МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДАРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Кафедра технической механики и физики

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (Заочная форма обучения)

Механика. Колебания. Молекулярная физика.
Постоянный ток. Электромагнетизм

Зерноград, 2025

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В.,
Гуриненко Л.А.
© Азово-Черноморский
инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ,
2025

Об издании – 1,2
Оглавление

УДК 53.08(075)

Издается по решению методической комиссии
по специальностям среднего профессионального образования
социально-экономического и технического профиля
Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зерограде.

Рецензент:
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой ЭиТС МТТС **В.А. Оберемок**

Леонтьев Н.Г. Лабораторный практикум по физике для обучающихся по программам высшего образования**.** (Заочная форма обучения) [Электронный ресурс]: Механика. Колебания. Молекулярная физика. Постоянный ток. Электромагнетизм/ Н.Г. Леонтьев, А.В. Белоусов, Л.А. Гуриненко. - Электрон. дан. - Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025. – 97 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебное пособие «Лабораторный практикум по физике для обучающихся по программам высшего образования**.** (Заочная форма обучения) [Электронный ресурс]: Механика. Колебания. Молекулярная физика. Постоянный ток. Электромагнетизм» предназначено для обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) 13.03.01, 13.03.02, 19.03.02, 20.03.01, 21.03.02, 23.03.01, 23.03.03, 35.03.04, 35.03.06, 23.05.01.

Рекомендовано к изданию Методическим советом Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ Протокол № 9 от 24.04.2025 г.

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В.,
Гуриненко Л.А.
© Азово-Черноморский
инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ,
2025

Оглавление

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ....4
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ....4
1.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ....5
ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ....5
1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ....7
1.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ....8
РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ....8
1.5. ОКРУГЛЕНИЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА....9
ИЗМЕРЕНИЙ. ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ....9
1.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1....11
2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ....13
3. ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ....13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11....18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12....21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14....23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21....26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22....30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24....34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31....38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35....42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36....47
ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН....50
1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ....54
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ....54
1.2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ....55
1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, МОЩНОСТИ....57
1.4. РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ....58
1.5. ПОГРЕШНОСТИ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ....59
ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ....59
1.6. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ....60
1.7.УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ....61
1.8. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ....62
2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ....63
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42....64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43....67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44....70
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47....74
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51....77
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 53....80
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 56....85
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 57....90
ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН....95

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Каждая из лабораторных работ физического практикума посвящена изучению определенного физического явления. При этом необходимо производить измерения величин, характеризующих данное явление.

Под измерением понимается сравнение измеряемой величины с величиной, принятой за единицу измерения.

Измерения разделяют на прямые и косвенные.

При прямом измерении определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно, при помощи прибора, проградуированного в соответствующих единицах. К ним относятся, например, измерения длины линейкой или штангенциркулем; измерение массы на рычажных весах с помощью разновесов; измерение промежутков времени при помощи часов и т.п.

При косвенном измерении величина определяется (вычисляется) с помощью математических операций над результатами прямых измерений других величин, которые связаны с искомой величиной некоторой функциональной зависимостью. Примером косвенных измерений могут служить определение скорости равномерного движения по измерениям длины пройденного пути и промежутка времени; определение плотности тела путем измерения массы и объема тела и т.п.

При измерениях любой физической величины обычно приходится выполнять операции отсчета показаний приборов, определение искомой величины из результатов измерений и оценку погрешностей измерений.

Необходимость последней операции обусловлена тем, что при измерениях мы никогда не получаем истинного значения искомой физической величины, а лишь ее приближенное значение. Это объясняется как ограниченной возможностью точности измерения, определяемой точностью прибора, так и природой самих измеряемых объектов.

Поэтому повторные измерения одной и той же величины дают результаты, несколько отличающиеся друг от друга даже тогда, когда они производятся одним и тем же лицом, одним и тем же способом, посредством одних и тех же приборов. Следовательно, любые измерения всегда производятся с некоторыми погрешностями.

Погрешности, в зависимости от причин, которыми они вызваны, подразделяются на систематические и случайные. Существуют еще промахи, вызванные неисправностью прибора или небрежностью экспериментатора. Как правило, промахи обнаруживаются и устраняются путем повторения опытов или исключением из рассмотрения результатов, содержащих промахи.

Величина и знак систематических погрешностей не изменяются при повторении измерений в неизменных условиях. Эти погрешности связаны с несовершенством методов измерения, пренебрежением постоянно действующими внешними факторами или округлением численных значений констант или табличных величин до какого-либо приближенного значения (например,

полагая π=3,14 вместо π= 3,14159.). Систематические погрешности в большинстве случаев могут быть исключены путем введения поправок.

Знак и величина случайных погрешностей изменяются при повторении измерений в неизменных условиях. Исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно. Однако с помощью теории вероятности можно оценить значение этих погрешностей, и, увеличивая число измерений, можно уменьшить их величину.

1.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пусть произведено n прямых измерений некоторой физической величины. Обозначим результаты отдельных измерений через a_1, a_2,...a_n.

