавшись одним и тем же значением доверительной вероятности $\alpha$, аналогично тому, как это делается в случае прямых измерений. Полную ошибку косвенных измерений рассчитывают по формуле:

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2}\ , \tag{8}$$

где $\dfrac{\partial f}{\partial x}$, $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ – частные производные функции $u = f(x,y)$. При численных расчетах по формуле (8) значения производных находят при $x = \bar{x}$, $y = \bar{y}$. Находят относительную ошибку по формуле $\varepsilon = \dfrac{\Delta u}{u}\cdot 100\%$. Результат расчетов записывают в виде $u = \bar{u} \pm \Delta u$, $\varepsilon = \dfrac{\Delta u}{u}\cdot 100\%$. В некоторых случаях последовательность расчета ошибок лучше изменить и находить сначала относительную, а уже затем абсолютную ошибку. Так, в частности, если измеряемая косвенно величина рассчитывается по формуле $u = Ax^n y^m z^k$, то для относительной ошибки можно получить выражение

$$\frac{\Delta u}{u} = \sqrt{\left(n\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(m\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(k\frac{\Delta z}{z}\right)^2}\ . \tag{9}$$

Найдя относительную ошибку, формула которой имеет наиболее простой вид, вычисляют абсолютную ошибку $\Delta u = \bar{u}\varepsilon$.

### 3. Ошибки косвенных измерений (невоспроизводимые условия)

Пусть для расчета косвенно измеряемой величины $u = f(x,y)$ произведено $n$ измерений $x_1, \dots\ x_n$, $y_1, \dots\ y_n$, причем измеренные значения получены при разных условиях, а это значит, что их нельзя усреднять. Последовательность проведения расчетов в этом случае выглядит следующим образом.

Вначале для каждой пары значений $x_i$, $y_i$ рассчитывают соответствующие значения $u_i$, после чего находят среднее значение

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i}{n} \tag{10}$$

и среднее квадратическое отклонение

$$S_{nu} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(u_i - \bar{u})^2}\ . \tag{11}$$

Задав значение ДВ $\alpha$, определяют величину случайной ошибки:

$$\Delta u_{сл} = t_{n\alpha} \cdot S_{nu} . \tag{12}$$

Рассчитывают приборную ошибку по формуле

$$\Delta u_{пр} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x_{пр}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y_{пр}\right)^2} , \tag{13}$$

а затем полную абсолютную ошибку косвенного измерения:

$$\Delta u = \sqrt{\Delta u_{сл}^2 + \Delta u_{пр}^2} . \tag{14}$$

Относительную ошибку находят по тем же формулам, которые были приведены выше.

## 4. Правила построения и обработки графиков. Метод наименьших квадратов

Результаты измерений представляют в виде таблиц и графиков. Таблицы позволяют проводить не только сравнение различных значений, но и обработку результатов измерений. Для определения связи между двумя переменными строят графики. При построении графиков следует придерживаться следующих правил: независимую переменную откладывать вдоль оси абсцисс, а зависимую – вдоль оси ординат, выбирать начало отсчета и масштаб таким образом, чтобы график занимал всю отпущенную на него площадь. Если экспериментальные точки не удается расположить на какой-нибудь линии, определяемой простой аналитической формулой, то возникает задача о наилучшем приближении данной совокупности экспериментальных точек некоторой функцией. Наилучшим средством решения этой задачи является метод наименьших квадратов, применение которого поясним на самом простом примере, когда функциональная связь между $x$ и $y$ ищется в виде

$$y = kx + b . \tag{15}$$

Согласно методу наименьших квадратов коэффициенты $k$ и $b$ этого уравнения необходимо выбирать так, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от искомой прямой

$$S(k,b) = \sum_{i=1}^{n}(y_i - kx_i - b)^2 \tag{16}$$

была наименьшей. Необходимые условия экстремума функции многих переменных $\frac{\partial S}{\partial k} = 0$, $\frac{\partial S}{\partial b} = 0$ сводят задачу к решению системы двух линейных уравнений относительно $k$ и $b$, что приводит к формулам

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \tag{17}$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}. \tag{18}$$

Аналогичным методом можно рассчитать параметры любой другой аналитической зависимости между экспериментально найденными переменными.

Приложение

## Значения коэффициентов Стьюдента $t_{n\alpha}$

| n | α=0,95 | α=0,99 | n | α=0,95 | α=0,99 |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 2,78 | 4,6 | 14 | 2,16 | 3,01 |
| 6 | 2,57 | 4,03 | 15 | 2,15 | 2,98 |
| 7 | 2,45 | 3,71 | 20 | 2,093 | 2,861 |
| 8 | 2,37 | 3,5 | 25 | 2,064 | 2,797 |
| 9 | 2,31 | 3,36 | 30 | 2,045 | 2,756 |
| 10 | 2,26 | 3,25 | 35 | 2,032 | 2,72 |
| 11 | 2,23 | 3,17 | 40 | 2,023 | 2,708 |
| 12 | 2,2 | 3,11 | 45 | 2,016 | 2,692 |
| 13 | 2,18 | 3,06 | 50 | 2,009 | 2,679 |

*Задание* 1. Для определения плотности некоторого металла были произведены измерения линейных размеров (диаметра и высоты) цилиндрических образцов этого металла, изготовленных на однотипном оборудовании, и определена масса этих образцов. Результаты 20 измерений приведены в таблице.

Измерения линейных размеров производились штангенциркулем с приборной погрешностью 0,1 мм, а измерение массы производилось с погрешностью 0,1 г. Определить среднюю плотность металла и вычислить абсолютную и относительную погрешности измерений с доверительной вероятностью 0,95. Формула для расчета плотности имеет вид

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}.$$

| N | d, мм | h, мм | m, г | N | d, мм | h, мм | m, г |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 32,1 | 84,5 | 183,5 | 11 | 31,9 | 84,2 | 182,3 |
| 2 | 31,8 | 83,8 | 181,2 | 12 | 31,6 | 83,9 | 181 |
| 3 | 30,6 | 83,6 | 174,6 | 13 | 31,4 | 83,5 | 179,8 |
| 4 | 31,4 | 83,2 | 179,4 | 14 | 31,5 | 82,9 | 178,3 |
| 5 | 31,7 | 84 | 182,6 | 15 | 30,8 | 83,2 | 175,1 |
| 6 | 30,5 | 84,3 | 177,2 | 16 | 31,1 | 83,7 | 177,7 |
| 7 | 30,8 | 83,8 | 178,1 | 17 | 31,8 | 84 | 182,8 |
| 8 | 31 | 83,9 | 180,1 | 18 | 31,6 | 83,9 | 181,9 |
| 9 | 30,9 | 84,1 | 178,5 | 19 | 31,5 | 83,8 | 181,3 |
| 10 | 31,2 | 84,3 | 180,4 | 20 | 31,6 | 83,4 | 181,1 |

*Задание* 2. Исходные данные берутся из задания 1, причем диаметры всех образцов уменьшаются на 5 мм, высота увеличивается на 12 мм, а масса увеличивается на 40 г. Доверительная вероятность 0,99. Приборные ошибки такие же, как и в задании 1.

*Задание* 3. Исходные данные берутся из задания 1, причем диаметры всех образцов уменьшаются на 8 мм, высота уменьшается на 24 мм, масса уменьшается на 45 г. Доверительная вероятность 0,95. Приборные ошибки такие же, как и в задании 1.

*Задание* 4. Исходные данные берутся из задания 1, причем диаметры всех образцов увеличиваются на 7 мм, высота увеличивается на 22 мм, а масса увеличивается на 80 г. Доверительная вероятность 0,99. Приборные ошибки такие же, как и в задании 1.

*Задание* 5. Исходные данные берутся из задания 1, причем диаметры всех образцов увеличиваются на 14 мм, высота уменьшается на 15 мм, а масса увеличивается на 150 г. Доверительная вероятность 0,95. Приборные ошибки такие же, как и в задании 1.

*Задание* 6. Исходные данные берутся из задания 1, причем диаметры всех образцов уменьшаются на 10 мм, высота увеличивается на 18 мм, а масса уменьшается на 30 г. Доверительная вероятность 0,99. Приборные ошибки такие же, как и в задании 1.

# Лабораторная работа № 2 (М2) ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Цель работы: определение ускорения силы тяжести, изучение характеристик физического маятника.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Математический и физический маятники.
2. Основное уравнение динамики вращательного движения. Момент силы, момент инерции тела.
3. Уравнение свободных колебаний математического (физического) маятника и его решение. Амплитуда, период, частота, фаза колебаний.
4. Приведенная длина физического маятника. Центр тяжести и центр качания маятника.
5. Теорема Штейнера.

## Описание установки и метода измерений

Экспериментальная установка представляет собой кронштейн, на котором одновременно укреплены физический и математический маятники.

*Задание* 1. Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника.

Из выражения для периода колебаний математического маятника можно получить формулу для определения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \tag{1}$$

где $T$ – период колебаний маятника, $l$ – расстояние от точки подвеса до центра тяжести груза.

Отклоняя груз от положения равновесия на небольшие углы ($\leq 5^0$), измеряют время $N$ колебаний и затем рассчитывают период колебаний по формуле $T = \dfrac{t}{N}$ (для уменьшения погрешности измерения периода число колебаний выбирать из условия $N \geq 20$). Провести 4–5 измерений при фиксированной длине маятника, а затем однократные измерения для разных длин маятника и для каждого способа измерений рассчитать среднее значение ускорения силы тяжести по формуле (1) и величину ошибки измерений.

*Задание* 2. Определение момента инерции физического маятника и проверка теоремы Штейнера.

Физический маятник представляет собой однородный стержень длиной 1 м и массой 1,6 кг, точка подвеса которого может перемещаться вдоль стержня.

1. Используя формулу периода колебаний физического маятника, можно получить выражение для момента инерции маятника в виде

$$J_э = \frac{mglT^2}{4\pi^2}, \tag{2}$$

где $l$ – расстояние от точки подвеса маятника до его центра масс (середины стержня). Перемещая точку подвеса стержня провести измерения периода колебаний для случаев, когда точка подвеса располагается на расстояниях 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 см от конца стержня. Вследствие значительной величины силы трения колебания быстро затухают, поэтому нужно измерять время 10 колебаний, а угол отклонения маятника увеличить до $10^0 - 15^0$. Для каждого случая определить момент инерции стержня по формуле (2) и рассчитать приборную ошибку.

2. Теоретические значения момента инерции можно вычислить по формуле

$$J = \frac{mL^2}{12} + ml^2, \tag{3}$$

где $L$ – длина стержня. Определить теоретические значения момента инерции для соответствующих значений $l$ и сравнить их с экспериментальными.

3. Построить график зависимости $T(l)$ по экспериментальным данным и теоретически.

*Задача* 1. Физический маятник представляет собой тонкий однородный стержень длиной 35 см. Определить, на каком расстоянии от центра масс должна находиться точка подвеса, чтобы частота колебаний была максимальной.

*Задача* 2. Однородный диск радиусом $R = 20\,см$ колеблется около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии $l = 15\,см$ от центра диска. Определить период колебаний диска относительно этой оси.

## Лабораторная работа № 3 (М3)
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОБОРОТНЫМ МАЯТНИКОМ

Цель работы: изучить один из наиболее точных методов определения ускорения свободного падения – метод, использующий оборотный маятник, и определить ускорение свободного падения.

### План подготовки к лабораторной работе

1. Физический маятник. Приведенная длина маятника.
2. Момент инерции тела. Момент инерции математического маятника. Теорема Штейнера.
3. Основное уравнение динамики вращательного движения. Уравнение свободных колебаний физического маятника и его решение.
4. Период колебаний и частота.
5. Оборотный маятник. Приведенная длина маятника. Точка подвеса и центр качания.

### Описание установки и метода измерений

Ускорение свободного падения можно определить, зная период колебаний, например, физического маятника. Наилучший из физических маятников для этой цели – оборотный маятник – это длинный металлический стержень, на котором находятся две металлические призмы, легко перемещающиеся вдоль стержня. Каждая из призм может быть точкой подвеса. Призмы располагаются так, что центр тяжести всего тела находится между ними.

Применение оборотного маятника для определения ускорения свободного падения основано на свойстве сопряженности точки подвеса и центра качания. Это свойство заключается в том, во всяком физическом маятнике всегда можно найти две такие точки, при подвешивании за которые маятника периоды колебаний оказываются равными. Расстояние между этими точками представляет приведенную длину маятника.

Период колебаний физического маятника определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{J_0}{mgl} + \frac{l}{g}}\ , \tag{1}$$

где $J$ – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса, $J_0$ – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс, $l$ – расстояние между осями (от центра масс до точки подвеса). Если в оборотном маятнике найдены две таких точки, что периоды колебаний маятника относительно этих точек одинаковы, то

$$T^2 l_1 g - T^2 l_2 g = 4\pi^2 ( l_1^2 - l_2^2 ), \tag{2}$$

где $l_1$ и $l_2$ – расстояния от точек подвеса до центра масс маятника.

Из формулы (2) следует

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \tag{3}$$

где $l = l_1 + l_2$ – расстояние между точками подвеса.

*Задание*. Определить период колебаний оборотного маятника относительно одной из призм путем измерения времени 40–50 полных колебаний. Перевернуть маятник и измерить период его колебаний относительно другой призмы. Если периоды колебаний не совпадут, передвинуть подвижную чечевицу вдоль стержня и повторить измерения. После получения одинаковых периодов колебания измерить расстояние между призмами и по формуле (3) определить ускорение свободного падения. Рассчитать приборную ошибку измерений.

*Задача* 1. К наклонной стене подвешен маятник длины $l$. Маятник отклонили от вертикали на малый угол, в два раза превышающий угол наклона стены к вертикали, и отпустили. Найти период колебаний маятника, если удары о стену абсолютно упругие.

*Задача* 2. Тонкий однородный стержень длиной $l = 60\,см$ может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, отстоящей на расстоянии $x = 15\,см$ от его середины. Определить период колебаний стержня, если он совершает малые колебания.

# Лабораторная работа № 4 (М6) ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ КАТАЮЩЕГОСЯ ШАРИКА

Цель работы: изучение законов колебательного и вращательного движений.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Колебательное движение. Уравнение гармонического колебательного движения.
2. Скорость, ускорение, энергия колебательного движения.
3. Момент инерции материальной точки и твердого тела.
4. Закон сохранения энергии для движения шарика по вогнутой поверхности.
5. Вывод формулы для расчета радиуса кривизны вогнутой поверхности.

## Описание установки и метода измерений

Произвольное движение твердого тела можно представить как сумму вращательного движения относительно оси, проходящей через центр масс тела и поступательного движения со скоростью, равной скорости центра масс.

Тогда закон сохранения энергии для случая движения шарика по вогнутой поверхности запишется в виде

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \tag{1}$$

где $mgh$ – максимальная потенциальная энергия шарика, $\frac{mv^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия поступательного движения шарика, $\frac{J\omega^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия вращательного движения шарика.

Предполагая, что вертикальное смещение шарика $h << R - r$ ($R$ – радиус кривизны поверхности, $r$ – радиус шарика), по теореме Пифагора приближенно получаем

$$h = \frac{x^2}{2(R-r)}, \tag{2}$$

где $x$ – горизонтальное смещение шарика от положения равновесия. Учитывая, что при движении без проскальзывания угловая скорость $\omega = \dfrac{v}{r}$, а момент инерции однородного шара $J = \dfrac{2}{5}mr^2$, закон сохранения энергии (1) можно переписать в виде

$$\frac{mg}{(R-r)} \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{7}{5} \cdot \frac{mv^2}{2} = E\ . \qquad (3)$$

Сравнивая полученную формулу с выражением для энергии гармонического осциллятора

$$E = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} \qquad (4)$$

и учитывая, что частота колебаний определяется из соотношения $\omega^2 = \dfrac{k}{m}$, получаем

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{5g}{7(R-r)}}\ , \qquad (5)$$

откуда следует, что

$$R = \frac{5}{7} \cdot \frac{gT^2}{4\pi^2} + r\ . \qquad (6)$$

*Задание*. Измерив время 5–7 колебаний шарика, определить период его колебаний. Измерить диаметр шарика и вычислить его радиус. Вычислить радиус кривизны вогнутой поверхности по формуле (6). Повторить измерения и расчеты для другого шарика. Вычислить среднее значение радиуса кривизны и определить приборную ошибку.