В качестве наилучшей оценки ИСТИННОГО значения физической величины мы принимаем ее СРЕДНЕЕ значение

$$a_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i \,. \qquad /1/$$

АБСОЛЮТНАЯ погрешность отдельного измерения - это разность между истинным значением искомой величины $a_{ср}$ и значением a_i, полученным в результате данного измерения $\Delta a_1 = a_1 - a_{ср}$, $\Delta a_2 = a_2 - a_{ср} \ldots \Delta a_n = a_n - a_{ср}$. Абсолютные погрешности Δa_1, Δa_2, ... Δa_n могут принимать положительные и отрицательные значения.

Случайные погрешности обладают следующими свойствами:

1.При большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто.

2.Большие по абсолютной величине погрешности встречаются реже, чем малые.

Следовательно они подчиняются статистическим закономерностям и с помощью теории вероятностей, можно оценить их величину.

Распределение ошибок, полученное при большом количестве опытов, носит название "нормального распределения" Гаусса.

Мерой точности измерений служит СРЕДНЕКВАДРАТИЧНАЯ ОШИБКА или СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ, определяемая для большого числа измерений ($n \to \infty$) по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_{ср})^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2} \,. \qquad /2/$$

Стандартное отклонение $\sigma_{ср}$ имеет следующий смысл: в 68% всех случаев, т.е. с вероятностью 68%, результаты измерений отличаются от истинного среднего значения не более чем на величину $\pm\sigma_{ср}$. Иными словами с вероятностью, равной 68%, ошибка лежит в пределах интервала [$-\sigma_{ср}$, $+\sigma_{ср}$].

Если в качестве интервала ошибок взять $\pm 2\sigma_{ср}$, то вероятность того, что ошибка лежит в этом интервале, равна 95%. Для интервала $\pm 3\sigma_{ср}$ эта вероятность равна 99,8%.

Интервал $\left[a_{-\text{р}} - \Delta a, a_{c\text{р}} + \Delta a\right]$, в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью, называется «доверительным интервалом». Вероятность того, что истинное значение измеряемой величины a_i попадает в данный доверительный интервал, называется «надежностью результата» α. Она выражается или в долях единицы, или в процентах.

Из сказанного выше ясно, что величина погрешности Δa зависит от величины задаваемой надежности α. Чем больше величина доверительного интервала $(a_{c\text{р}} - \Delta a, a_{c\text{р}} + \Delta a)$, т.е. чем больше задаваемая погрешность, тем с большей надежностью результаты отдельных измерений попадают в заданный интервал. Так, выбирая $\Delta a = \pm\sigma$, получаем надежность α=0,68, при $\Delta a = \pm 2\sigma$ надежность $\alpha = 0{,}95$, и при $\Delta a = \pm 3\sigma$ имеем α=0,997. Таким образом, величина абсолютной погрешности результата $\Delta a_{c\text{р}}$ может быть представлена в виде

$$\Delta a_{c\text{р}} = k_\alpha \sigma_{c\text{р}}, \qquad /3/$$

где k_α - коэффициент Гаусса, зависящий от надежности результата: k_α=1 при α=0,68, k_α=2 при α=0,95, k_α=3 при α=0,998. Обычно берут k_α=2, т.е. в качестве абсолютной погрешности результата принято указывать величину $\Delta a_{c\text{р}} = 2\sigma$ с надежностью 95%.

При ограниченном числе измерений ($n \le 10$), что имеет место в условиях реального физического эксперимента, формула /3/ является лишь приближенной оценкой стандартной ошибки, так как в этом случае распределение Гаусса не выполняется. В данном случае справедливо распределение Стьюдента, которое предложено английским математиком Госсетом.

Чтобы получить оценки границ доверительного интервала для a при малом числе измерений n, вместо k_α вводится коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$, зависящий не только от надежности α, но и от числа измерений n. Тогда величина абсолютной погрешности при заданной надежности α выражается формулой

$$\Delta a_{c\text{р}} = t_{\alpha n} \sigma_{c\text{р}}. \qquad /4/$$

Значения коэффициента Стьюдента при различных n для заданной надежности α приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты Стьюдента

n\α	0,68	0,80	0,90	0,95
2	2,0	3,1	6,3	12,7
3	1,3	1,9	2,9	4,3
4	1,3	1,6	2,4	3,2
5	1,2	1,5	2,1	2,8
6	1,2	1,5	2,0	2,6
7	1,1	1,4	1,9	2,4
8	1,1	1,4	1,9	2,4
9	1,1	1,4	1,9	2,3
10	1,1	1,4	1,8	2,3

Определив из таблицы 1 коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ при заданных числе измерений n и надежности α и рассчитав по формуле /2/ среднеквадратичную ошибку, можно рассчитать величину погрешности результата $\Delta a_{c\text{р}}$ по формуле /4/ с надежностью α.

При большом числе измерений (практически при n>20) распределение Стьюдента переходит в распределение Гаусса.

Абсолютная погрешность $\Delta a_{c\text{р}}$ не в полной мере характеризует точность измерений. Для оценки точности измерений вводится еще одна характеристика – «относительная погрешность», равная отношению абсолютной погрешности к измеряемой величине выражаемая обычно в процентах

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a_{c\,p}}{\epsilon_{-\,p}}\%. \qquad /5/$$

Кроме случайных погрешностей необходимо учитывать и абсолютную погрешность измерительного прибора. Погрешность прибора является систематической.

Абсолютная погрешность прибора определяется его классом точности и указывается в паспорте или на шкале прибора. Если класс точности прибора не указан, то погрешность прибора принимается равной половине цены наименьшего деления шкалы

$$\delta = \frac{a_{\max}}{2n}, \qquad /6/$$

где $a_{\max}$ - максимальная измеряемая прибором величина, а n - число делений прибора. С учетом абсолютной погрешности прибора среднее значение полной абсолютной погрешности результата измерений вычисляется по формуле

$$\Delta a_{c\text{р}} = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta a_{n\text{р}})^2} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{c\text{р}})^2 + (k_\alpha \frac{\delta}{3})^3}, \qquad /7/$$

где $k_\alpha = t_{\alpha,n}(n \to \infty)$.

Определив среднее значение измеряемой величины и ее абсолютную погрешность, результат измерений необходимо записать в виде

$$a = a_{c\text{р}} \pm \Delta a_{c\text{р}},\ \varepsilon = \quad \%, \qquad /8/$$

определив при этом среднюю относительную погрешность результата по формуле /5/.

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В тех случаях, когда интересующая физическая величина определяется не прямым измерением, а косвенным путем, т.е. путем вычисления по формуле, ее погрешность определяется из рассчитанных погрешностей величин, входящих в формулу искомой величины и определяемых прямыми измерениями.

Пусть искомая величина X определяется как некоторая функция величин $a,b,c...$, которые измеряются прямым путем $X = f(a,b,c...)$. Можно показать, что

$$\Delta X = \sqrt{(\frac{\partial X}{\partial a})^2 \Delta a^2 + (\frac{\partial X}{\partial b})^2 \Delta b^2 + ...}, \qquad /9/$$

где $\frac{\partial X}{\partial a}, \frac{\partial X}{\partial b}, \ldots$ - частные производные функции X. Относительная погрешность по определению равна $\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X}$. /10/

Так как $\frac{1}{X}\frac{\partial X}{\partial a} = \frac{\partial(\ln X)}{\partial a}, \frac{1}{X}\frac{\partial X}{\partial b} = \frac{\partial(\ln X)}{\partial b}$, /11/

то $\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\partial \ln X}{\partial a})^2 \Delta a^2 + (\frac{\partial \ln X}{\partial b})^2 \Delta b^2 + \ldots}$. /12/

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ:

а) погрешность суммы двух величин $X = a + b$:

$$\Delta X = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}, .. \frac{\Delta X}{X} = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a + b}; \quad /13/$$

б) погрешность разности двух величин $X = a - b$:

$$\Delta X = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}, .. \frac{\Delta X}{X} = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a - b}; \quad /14/$$

в) погрешность произведения двух величин $X = a * b$:

$$\Delta X = \sqrt{b^2 \Delta a^2 + a^2 \Delta b^2}, .. \frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\Delta a}{a})^2 + (\frac{\Delta b}{b})^2}; \quad /15/$$

г) погрешность отношения двух величин $X = \frac{a}{b}$:

$$\Delta X = \sqrt{\frac{1}{b^2}\Delta a^2 + \frac{1}{a^2}\Delta b^2}, .. \frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\Delta a}{a})^2 + (\frac{\Delta b}{b})^2}. \quad /16/$$

1.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1.4.1. ДЛЯ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.Данные каждого измерения записать в таблицу результатов наблюдений.

2. Вычислить среднее значение из n измерений $a_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i$. /17/

3. Проверить, нет ли промахов в серии измерений, т.е. значений, резко отличающихся от остальных измерений. Исключить эти результаты.

4. Найти погрешность отдельных измерений: $\Delta a_i = a_i - a_{ср}$.

5. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений $(\Delta a_i)^2$.

6. Определить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений $\sigma_{ср} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2}$. /18/

7. Задать значение надежности α.

8. Определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для заданной преподавателем надежности α и числа произведенных измерений n (из таблицы 1).

9. Найти границы доверительного интервала, т.е. погрешность результата измерений: $\Delta a_{ср} = t_{\alpha n}\sigma_{ср}$. /19/

10. Если величина случайной погрешности $\Delta a_{ср}$ окажется сравнимой с погрешностью прибора, то в качестве границы доверительного интервала взять величину $\Delta a_{ср} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{ср})^2 + (k_\alpha \frac{\delta}{3})^2}$, /20/

где $k_\alpha = t_{\alpha,n}(n \to \infty)$, а δ - величина погрешности прибора.

11. Записать окончательный результат в виде

$$a = a_{ср} \pm \Delta a_{ср},\ \varepsilon = \quad \%. \qquad /21/$$

12. Оценить относительную погрешность результата серии измерений по формуле /8/ и записать $\varepsilon = \quad \%$.

1.4.2. ДЛЯ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для каждой измеряемой величины, входящей в исходную формулу искомой косвенно определяемой физической величины, произвести обработку по п.1.4.1. При этом для всех измеряемых величин задать одно и то же значение надежности α.

2. По средним значениям измеренных величин, в соответствии с формулой для $X = f(a,b,c...)$, рассчитать искомую величину.

3. Найти выражения для абсолютной ΔX и относительной ε_x погрешностей искомой косвенно определяемой величины X по формулам /9/,/12/, исходя из формулы для расчета искомой величины X и с учетом формул /13/,/14/,/15/, /16/ и т.п. Произвести вычисления ΔX и ε_x по полученным формулам.