*Задача* 1. С вершины идеально гладкой сферы радиусом $R = 1{,}2\,\text{м}$ соскальзывает небольшое тело. Определить высоту $h$ (от вершины сферы), с которой тело оторвется от сферы.

*Задача* 2. Тонкий однородный стержень длиной $l = 60\,\text{см}$ может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, отстоящей на расстоянии $x = 15\,\text{см}$ от его середины. Определить период колебаний стержня, если он совершает малые колебания.

# Лабораторная работа № 5 (М7)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ТРИФИЛЛЯРНОГО ПОДВЕСА

Цель работы: определение моментов инерции тел простой геометрической формы и проверка теоремы Штейнера.

## План подготовки к работе

1. Сформулировать основное уравнение динамики вращательного движения и сравнить его со вторым законом Ньютона.
2. Дать определение момента силы, угловой скорости, углового ускорения, момента инерции материальной точки.
3. Момент инерции системы материальных точек и твердого тела относительно заданной оси.
4. Закон сохранения механической энергии.
5. Применение закона сохранения энергии для случая, когда потенциальная энергия тела в поле силы тяжести переходит в кинетическую энергию вращательного движения тела.
6. Теорема Штейнера.

## Описание установки и метода измерений

Трифиллярный подвес, используемый в работе, устроен следующим образом. К маленькому неподвижному диску радиуса $r$ на трех нитях одинаковой длины $l$ прикреплен большой диск (платформа) радиуса $R$, способный совершать крутильные колебания относительно своего центра. При повороте платформы на небольшой угол $\varphi$ за счет закручивания нитей она поднимается на некоторую высоту $h$. Связь между $\varphi$ и $h$ определяется формулой

$$h = \frac{Rr\varphi^2}{2\sqrt{l^2 - (R-r)^2}} = C\varphi^2 , \tag{1}$$

где постоянная прибора $C = \dfrac{Rr}{2\sqrt{l^2 - (R-r)^2}}$ .

Закон сохранения энергии для крутильных колебаний платформы можно записать в виде

$$\frac{J\omega^2}{2} + Mgh = E , \tag{2}$$

где $J$ – момент инерции, $M$ – масса, а $E$ – полная механическая энергия платформы, $\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$ – угловая скорость.

Подставляя выражения для $h$ и $\omega$ в уравнение (2), получаем

$$\frac{J}{2}\cdot\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + MgC\varphi^2 = E\ . \qquad (3)$$

Вычисляя производную от обеих частей уравнения (3) и используя закон сохранения энергии, получаем уравнение крутильных колебаний платформы

$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2MgC\varphi = 0\ . \qquad (4)$$

Уравнение (4) с точностью до обозначений совпадает с уравнением свободных незатухающих колебаний, следовательно, его решение можно записать в виде

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \alpha)\ , \qquad (5)$$

где $\varphi_0$ – амплитуда колебаний, $\omega = \sqrt{\dfrac{2MgC}{J}}$ – частота, $\alpha$ – начальная фаза колебаний. Так как период колебаний платформы $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$, то $T = \pi\sqrt{\dfrac{2J}{MgC}}$, откуда для момента инерции платформы получаем выражение $J = \dfrac{T^2 MgC}{2\pi^2}$, или с учетом формулы для постоянной прибора C

$$J = \frac{MgT^2 Rr}{4\pi^2\sqrt{l^2 - (R-r)^2}}\ . \qquad (6)$$

Если разместить на платформе тело или систему тел с моментом инерции $J_T$ и массой $m$, то аналогично получаем

$$J + J_T = \frac{(M+m)T^2 Rrg}{4\pi^2\sqrt{l^2-(R-r)^2}}\ . \qquad (7)$$

Измерив период колебаний пустой платформы и платформы с телом, при помощи формул (6) и (7), можно определить момент инерции тела, находящегося на платформе.

*Задание* 1. Определить момент инерции пустой платформы.

*Задание* 2. Определить по заданию преподавателя моменты инерции расположенных на платформе тел простой геометрической формы.

*Задание* 3. Сравнить полученные экспериментально значения моментов инерции с рассчитанными теоретически.

Каждый опыт повторить 3–4 раза, измеряя время 20 полных колебаний платформы. Параметры установки $R$, $r$, $l$, $M$ указаны на лабораторном столе.

*Задача* 1. Однородный стержень длиной $l = 1\,м$ подвешен на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня. На какой угол $\alpha$ надо отклонить стержень, чтобы нижний конец стержня при прохождении положения равновесия имел скорость $v = 5\,{}^{м}\!/_{с}$ ?

*Задача* 2. Два шара массами $m_1 = 9\,кг$ и $m_2 = 15\,кг$ подвешены на нитях длиной $l = 1{,}5\,м$. Первоначально шары соприкасаются между собой, затем меньший шар отклоняют на угол $\alpha = 30^0$ и отпускают. Считая удар неупругим, определить высоту, на которую поднимутся оба шара после удара.

# Лабораторная работа № 6 (М8)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ОДНОРОДНОГО ДИСКА МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: определить момент инерции однородного диска.

## План подготовки к работе

1. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения.
2. Дайте определение моменту силы, моменту импульса относительно неподвижной оси.
3. Что такое момент инерции материальной точки и твердого тела? В чем измеряется эта величина?
4. Что является аналогом момента силы, момента импульса, момента инерции при поступательном движении материальной точки?
5. Уравнение свободных незатухающих колебаний и его решение. Характеристики колебательного движения: амплитуда, период, частота, фаза.

## Описание установки и метода измерений

Экспериментальная установка представляет собой сплошной однородный диск с набором шариков разной массы и разного диаметра, которые могут накручиваться на винт, расположенный на ободе диска.

Пренебрегая моментом сил трения, запишем уравнение движения диска с шариком (основное уравнение динамики вращательного движения):

$$J\varepsilon = -mgL\sin\varphi\,, \tag{1}$$

где $\varepsilon = \dfrac{d^2\varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение, $J = J_Д + J_Ш$, $J_Д$ – момент инерции диска, $J_Ш$ – момент инерции шарика, $\varphi$ – угол отклонения радиуса диска, проведенного через шарик, от вертикали, $m$ - масса шарика, $L$ – расстояние от оси вращения до центра шарика. Для малых углов уравнение (1) можно преобразовать к виду:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgL}{J}\varphi = 0\,, \tag{2}$$

откуда находим выражение для периода колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgL}}\,. \tag{3}$$

Решая это уравнение относительно момента инерции диска и полагая, что момент инерции шарика можно найти, как для материальной точки, получаем

$$J_Д = mL(\frac{gT^2}{4\pi^2} - L) . \qquad (4)$$

*Задание*. Измерив расстояние от оси вращения до центра шарика и определив период колебаний, рассчитать по формуле (4) момент инерции диска. При измерении периода колебаний найти время 5–10 полных колебаний для уменьшения погрешности. Используя значения радиуса и массы диска, вычислить его момент инерции теоретически и сравнить с экспериментальным значением. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности измерений.

*Задача* 1. Пуля массой $m_1 = 10\,г$ , летящая горизонтально, попадает в баллистический маятник с длиной подвеса $l = 1\,м$ и массой $M = 1{,}5\,кг$ и застревает в нем. Определить скорость пули, если известно, что в результате удара маятник отклонился на угол $\varphi = 30^0$ .

*Задача* 2. К наклонной стене подвешен маятник длины $l$ . Маятник отклонили от вертикали на малый угол, в два раза превышающий угол наклона стены к вертикали, и отпустили. Найти период колебаний маятника, если удары о стену абсолютно упругие.