В большинстве случаев удобно сначала исходную формулу прологарифмировать и определить относительную погрешность искомой величины по формуле /12/. Затем, зная относительную погрешность, определить абсолютную погрешность по формуле $\Delta X = \varepsilon_x X_{ср}$. /22/

Если косвенные измерения величины производятся многократно и для каждого измерения рассчитывается значение искомой величины, то среднее значение результата серии косвенных измерений и его погрешности могут быть рассчитаны по формулам для расчетов погрешностей при прямых измерениях в их варианте для случая малой величины погрешности прибора (формулы /5/, /7/).

1.5. ОКРУГЛЕНИЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ. ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Все цифры, приводимые в записи результата эксперимента, должны быть обоснованы, поскольку количество указанных в числе значащих разрядов связано с точностью определения данного числа. Принято считать, что если в числе указано некоторое количество разрядов (значащих цифр), то за абсолютную погрешность определения этого числа принимается половина зна-

чащего разряда после последнего указанного. Например: Указано число 3,14. Тогда за абсолютную погрешность определения этого числа принимается величина 0,005. Если берется приближенное значение некоторой табличной величины, взятое из справочника, где оно округлено до необходимого количества значащих цифр, и отброшенная при округлении цифра не известна, то за абсолютную погрешность берется половина значащего разряда после последнего указанного. Например, в справочнике дана плотность некоторого вещества ρ=0,96*10^3 кг/м^3. Тогда $\Delta\rho$=0,005*10^3 кг/м^3. Если отброшенная значащая цифра известна, то в качестве погрешности берется ее значение. Например, если π = 3,14, то $\Delta\pi$ = 0,002.

Значащие цифры, приводимые в исходных данных, определяются точностью приборов, использованных при измерениях. При этом необходимо стремиться указать измеряемую величину с максимальной точностью, которую допускает используемый для измерения прибор.

При обработке результатов измерений с использованием вычислительной техники, мы, как правило, получаем результат с излишним количеством значащих цифр. Высокая точность вычислений не может привести к увеличению точности результата измерений. Поэтому при выполнении измерений, заполнении таблиц результатов наблюдений и указании результатов вычислений следует руководствоваться следующими правилами:

1. За абсолютную погрешность определения числа, заданного заранее, принимается половина значащего разряда после последнего указанного.

2. Точность табличных данных выбирается такой же, как и точность экспериментальных данных.

3. В одной графе таблицы результаты должны быть указаны с точностью до одного общего низшего разряда (количество значащих цифр в одном столбце должно быть одинаково). Если у некоторых значений измеренной величины цифры в последних разрядах нули, они также указываются.

4. При сложении (вычитании) результат округляется до общего низшего разряда, имеющегося в исходных данных. В этом случае абсолютная погрешность результата совпадает с наибольшей абсолютной погрешностью, с которой указаны исходные данные.

5. При умножении (делении, возведении в степень, логарифмировании и т.п.) результат округляется до того минимального количества значащих цифр, которое имеется у исходных данных. В этом случае относительная погрешность результата совпадает с наибольшей относительной погрешностью, с которой указаны исходные данные.

6. Абсолютная и относительная погрешности измерений округляется до одной (первой) значащей (ненулевой) цифры.

7. В среднем значении результата измерений последняя значащая цифра оставляется в том же десятичном разряде, что и значащая цифра абсолютной погрешности. При этом общий множитель, указывающий порядок величины, выносится за скобки. В большинстве случаев при выполнении лабораторных работ точность измерений можно считать правильной, если данные указаны с тремя значащими цифрами.

Примеры:

Неправильно:	Правильно:
1. (47,243 ± 0,0472) В	(47,24 ± 0,05) В
2. (12,534 ± 0,63) А	(12,5 ± 0,6) А
3. (85,26 ± 5,754) с	(85 ± 6) с
4. (1285,6 ± 354,75) мкА	(13 ± 4) 10^8А
5. (15,035 ± 0,318) г	(15,0 ± 0,3) г

Напомним правила округления и определения числа значащих цифр.

1. Если в числе первая отбрасываемая цифра больше или равна 5, то последняя оставляемая увеличивается на единицу.

2. Если в числе первая отбрасываемая цифра меньше 5, то последняя оставляемая не изменяется.

3. Ноль является значащей цифрой, если он стоит в середине или справа в числе.

1.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМА ЦИЛИНДРА

Цель работы: измерить объем цилиндра с помощью штангенциркуля и микрометра и рассчитать погрешности при прямых и косвенных измерениях.

Приборы и материалы: штангенциркуль, микрометр, цилиндр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Объем цилиндра рассчитывается по формуле $$V = \frac{\pi D^2 h}{4}, \qquad /23/$$

где D - диаметр цилиндра, h - высота, измеряемые микрометром или штангенциркулем (10 раз).

Для вывода формулы относительной погрешности ε_v прологарифмируем выражение /23/ $$\ln V = \ln\pi + 2\ln D + \ln h - \ln 4. \qquad /24/$$

Частные производные: $$\frac{\partial(\ln V)}{\partial \pi} = \frac{1}{\pi}, \quad \frac{\partial(\ln V)}{\partial D} = 2\frac{1}{D}, \quad \frac{\partial(\ln V)}{\partial h} = \frac{1}{h}. \qquad /25/$$

Здесь величину π считаем приближенным числом.

Согласно формуле /12/ получим

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{(\frac{\Delta\pi}{\pi})^2 + 4(\frac{\Delta D}{D})^2 + (\frac{\Delta h}{h})^2}. \qquad /26/$$

Формулу для определения абсолютной погрешности получим по формуле /22/: $$\Delta V_{ср} = \varepsilon_v * V_{ср}. \qquad /27/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Результаты каждого измерения записать в таблицу результатов наблюдений (таблица 2).
2. Вычислить средние значения D и h из n измерений по формуле /17/:

$$a_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i \,. \qquad /28/$$

Таблица 2 ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

N	D,мм	ΔD,мм	ΔD^2,мм^2	h,мм	Δh,мм	Δh^2,мм^2
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

3. Проверить, нет ли промахов в серии измерений, т.е. значений, резко отличающихся от остальных измерений. Исключить эти результаты.

4. Найти погрешности отдельных измерений D и h по формуле $\Delta a_i = a_i - a_{cp}$ и занести в таблицу 2.

5. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений D и h по формуле $(\Delta a_i)^2$ и занести в таблицу 2.

6. Определить среднеквадратичные погрешности измерения D и h по формуле /21/:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2} \,. \qquad /29/$$

7. Выяснить у преподавателя значение надежности α.

8. Определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для заданной преподавателем надежности α и числа произведенных измерений n (из таблицы 1).

9. Найти границы доверительных интервалов D и h по формуле /19/.

$$\Delta a_{cp} = t_{\alpha n}\sigma_{cp}. \qquad /30/$$

10. Вычислить величины случайных погрешностей D и h по формуле /20/:

$$\Delta a_{cp} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{cp})^2 + (k_\alpha \frac{\delta}{3})^3} \,. \qquad /31/$$

11. Записать полученные для D и h результаты в виде

$$a = a_{cp} \pm \Delta a_{cp},\ \varepsilon = \quad \%. \qquad /32/$$

12. Используя D_{cp}, h_{cp}, вычислить значения $V_{cp}, \varepsilon_V, \Delta V$ по формулам /23/,/26/,/27/ и записать окончательные результаты в виде $V = V_{cp} \pm \Delta V_{cp}$, $\varepsilon_V =$ %.

Приведенное здесь описание можно считать образцом для подготовки к выполнению лабораторных работ.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждый студент, выполняющий лабораторный практикум по физике, ведет два журнала: журнал наблюдений и журнал отчетов. Журнал наблюдений и журнал отчетов могут быть выполнены в виде папки или тетради и должны вестись аккуратно.

В журнале наблюдений приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Расчетные формулы.
3. Таблицы результатов наблюдений.
4. Результаты вычисления искомых физических величин.
5. Конечные результаты.

В журнале отчетов приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Краткая теория с чертежом и принципиальной схемой лабораторной установки.
4. Таблица результатов наблюдений.
5. Графики, выполненные только на миллиметровой бумаге (если иное не предусмотрено в работе). Правила построения графиков см. ниже.
6. Результат и выводы.

Каждая лабораторная работа визируется преподавателем после выполнения (снятия данных) подписью в журнале наблюдений и после оформления - подписью в журнале отчетов. Отчеты без подписи в журнале наблюдений не принимаются. Журнал наблюдений и журнал отчетов студент сдает преподавателю в конце семестра.

3. ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

Графиком называется документ, изображающий функциональную зависимость одной переменной величины от другой (или нескольких других) в системе координат.

Графики позволяют:

1. Понять и наглядно представить связь физических величин.
2. Производить фактическое усреднение значений функции.
3. Производить вычисление значений функции при различных значениях аргумента.
4. Производить вычисление значений тангенса угла наклона графика к оси абсцисс (скорости изменения функции при изменении аргумента).
5. Производить вычисление значений отрезков, отсекаемых на осях координат (значения функции при нулевом значении аргумента и значения аргумента при нулевом значении функции, имеющих самостоятельный физический смысл).
6. Производить вычисление площади под графиком функции и др.

Графики выполняются после получения экспериментальных данных с соблюдением следующих правил:

1. Графики выполняются на миллиметровой бумаге (или на специальной бумаге с логарифмическим или полулогарифмическим масштабом).

2. График должен иметь размеры 10...15 см по каждой из осей. Поэтому лист миллиметровой бумаги должен иметь размеры 12...17 см по каждой из осей.

3. Независимую переменную (аргумент) следует откладывать на горизонтальной оси (оси абсцисс), а связанную с ней функцию - на вертикальной оси (оси ординат).

4. Направление возрастания аргумента выбирается на оси абсцисс слева направо, а функции - на оси ординат снизу вверх. Оси координат заканчиваются стрелками.

5. Точка пересечения осей координат выбирается с отступом 1-1.5 см вверх и вправо от левого нижнего угла листа (рис.1).

При наличии положительной и отрицательной ветвей графика точку пересечения осей координат удобно смещать к центру листа. При этом на графике будут построены обе ветви одновременно (рис.2).