# Лабораторная работа № 7 (М10)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВОГО КОЛЕСА И СИЛЫ ТРЕНИЯ В ОПОРЕ

Цель работы: определение момента инерции колеса и силы трения в опоре.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения.
2. Дайте определения моменту силы, моменту импульса относительно неподвижной оси.
3. Дать определения моментов инерции материальной точки и твердого тела.
4. Какие величины служат аналогами момента силы, момента импульса, момента инерции при поступательном движении тел?
5. Что такое консервативные и неконсервативные силы?
6. Сформулируйте закон сохранения энергии для случая, когда в системе действуют неконсервативные силы.

## Описание установки и метода измерений

Момент инерции колеса и силу трения в опоре можно определить при помощи устройства, представляющего собой маховое колесо, насаженное на горизонтальный вал. Маховое колесо приводится в движение благодаря натяжению нити, к которой привязан опускающийся под действием силы тяжести груз. Если предоставить грузу возможность падать, то его потенциальная энергия перейдет в кинетическую энергию системы колесо–груз и будет израсходована на преодоление силы трения в опоре. По закону сохранения энергии

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + Fh_1, \tag{1}$$

где $v$ – скорость падения груза, $J$ – момент инерции, а $\omega$ – угловая скорость колеса. Решая уравнения равноускоренного движения груза относительно ускорения и скорости, получаем $a = \frac{2h_1}{t^2}$, $v = \frac{2h_1}{t}$. Поскольку линейная скорость точек на ободе вала совпадает со скоростью опускающегося груза, то угловая скорость вала (а значит и колеса) $\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h_1}{rt}$, где $r$ – радиус вала.

Сила трения может быть найдена следующим образом. После того как груз опустится с высоты $h_1$ на полную длину нити, колесо в силу инерции будет продолжать вращаться и наматывать нить на вал, вследствие чего груз опять поднимется на высоту $h_2 < h_1$. Изменение потенциальной энергии груза будет равно работе по преодолению трения в опоре:

$$mgh_1 - mgh_2 = F(h_1 + h_2), \tag{2}$$

откуда следует:

$$F = mg\frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \tag{3}$$

Выражение для момента инерции колеса получается в результате подстановки в формулу (1) выражений для скорости, угловой скорости и силы трения и имеет вид:

$$J = mr^2\left[gt^2\frac{h_2}{h_1\cdot(h_1 - h_2)} - 1\right]. \tag{4}$$

*Задание*. Измерить массу груза и диаметр вала. Подняв груз на высоту $h_1$, измерить время опускания груза до нижней точки $t$ и высоту подъема груза $h_2$. Рассчитать значения момента инерции и силы трения по формулам (3) и (4). Повторить опыт с грузом другой массы. Получить формулу и вычислить абсолютную и относительную ошибки измерений.

*Задача* 1. На однородный сплошной цилиндрический вал радиусом $R = 20\,см$, моментом инерции $J = 0{,}15\,кг\cdot м^2$ намотана легкая нить, к концу которой прикреплен груз массой $m = 0{,}5\,кг$. До начала вращения барабана высота $h$ груза над полом составляла 2,3 м. Определить: 1) время опускания груза до пола; 2) силу натяжения нити; 3) кинетическую энергию груза в момент удара о пол.

*Задача* 2. Бревно высотой $h = 3\,м$ и массой $m = 50\,кг$ начинает падать из вертикального положения на землю. Определить скорость верхнего конца и момент импульса бревна в момент падения на землю.

# Лабораторная работа № 8 (Э1)
# ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: изучить распределение потенциала электрического поля, созданного электродами различной конфигурации.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Напряженность электрического поля. Поле точечного заряда. Линии напряженности.
2. Потенциал. Разновидность потенциалов. Потенциал точечного заряда.
3. Связь между напряженностью и потенциалом электрического поля. Эквипотенциальные поверхности. Расположение силовых линий поля и эквипотенциальных поверхностей.
4. Поле разноименно заряженных пластин.
5. Суть метода измерений напряженности электрического поля точечного заряда и разноименно заряженных пластин.

## Описание установки и методика измерений

При конструировании электрических ламп, конденсаторов, электронных линз и других приборов часто требуется знать распределение электрического поля в пространстве, заключенном между электродами сложной формы.

Аналитический расчет поля в общем случае невыполним. Поэтому сложное электростатическое поле исследуется экспериментально. Для измерений часто используется метод электролитической ванны. Электроды, подобные реальным, располагают в электролитической ванне на расстояниях, моделирующих прибор. Замена непроводящей среды (воздух, слюда, вакуум) проводящей может изменить распределение электрического поля. Выясним условия, при которых эти изменения незначительны.

Рассмотрим систему уравнений Максвелла в однородной проводящей среде, в которой отсутствуют объемные заряды ρ:

$$\begin{aligned} div\vec{E} &= 0 \\ rot\vec{E} &= 0 \end{aligned} \qquad (1)$$

Из закона сохранения заряда (в дифференциальной форме)

$$div\vec{j} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \qquad (2)$$

следует, что для постоянного (или почти постоянного) тока

$$div\vec{j} = 0\,. \tag{3}$$

Используя закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \lambda \cdot \vec{E}\,, \tag{4}$$

где λ – удельная проводимость среды, а также учитывая безвихревой характер постоянного тока (линии плотности тока $\vec{j}$ замыкаются на электродах), получим:

$$\begin{aligned} div\vec{j} &= \lambda \cdot div\vec{E} = 0, \\ rot\,\vec{j} &= \lambda \cdot rot\vec{E} = 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Из сравнения систем (5) и (1) видно, что между электродами электростатическое поле совпадает с полем постоянных токов. Отличие этих полей на электродах будет тем меньше, чем больше разница между проводимостью электродов и проводящей средой.

Кроме граничных условий на электродах в жидкости возникают граничные условия на поверхности, на стенках и дне ванны. Эти условия связаны с тем, что ток не может идти перпендикулярно поверхности (из проводящей жидкости в воздух, в стенки или дно ванны). Так как $\vec{j} = \lambda \cdot \vec{E}$, то в жидкости вблизи границ установится такое распределение тока, при котором вектор $\vec{E}$ не имеет составляющих перпендикулярных поверхностей.

Итак, моделирование электрических полей с помощью электролитической ванны возможно при выполнении следующих условий: 1) токи должны быть постоянными; 2) среда, заполняющая ванну, должна иметь малую проводимость; 3) для изучения распределения электрического поля в объеме нужно исключить влияние поверхности, границ, поместив электроды вдали от них.

Отметим, что для изучения полей, для описания которых достаточно двух координат (плоских полей), влияние поверхности дна можно исключить, поместив электроды на дно и подобрав уровень жидкости таким образом, чтобы он был ниже высоты электродов.

Обычно в электрической ванне измеряется не вектор напряженности, а потенциал электрического поля. Напряжение источника питания $1 \div 15$ В подается на электроды. Распределение потенциала между электродами измеряется цифровым вольтметром, который включается между зондом и одним из электродов.

*Задание* 1. Исследование поля плоского конденсатора.

Подключить два плоских электрода к зажимам источника постоянного тока. Соединить вольтметр с одним из электродов и с зондом. Расположить электроды параллельно друг другу и перемещая зонд, отметить с помощью пантографа несколько точек постоянного потенциала.

Совокупность этих точек и определит эквипотенциальную линию. Меняя положение зонда на 2 см от прежней линии, зарисовать 5–6 эквипотенциальных линий, указывая при этом потенциал относительно выбранного электрода и замеряя расстояние.

*Задание* 2. Исследования поля, созданного цилиндрическими электродами.

Заменить плоские электроды цилиндрическими. Исследовать поле, созданное этими электродами (зарисовать 5–6 эквипотенциальных линий).

Обработка результатов измерений.

1. Для изученных полей изобразить картину силовых линий.

2. Составить таблицу и построить графики зависимости:

а) $\varphi = \varphi(r)$ и $E = E(r)$ – для поля плоских электродов;

б) $\varphi = \varphi(\frac{1}{r})$ и $E = E(\frac{1}{r})$ – для поля цилиндрических электродов. При расчетах напряженности поля воспользоваться соотношением:

$$\vec{\mathrm{E}} = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta r}.$$

3. Оценить, насколько изученные вами поля отличаются от электростатических.

*Задача* 1. Расстояние $l$ между зарядами $q = \pm 2\,нКл$ равно 20 см. Определить напряженность электрического поля, созданного этими зарядами в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 15\,см$ от положительного и $r_2 = 10\,см$ от отрицательного.

*Задача* 2. Кольцо радиусом $r = 5\,см$ из тонкой проволоки несет равномерно распределенный заряд $q = 10\,нКл$. Определить потенциал электростатического поля: 1) в центре кольца; 2) на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстояние $a = 10\,см$ от центра кольца.

# Лабораторная работа № 9 (Э4)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: получить общие представления о магнитном поле Земли и приобрести навыки для его измерения.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Записать закон Био-Савара-Лапласа в векторной и скалярной формах.
2. Что является источником магнитного поля? Указать направление напряженности магнитного поля $\vec{H}$, обусловленного прямыми, круговыми, синусоидальными токами. Описать источники магнитного поля Земли.
3. Дать пояснения к понятиям: горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля Земли.
4. Чему равна горизонтальная составляющая магнитного поля Земли на магнитных полюсах и магнитном экваторе?
5. В каком направлении установится стрелка компаса, находящегося на северном и южном магнитных полюсах?
6. Вывести рабочую формулу для нахождения горизонтальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли.

## Описание установки и методика измерений

1. Общие представления о магнитном поле Земли.

Из закона Био-Савара-Лапласа следует важный вывод – источником магнитного поля Земли являются движущиеся электрические заряды, то есть электрические токи. Знание этого закона позволило предположить, что магнитное поле Земли существует благодаря токам, протекающим в ее недрах.

В настоящее время установлено, что ядро Земли обладает высокой электропроводностью. За счет градиента температур наблюдаются процессы перемещения вещества, что и обусловливает возникновение электрических токов. Эти токи являются постоянной составляющей магнитного поля Земли. Таким образом, в земном ядре работает своеобразный динамо-механизм (геомагнитное динамо), благодаря которому Земля представляет огромный магнит.

На постоянную составляющую магнитного поля, образованного геомагнитным динамо, накладываются магнитные поля, созданные другими источниками, которые видоизменяют магнитное поле Земли так, что оно отличается от дипольного (как в случае постоянного магнита), и обусловливают его изменение во времени. Наиболее существенны следующие дополнительные поля: 1) мировые материковые аномалии; 2) локальные магнитные аномалии; 3) пульсации магнитного поля Земли.

2. Расчетная формула для измерения горизонтальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли.

Вектор $\vec{H}$ напряженности магнитного поля Земли может быть разложен на две составляющие относительно горизонта поверхности Земли: горизонтальную составляющую $\vec{H}_г$ и вертикальную – $\vec{H}_в$.

Для практических целей очень важно знать горизонтальную составляющую вектора напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_г$, так как на магнитную стрелку компаса действует только горизонтальная составляющая $\vec{H}_г$.

В данной работе $\vec{H}_г$ определяют с помощью тангенс-буссоли короткой катушки с большим радиусом витков. При прохождении постоянного тока через витки катушки образуется магнитное поле напряженностью $\vec{H}_K$, направленное перпендикулярно плоскости витков. В центре тангенс-буссоли находится магнитная стрелка, вращающаяся в горизонтальной плоскости. Концы стрелки движутся вдоль градусной шкалы, позволяющей отсчитывать угол ее поворота.

Если по виткам тангенс-буссоли ток не течет, то магнитная стрелка под действием горизонтальной направляющей вектора напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_г$ установится в направлении магнитного меридиана. После того, как стрелка установится, тангенс-буссоль поворачивают таким образом, чтобы плоскость ее витков совпала с направлением магнитной стрелки, а следовательно с плоскостью магнитного меридиана.

После этого пропускают ток $i$ по виткам тангенс-буссоли. В результате на магнитную стрелку кроме поля Земли $\vec{H}_г$ будет действовать и поле катушки $\vec{H}_K$. Поэтому магнитная стрелка повернется на угол $\varphi$ и расположится вдоль равнодействующей $\vec{H}_0$, являющейся векторной суммой $\vec{H}_0 = \vec{H}_г + \vec{H}_K$. Учитывая, что по условию опыта $\vec{H}_г \perp \vec{H}_K$, из прямоугольного треугольника имеем:

$$ctg\,\varphi = \frac{\vec{H}_г}{\vec{H}_K}, \tag{1}$$

откуда

$$\vec{H}_r = \vec{H}_K \cdot ctg\varphi \,. \tag{2}$$

Напряженность магнитного поля кругового тока $H = \dfrac{i}{2R}$, где $R$ – радиус витка; $i$ – сила тока. Так как в катушке протекает $n$ круговых токов ($n$ – число витков), то полная напряженность поля катушки

$$H_K = \frac{i \cdot n}{2R}. \tag{3}$$

Из (2) и (3) имеем

$$H_г = \frac{i \cdot n}{2R} \cdot ctg\varphi \,. \tag{4}$$

*Задание*. Провести измерения горизонтальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли.

1. Повернуть тангенс-буссоль так, чтобы направление магнитной стрелки $\vec{H}_г$ совпадало с плоскостью витков.

2. Включить источник питания и провести измерения углов $\varphi$ при двух направлениях тока $i$. Измерения провести для 3–5 разных значений тока (от 0 до 100 $m$А).

3. Используя результаты измерений $i$ и $\varphi$, по формуле (4) провести расчеты $\vec{H}_г$ и рассчитать ошибку $\Delta\vec{H}_г$ (постоянные $R$ и $n$ указанны на упаковке).

4. Считая, что средняя величина магнитного поля Земли $<\vec{H}>= 40\dfrac{А}{м}$, определить угол, который образует вектор $\vec{H}$ с плоскостью лабораторного стола.

*Задача* 1. Ток $I = 20\,A$, протекая по кольцу из медной проволоки сечением $S = 1\,мм^2$, создает в центре кольца напряженность магнитного поля $H = 178\,{}^{A}\!/_{м}$. Какая разность потенциалов $U$ приложена к концам проволоки, образующей кольцо?

*Задача* 2. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми $d = 10\,см$, текут токи $I_1 = 40\,A$ и $I_2 = 80\,A$ в одном направлении. Определить магнитную индукцию $B$ в точке, удаленной от первого проводника на $r_1 = 12\,см$ и от второго на $r_2 = 16\,см$.

# Лабораторная работа № 10 (Э5)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ

Цель работы: изучение движения электронов в постоянных электрическом и магнитном полях.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Движение заряженной частицы в магнитном поле.

1.1. Сила Лоренца, ее величина и направление.

1.2. Как движется заряженная частица, если она влетает в поле перпендикулярно к направлению силовых линий и если ее скорость направлена под углом к силовым линиям?

1.3. Устройство электронно-лучевой трубки.

1.4. Получить формулу для определения удельного заряда электрона, движущегося в магнитном поле.

1.5. Как радиус траектории частицы зависит от величины индукции магнитного поля?

2. Отклонение движущегося электрона электрическим и магнитным полями.

2.1. Определить смещение электрона, влетающего перпендикулярно силовым линиям электрического поля.

2.2. Как движется электрон, влетающий перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

2.3. Какие условия необходимо создать, чтобы электрон не испытывал отклонения, находясь одновременно в электрическом и магнитном полях.

2.4. Получить формулу для определения удельного заряда электрона при его движении в компенсирующих друг друга электрическом и магнитном поле.

## Описание установки и методики измерений

Методы определения удельного заряда электрона основаны на законах движения электрона в электрическом и магнитном полях.

### 1. Метод отклонения электронного пучка в магнитном поле катушки с током

Узкий направленный пучок из электронов можно получить при помощи электронно-лучевой трубки.