6. Не требуется, чтобы точка пересечения осей координат обязательно совпадала с началом координат. Целесообразно, чтобы точка пересечения осей координат соответствовала или была близка к минимальным значениям аргумента и функции (рис.3,4).

7. Масштаб выбирается так, чтобы у концов осей стояли значения аргумента и функции, немного превышающие те, которые наблюдались в лабораторной работе. Перед выбором масштаба необходимо определить диапазоны значений аргумента и функции. Каждый из этих диапазонов разбивается на 5...15 частей из соображений удобства. Одна такая часть выбирается в качестве единичного масштабного отрезка, соответствующего 1 см на оси координат. В результате выбирается один из следующих наиболее удобных и употребляемых масштабов: 1:10, $1:2{,}5*10^n$, $1:5*10^n$, где n=0, 1, 2, и т.д. Масштабы $1:3*10^n$, $1:7*10^n$ и т.п. неудобны и неприемлемы. При выполнении п.п. 6,7 график занимает все поле чертежа и нагляден. Его угол наклона к оси абсцисс составляет $30°..60^o$, так что точность определения абсциссы и ординаты близка.

8. Если обе или одна из величин изменяются в большем интервале (в пределах нескольких порядков), целесообразно применять логарифмический или полулогарифмический масштабы.

9. Масштабные отрезки отмечаются штрихами на осях координат.

10. Значения величин масштаба осей наносятся за пределами квадранта, в котором находится график (обычно ниже оси абсцисс и левее оси ординат). Таких значений на каждой оси должно быть не менее трех и не более пяти...семи через равные интервалы. Недопустимо вместо чисел, обозначающих масштаб, наносить значения величин, взятых из таблицы результатов.

11. Буквенное обозначение функции и аргумента и через запятую - кратный множитель и обозначение единиц измерения наносятся за пределами квадранта, в котором находится график, рядом со стрелками. Обозначение аргумента и функции допускается писать словами (рис.3).

12.При построении на одном графике двух различных функциональных зависимостей ось ординат имеет две масштабные шкалы слева и справа. Тогда обозначения величин наносятся с соответствующей стороны.

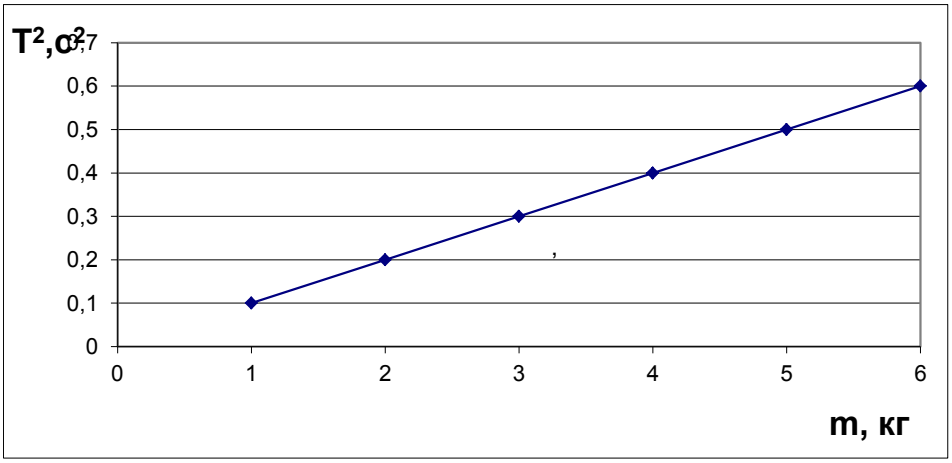


Рис.1 - График зависимости квадрата периода T^2 пружинного маятника от массы тела m