Электроны, вылетающие с катода, обладают запасом кинетической энергии, которая определяется напряжением между катодом и анодом, т.е.:

$$\frac{mV^2}{2} = eU \ , \tag{1}$$

где $m$ – масса, $e$ – заряд, а $V$ – скорость электрона, $U$ – разность потенциалов между катодом и анодом ($U = 1500 в$).

Из уравнения (1) можно определить скорость электрона:

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \ . \tag{2}$$

Если электронно-лучевую трубку поместить в магнитное поле с током, то на движущийся электрон будет действовать сила, называемая силой Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки. Численное значение силы Лоренца вычисляется по формуле

$$F_л = eVB \sin\alpha \, , \tag{3}$$

где $B$ – индукция магнитного поля, $\alpha$ – угол между направлением скорости электрона и магнитным полем.

В нашем случае электрон влетает перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, следовательно,

$$F_л = eVB \ . \tag{4}$$

Так как сила Лоренца, действующая на электрический заряд в магнитном поле, всегда перпендикулярна скорости, а следовательно, и к любому элементу траектории заряженной частицы, то работы эта сила не совершает, кинетической энергии заряженной частицы не изменяет, а значит не изменяет и величины ее скорости.

Действие силы Лоренца приводит только к искривлению траектории полета электрона. По величине сила Лоренца не изменяется и, следовательно, под действием этой силы электрон будет двигаться по окружности, т.е. эта сила будет являться центростремительной:

$$F_л = \frac{mV^2}{R} \, . \tag{5}$$

Решая совместно (4) и (5), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{R \cdot B} \, . \tag{6}$$

Следовательно, чтобы определить удельный заряд электрона, надо найти радиус кривизны траектории, по которой движутся электроны в магнитном поле катушки с током, и величину индукции магнитного поля.

Электронный луч отклоняется от первоначального направления вследствие воздействия магнитного поля катушки с током, ось которой перпендикулярна вектору скорости электрона. Радиус катушки равен $r$, расстояние от катушки до экрана трубки Z, а смещение электронного луча на экране $y$ ( $r = 1{,}7 см$ , $Z = 26{,}3 см$ ).

Приближенный расчет движения электрона в магнитном поле катушки и далее прямолинейно до экрана позволяет получить следующее выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U \cdot y^2}{r^2 B^2 (Z + r)^2} . \tag{7}$$

Индукцию магнитного поля внутри катушки определим по формуле

$$B = \mu_0 \cdot м \cdot I \cdot n_0 , \tag{8}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Гн/м$ , $\mu$ – магнитная проницаемость (воздуха); $I$ – ток, протекающий по катушке; $n_0$ – число витков, приходящееся на единицу длины катушки ( $n_0 = 833 \frac{1}{м}$ ).

Окончательное выражение для удельного заряда электрона имеет вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U \cdot y^2}{(4П \cdot 10^{-7} \cdot J \cdot n_0)^2 \cdot r^2 (Z + r)} . \tag{9}$$

**2. Метод компенсации электрического и магнитного полей**

Если на заряженную частицу действовать кроме магнитного еще и электрическим полем, то при определенных соотношениях между напряженностью электрического поля и магнитной индукцией и определенной взаимной ориентацией этих векторов возможна компенсация друг другом силы Кулона и силы Лоренца, т.е.

$$\vec{F}_л = -\vec{F}_к . \tag{10}$$

В таком случае движение электрона должно оставаться равномерным. В данной работе для создания электрического поля используется управляющий конденсатор, напряжение на обкладках которого можно варьировать при помощи подключенного к нему источника тока. В однородном электрическом поле конденсатора на электроны будет действовать сила

$$F_к = eE = e\frac{U_к}{d} , \ d = 1{,}15 \cdot 10^{-3} м , \tag{11}$$

где $d$ – расстояние между пластинами управляющего конденсатора, а $U_к$ – напряжение на его обкладках. Приравнивая выражения для сил Кулона и Лоренца (11) и (4) и учитывая формулу (2), получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2U}\left(\frac{U_к}{B \cdot d}\right)^2. \tag{12}$$

С учетом формулы (8) для индукции магнитного поля в катушке получаем окончательно

$$\frac{e}{m} = k\left(\frac{U_к}{I}\right)^2, \tag{13}$$

где $k = \frac{1}{2U(\mu_0 n_0 d)^2}$ – неизменная величина при всех повторяемых измерениях.

*Задание* 1. Определить значение удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка магнитным полем.

1. Получить на экране осциллографа электронный луч.

2. Изменяя реостатом силу тока в катушке, определить величину силы тока для трех значений смещения луча на экране (например 1, 2, 3 см).

3. Рассчитать значение удельного заряда электрона для всех случаев, найти среднее значение и ошибку.

*Задание* 2. Определить значение удельного заряда электрона методом компенсации электрического и магнитного полей.

1. Получить на экране осциллографа электронный луч.

2. Изменяя силу тока в катушке, сместить луч.

3. Подобрать такое напряжение $U_к$ на управляющем конденсаторе, при котором луч сфокусируется в точку.

4. Измерения провести не менее 3-х раз. Для всех случаев рассчитать значение удельного заряда электрона и оценить ошибку измерений.

*Задача* 1. Электрон, обладая скоростью $v = 1\,{}^{Мм}/_{с}$, влетает в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 60^0$ к направлению поля и начинает двигаться по спирали. Напряженность магнитного поля $H = 1{,}5\,{}^{кА}/_{м}$. Определить: 1) шаг спирали; 2) радиус витка спирали.

*Задача* 2. Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 4\,см$. Электрон начинает двигаться от отрицательно заряженной пластины в тот момент, когда от положительно заряженной пластины начинает двигаться протон. На каком расстоянии $l$ от положительной пластины встретятся электрон и протон?

# Лабораторная работа № 11 (Э12)
# ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА НА ЕГО ОСИ

Цель работы: используя метод измерения ЭДС индукции, провести расчет индукции магнитного поля на оси соленоида $B_0$ и сравнить с теоретически рассчитанной величиной $B_T$.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Сформулировать и записать закон Био-Савара-Лапласа в скалярной и векторной формах.
2. Нарисовать и указать направление силовых линий магнитного поля, образованного прямым током (прямой провод с током), круговым (круговой провод с током) и системой круговых токов (соленоида).
3. При каких условиях возникает электромагнитная индукция? Сформулировать и записать закон электромагнитной индукции для одиночного контура и для соленоида (катушки).
4. Какой метод положен в основу измерения магнитной индукции соленоида в настоящей работе? Вывести рабочую формулу для $B_0$.
5. Какими свойствами обладает магнитное поле внутри и вне бесконечно длинного соленоида?

## Описание установки и метода измерений

В настоящей работе для определения индукции магнитного поля в любой точке на оси соленоида используется метод, основанный на измерении ЭДС индукции.

Суть метода заключается в том, что на концах катушки, образованной витками провода, помещенного в переменное магнитное поле, наводится переменная ЭДС индукции, равная скорости изменения магнитного потока со временем, т.е.

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt}, \tag{1}$$

где $\Psi = \Phi N$ – полный магнитный поток; $N$ – число витков контура (катушки); $\Phi$ – магнитный поток через один виток. Переменный ток $I$ с частотой $\nu = 50$ Гц, проходя по виткам соленоида, образует внутри него переменное магнитное поле. Считая, что ток меняется по закону косинуса, индукцию магнитного поля можно записать в виде:

$$B = B_0 \cos \omega t, \tag{2}$$

где $B_0$ – амплитудное значение индукции.

Внутрь соленоида помещена измерительная катушка, укрепленная на конце магнитного стержня. Полный магнитный поток, равный

$$\Psi = \Phi N_1 = N_1 S B_0 \cos\omega t \tag{3}$$

(где $N_1$ – число витков, $S$ – площадь поперечного сечения измерительной катушки), согласно (1) наводит в измерительной катушке ЭДС индукции $\varepsilon$. Подставив (3) в (1), получаем

$$\varepsilon = 2\pi\nu N_1 S B_0 \sin\omega t \,, \tag{4}$$

где $\omega = 2\pi\nu$ .