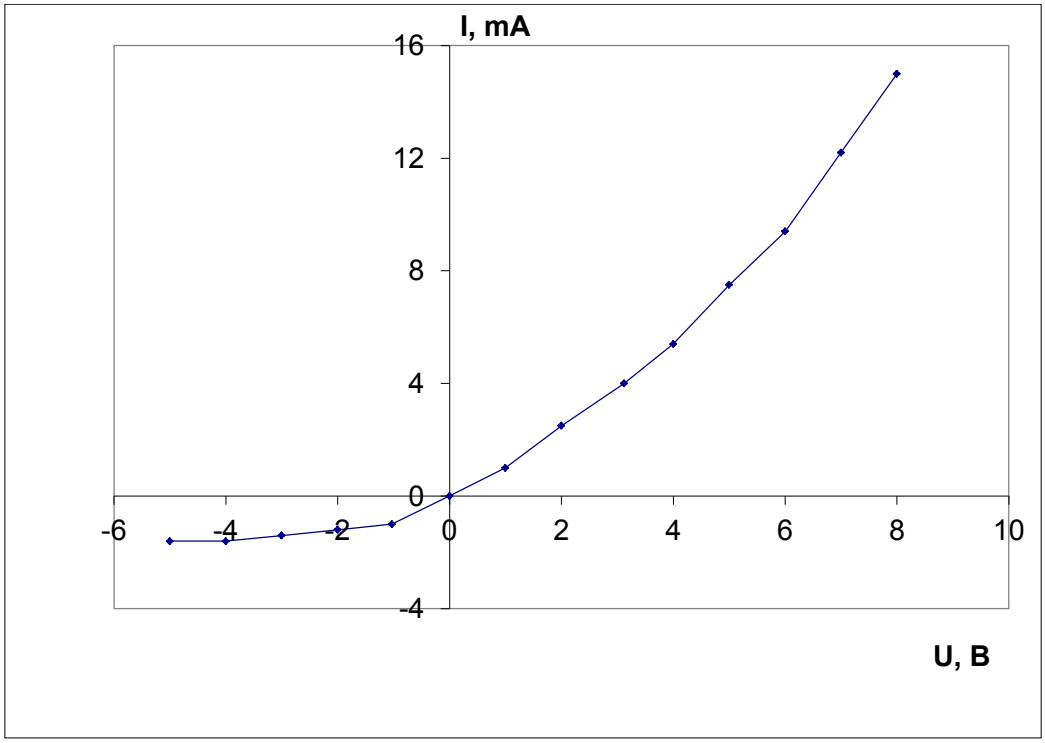


Рис.2 - Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

13. Для построения прямолинейного графика необходимо не менее 3-х (лучше 5...7 и более) экспериментальных точек, а для криволинейного - 10...20 точек в зависимости от сложности.

14. На одном листе можно (и целесообразно) строить несколько вариантов одной функциональной зависимости, соответствующих различным случаям. Тогда точки на различных графиках обозначают разными символами (*, +, о и т.д.) или разным цветом (рис.4). Обозначения точек, соответствующих каждому из случаев, указывают на свободном поле графика.

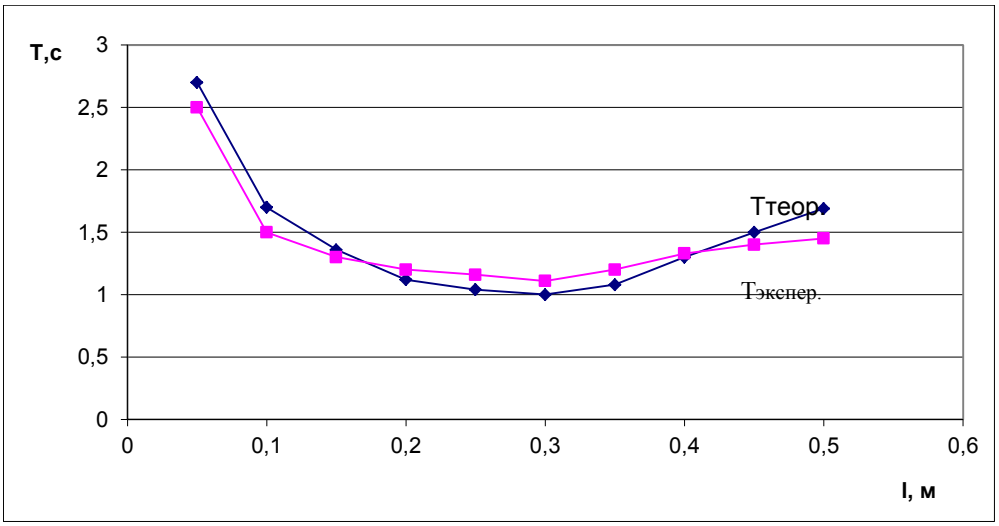


Рис.3. График зависимости периода колебаний T физического маятника от расстояния "центр масс - точка подвеса"

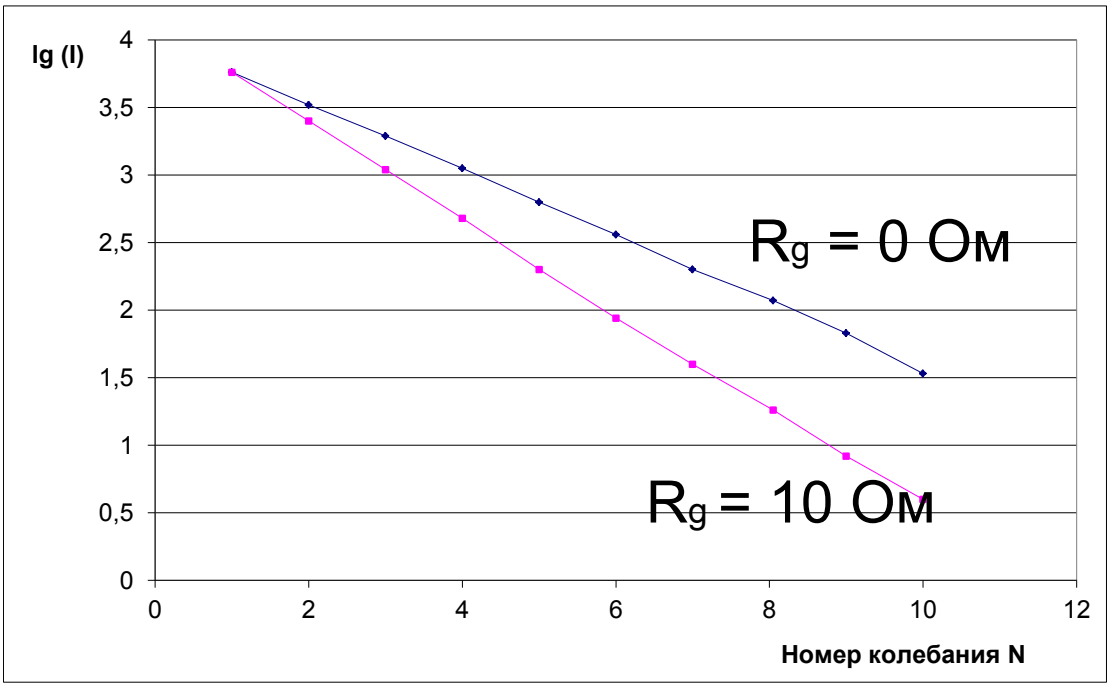


Рис.4. График зависимости натурального логарифма амплитуды затухающих колебаний 1пI от номера колебания N