Так как действующее значение ЭДС $\varepsilon = \dfrac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}$, то с учетом $\varepsilon_0 = 2\pi\nu N_1 S B_0$ для действующего значения ЭДС получаем

$$\varepsilon = \sqrt{2}\pi\nu N_1 S B_0 \,. \tag{5}$$

Отсюда находим

$$B_0 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}\pi\nu N_1 S} \,. \tag{6}$$

*Задание.*

1. Включить источник питания соленоида и, передвигая измерительную катушку вдоль оси соленоида, произвести измерение $\varepsilon$ с шагом 1 см. Измерения произвести при трех значениях тока $I$, меняя положение переключателя источника питания. Величину $I$ определить по амперметру.

2. Используя полученные значения $\varepsilon$, по формуле (6) рассчитать $B_0$.

3. На одном графике построить зависимость Bo = $f(\ell)$ для трех токов.

4. Определить теоретическое значение магнитной индукции соленоида по формуле $B_T = \sqrt{2}\cdot\mu\cdot\mu_0 \dfrac{N_2}{\ell} J$, где число витков соленоида $N_2 = 131$, а длина соленоида $\mathrm{l} = 13{,}6$ см. Сравнить полученное значение с результатами эксперимента.

*Задача 1.* Плоскость проволочного витка площадью $S = 100\,см^2$ и сопротивлением $R = 5\,Ом$, находящегося в однородном магнитном поле напряженностью $H = 10\,{}^{кА}\!/_{м}$, перпендикулярна линиям магнитной индукции. При повороте витка в магнитном поле через гальванометр, замкнутый на виток, прошел заряд $q = 12{,}6\,мкКл$. Определить угол поворота витка.

*Задача* 2. Обмотка соленоида состоит из $N$ витков медной проволоки, поперечное сечение которой $S = 1\,мм^2$. Длина соленоида $l = 0{,}25\,м$, его сопротивление $R = 0{,}2\,Ом$. Найти индуктивность соленоида.

# Лабораторная работа № 12 (О1)
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ТОНКИХ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

Цель работы: определить главные фокусные расстояния и оптические силы собирающей и рассеивающей линз.

План подготовки к лабораторной работе:

1. Что называется оптической линзой? Какие линзы называются собирающими и какие рассеивающими?
2. Что такое главный фокус линзы, главная оптическая ось линзы, фокальная плоскость?
3. По каким признакам принято характеризовать изображения предметов в линзах?
4. Напишите формулу тонкой линзы.
5. Что называется линейным увеличением линзы?
6. В каких единицах измеряется оптическая сила линзы?
7. Как зависит оптическая сила линзы от оптических свойств среды, в которой находится линза?
8. В чем суть метода Бесселя определения фокусного расстояния рассеивающей линзы?
9. Получите формулы абсолютных погрешностей фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз.

## Описание установки и метода измерений

Линза представляет собой центрированную систему двух сферических поверхностей. Прямая, на которой лежат центры обеих поверхностей, называется главной оптической осью, а точки на оси, где собираются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси – главными фокусами. Расстояние от центра линзы до главного фокуса называется главным фокусным расстоянием $F_1$. Согласно формуле тонкой линзы расстояния предмета (от предмета до линзы) $d$ и изображения (от линзы до изображения) $f$ связаны с фокусным расстоянием:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} . \qquad (1)$$

Поскольку изображение предмета, получаемое с помощью рассеивающей линзы, всегда является мнимым, для его определения используется метод Бесселя, суть которого состоит в следующем. Пусть имеется система линз, с помощью которой можно получить действительное изображение на экране. Расстояние между предметом и экраном равно $L$, а между линзами $S$. Перемещая систему линз (не меняя при этом расстояние между ними) вдоль оптической скамьи можно получить на экране увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Если расстояние между этими положениями равно $l$, то для фокусного расстояния системы линз можно получить выражение

$$F = \frac{(L+l)\cdot(L-l)}{4L}. \tag{2}$$

Для системы, состоящей из двух тонких линз с главными фокусными расстояниями $F_1$ и $F_2$, справедлива формула

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} - \frac{S}{F_1 \cdot F_2}. \tag{3}$$

Решая уравнения (2) и (3) относительно $F_2$, получаем выражение

$$F_2 = \frac{(F_1 - S)\cdot(L+l)\cdot(L-l)}{4L\cdot F_1 - (L+l)\cdot(L-l)}. \tag{4}$$

Формулы (1) и (4) являются основными расчетными формулами в данной работе.

*Задание* 1. Перемещая собирающую линзу между предметом и экраном, добиться на экране четкого изображения предмета. Измерив расстояния предмета и изображения, рассчитать по формуле (1) фокусное расстояние собирающей линзы. Повторить измерения 3–5 раз, меняя расстояние между предметом и экраном. Определить по результатам вычислений среднее значение фокусного расстояния, оптической силы линзы и величину относительной и абсолютной погрешностей измерений.

*Задание* 2. Собрав систему из собирающей и рассеивающей линз, измерить расстояния между линзами в системе, между двумя положениями системы, при которых на экране наблюдается четкое изображение предмета, и определить по формуле (4) фокусное расстояние рассеивающей линзы. Найти оптическую силу рассеивающей линзы и абсолютную и относительную погрешности измерений.

*Задача* 1. Точечный источник света находится на главной оптической оси линзы на расстоянии $d = 25\,см$ от нее. Фокусное расстояние линзы $F = 10\,см$, ее радиус $r = 5\,см$. По другую сторону линзы ставят экран так, что на нем получается четкое изображение источника. Затем экран перемещают вдоль оси на расстояние $a = 5\,см$. Найти радиус $R$ светлого круга на экране.

*Задача* 2. Собирающая линза с оптической силой $D = 8$ дптр дает изображение предмета, равное размеру предмета. Как нужно изменить расстояние между линзой и предметом, чтобы его изображение уменьшилось в 3 раза?

# Лабораторная работа № 13 (О4) ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА НА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЕ

Цель работы: определение показателя преломления стеклянной пластины.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Какое явление называется интерференцией?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Как можно получить когерентные волны?
4. Что называется геометрической и оптической разностью хода двух волн?
5. Каковы условия максимумов и минимумов интенсивности света при интерференции?
6. Получить формулу, определяющую разность хода двух волн, отраженных от плоскопараллельной пластины.
7. Что называется порядком интерференции?

## Описание установки и метода измерений

В данной работе плоскопараллельная стеклянная пластина освещается расходящимся световым пучком, который получают с помощью объектива, через который пропускают лазерное излучение. Отраженные от передней и задней поверхностей пластины световые волны интерферируют между собой и дают на экране интерференционную картину в виде концентрических светлых и темных колец.

Пусть $r$ – радиус кольца на экране, $d$ – толщина пластины, $l$ – расстояние от пластины до экрана ($r << l$, $d << l$). Определим радиус $k$-го кольца на экране, используя условие минимумов при интерференции света в плоскопараллельных пластинах

$$2dn\cos\varphi = k\lambda, \qquad (1)$$

где $\varphi$ – угол преломления света в пластине и очевидное соотношение

$$tgi = \frac{r_k}{2l}, \qquad (2)$$

где $i$ – угол падения луча на пластину. Из закона преломления

$$\frac{\sin i}{\sin\varphi} = n. \qquad (3)$$

С учетом малости всех рассматриваемых углов приближенно следует $i \approx n\varphi$, что после подстановки в (2) в таком же приближении дает

$$\varphi = \frac{r_k}{2nl} \, . \tag{4}$$

Разложив $\cos\varphi$ в ряд и оставив в разложении два первых слагаемых, запишем формулу (1) в виде

$$2dn(1 - \frac{\varphi^2}{2}) = k\lambda \, . \tag{5}$$

После подстановки (4) в (5) и несложных преобразований получаем

$$\frac{r_k^2}{l^2} = 8n^2 - \frac{4n\lambda}{d} k \, . \tag{6}$$

Из формулы (6) видно, что $r_k^2$ линейно убывает с $k$, т.е. в центре интерференционной картины $r_k = 0$, $k = k_{\max}$, поэтому, если номер кольца отсчитывать от центра, то номер кольца $N$ связан с порядком интерференции $k$ соотношением $k = k_{\max} - N$. Таким образом, $r_k^2$ линейно зависит от номера кольца $N$. Поэтому, если построить график зависимости $r_k^2 = f(N)$, то можно определить ее угловой коэффициент, который из (6) равен

$$\frac{1}{l^2} \cdot \frac{\Delta r_k^2}{\Delta N} = \frac{4n\lambda}{d} \, . \tag{7}$$

Разрешая это уравнение относительно показателя преломления, окончательно находим

$$n = \frac{d}{4\lambda l^2} \cdot \frac{\Delta r_k^2}{\Delta N} \, , \tag{8}$$

где $\Delta r_k^2$ – разность квадратов радиусов последнего и первого измеренных колец, а $\Delta N$ – разность их номеров.

Так как при $k = k_{\max}$ $r_k = 0$, то из (6) получаем расчетную формулу для определения максимального порядка интерференции

$$k_{\max} = \frac{2dn}{\lambda} \, . \tag{9}$$

*Задание.*

Получить с помощью лазера на экране интерференционную картину в виде концентрических колец. Определить радиусы 8–10 темных колец и построить график $r_k^2 = f(N)$. Определить по графику угловой коэффициент прямой и по формуле (8) вычислить показатель преломления стеклянной пластины. Определить максимальный порядок интерференции по формуле (9). Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерений. Длина волны лазерного излучения, используемого в работе, равна 0,633 мкм.

*Задача* 1. На плоскопараллельную пленку с показателем преломления $n = 1{,}33$ под углом $\alpha = 45^0$ падает параллельный пучок белого света. Определить при какой наименьшей толщине пленки отраженный от нее свет наиболее сильно окрасится в желтый свет ( $\lambda = 0{,}6\,\text{мкм}$).

*Задача* 2. На стеклянный клин ($n = 1{,}5$) нормально падает монохроматический свет ( $\lambda = 698\,\text{нм}$). Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 2 мм.

# Лабораторная работа № 14 (О6)
# ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ НА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

Цель работы: изучение явления дифракции на дифракционной решетке и определение постоянной решетки.

## План подготовки к лабораторной работе

1. В чем состоит явление дифракции света?
2. Каковы условия наблюдения дифракции?
3. Основные виды дифракции. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля?
4. Как меняется интенсивность света на экране при дифракции на щели и на дифракционной решетке?
5. Записать условие, описывающее положение главных максимумов и минимумов освещенности при дифракции на решетке.
6. Дать определение линейной и угловой дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки.

## Описание установки и метода измерений

Дифракционной решеткой называется система параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками. Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т.е. в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.

В данной работе в качестве источника света используется лазер (длина волны излучения $\lambda = 0{,}6328\,мкм$), а дифракционная картина после прохождения света через решетку наблюдается на экране.

Известно, что главные максимумы интенсивности света при дифракции на решетке наблюдаются в направлениях, которые определяются условием

$$d \sin\varphi = k\lambda\,, \qquad (1)$$

где $d$ – постоянная (период) решетки, $\varphi$ – угол дифракции, $k$ – порядок спектра (максимума). Если линейная координата k-го максимума равна $x_k$, а расстояние от решетки до экрана равно $L$, то

$$tg\varphi = \frac{x_k}{L}\,. \qquad (2)$$

Обычно углы дифракции малы, поэтому синус можно приближенно заменить тангенсом, а тогда

$$\frac{d \cdot x_k}{L} = k\lambda \,. \tag{3}$$

Решая уравнение (3) относительно периода решетки, получаем

$$d = \frac{kL\lambda}{x_k} \,. \tag{4}$$

*Задание*. Получить четкую дифракционную картину. Измерить расстояние от решетки до экрана и линейные координаты 1, 2, 3-го главных максимумов интенсивности. Определить постоянную решетки для каждого измерения. Найти среднее значение постоянной решетки и абсолютную и относительную ошибки округления.

*Задача* 1. На дифракционную решетку длиной $l = 15\,мм$, содержащую $N = 3000$ штрихов, нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550\,нм$. Определить: 1) число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; 2) угол, соответствующий последнему максимуму.

*Задача* 2. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0{,}5\,мкм$. На экран, находящийся от решетки на расстоянии $L = 1\,м$, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый максимум наблюдается на расстоянии $l = 15\,см$ от центрального. Определить число штрихов на 1 см дифракционной решетки.

# Лабораторная работа № 15 (О8)
# ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ НА ПРЕПЯТСТВИИ

Цель работы: определение размеров мелких частиц.

## План подготовки к лабораторной работе

1. Опишите явление дифракции.
2. Каково условие наблюдения дифракции?
3. Суть метода зон Френеля и его применение к расчету интенсивности света при дифракции от круглого отверстия и круглого диска.
4. Почему дифракционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых колец?
5. Вывести формулу для определения диаметра частицы.

## Описание установки и метода измерений

В данной работе изучается классический дифракционный эффект – дифракция света на мелких частицах и показывается, как при помощи этого явления можно определить размеры частиц. Свет от лазера попадает на две стеклянные пластинки, между которыми расположены очень мелкие круглые одинаковые частицы. На экране наблюдается система концентрических темных и светлых дифракционных колец, окружающих светлый круг. Общий ход распределения интенсивности света в дифракционной картине будет таким же, как и для круглого отверстия. Качественно дифракционную картину можно объяснить, используя метод зон Френеля, количественный же расчет приводит к бесселевым функциям, и угловой радиус темных колец определяется приближенно соотношением

$$\sin\varphi = \frac{0{,}61 + 0{,}5\cdot(m-1)}{R}\lambda\,, \tag{1}$$

где $m$ – номер кольца, $R$ – радиус частицы, $\lambda$ – длина волны лазерного излучения (в данной работе $\lambda = 0{,}6328 мкм$). Угловое положение дифракционных минимумов, очевидно, связано с линейными координатами минимумов по формуле

$$\sin\varphi_m = \frac{D_m}{2L}\,, \tag{2}$$

где $D_m$ – диаметр соответствующего кольца на экране, $L$ – расстояние от пластинок до экрана.

Подставляя (2) в (1) и выражая затем $R$, получаем

$$R = \frac{(0{,}61 + 0{,}5 \cdot (m-1))2L\lambda}{D_m}. \qquad (3)$$

*Задание.*

Получить четкую дифракционную картину от круглых частиц на экране. Измерить диаметры трех темных дифракционных колец и расстояние от пластинок до экрана. Вычислить радиусы частиц, на которых происходит дифракция. Определить среднее значение радиуса частицы и найти абсолютную и относительную погрешность.

*Задача* 1. Дифракция наблюдается на расстоянии 1 м от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 0{,}5\,мкм$). Посередине между источником света и экраном находится диафрагма с круглым отверстием. Определите радиус отверстия, при котором центр дифракционных колец на экране является наиболее темным.

*Задача* 2. Сферическая волна, распространяющаяся из точечного источника монохроматического света ($\lambda = 0{,}6\,мкм$), встречает на своем пути экран с круглым отверстием радиусом $r = 0{,}4\,мм$. Расстояние от источника до экрана равно 1 м. Определите расстояние от отверстия до точки за экраном, лежащей на линии, соединяющей источник с центром отверстия, где наблюдается максимум освещенности.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. – М.: Наука, 1982.

Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2001.

# СОДЕРЖАНИЕ

Учебное издание

**Шавлюгин Александр Иванович**
**Семкин Сергей Викторович**

# Общая физика

Лабораторный практикум

Редактор С.Г. Масленникова
Компьютерная верстка А.С. Головченко

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать 30.04.2003. Формат 60×84/16.
Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,8.
Тираж 200 экз. Заказ

---

Издательство Владивостокского государственного университета
экономики и сервиса
690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41
Отпечатано в типографии ВГУЭС
690600, Владивосток, ул. Державина, 57