15.Величину ошибки эксперимента указывают либо соответствующим размером экспериментальной точки, либо отрезками, параллельными осям координат, с длиной, равной величине погрешности. Если погрешности во всех точках одинаковы, достаточно указать такие отрезки для одной точки.

16. После нанесения всех экспериментальных точек график аппроксимируется прямой или, как правило, гладкой кривой. При этом в первом приближении количество точек с одной стороны линии примерно равно их количеству с другой стороны. Значительное удаление одной из точек от графика

либо указывает на неточность измерений, либо должно быть подтверждено проверкой и объяснено.

Более точно график строится с помощью метода наименьших квадратов, согласно которому сумма квадратов расстояний всех точек от графика должна быть минимальной;

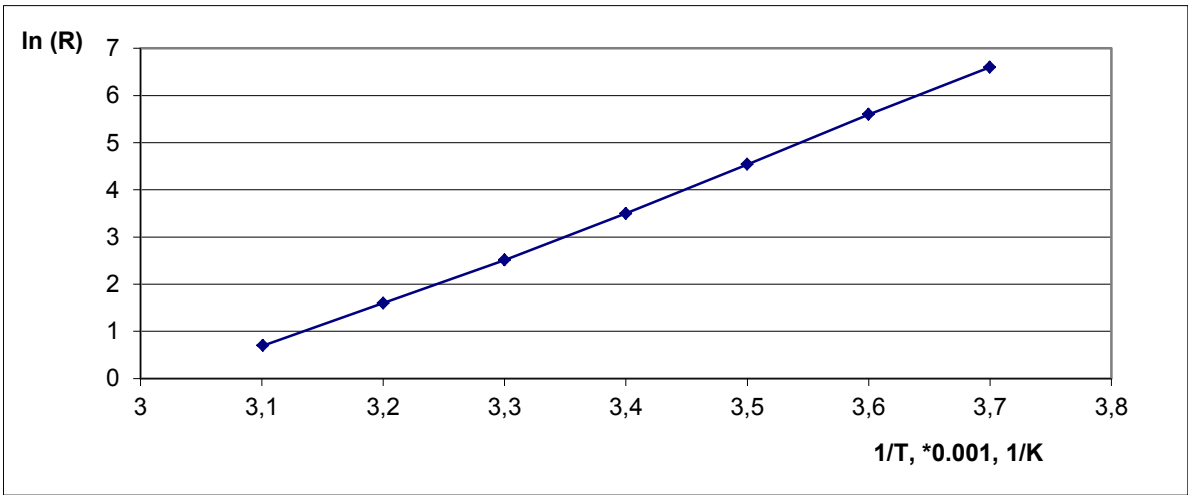


Рис. 5 - График зависимости натурального логарифма значения сопротивления полупроводника lnR от величины обратной абсолютной температуры 1/T.

17. Линия графика проводится сплошной линией.

18. Если в некоторой области две различные линии графика совпадают, вычерчивается одна. При совпадении линии функциональной зависимости с осью координат вычерчивается линия функциональной зависимости.

19. В подрисуночной подписи дается нумерация графика и поясняется изображенная функциональная зависимость, а если их несколько - условия, при которых они получены (рис.4).

20. На свободном поле графика необходимо пояснить все примененные на графике обозначения. Пересечение подписей и линий не допускается и при необходимости последние разрываются.

21. При вычислении физической величины, равной тангенсу угла наклона прямолинейного участка графика, экспериментальные точки, координаты которых подставляются в рабочую формулу, выбираются возможно более удаленными друг от друга (рис.3).

Построение графиков существенно упрощается применением электронных таблиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель – М.: Наука, 1987. – 287 с.

2. Касандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений /О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 134 с.
2. Руководство к лабораторным работам по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 535 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: проверка основного закона динамики вращательного движения и определение момента инерции маховика.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка (маятник Обербека), груз-платформа с нитью и набором дополнительных грузов, набор грузов для крестовины, штангенциркуль и линейка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Основной закон динамики вращательного движения тела с неподвижной осью вращения устанавливает прямую пропорциональную зависимость между суммарным моментом сил, приложенных к телу, и угловым ускорением ε тела:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{1}{J}\vec{M}, \qquad /1/$$

где J - момент инерции тела относительно оси вращения.

Лабораторная установка состоит из вертикальной колонны, установленной на основании. На ней закреплены два кронштейна: нижний неподвижный и верхний подвижный. На верхнем кронштейне закреплен шкив. Через шкив переброшена нить, один конец которой прикреплен к двухступенчатому шкиву маятника. На втором конце нити закреплен груз. На обратной стороне маятника закреплен тормозной электромагнит, который удерживает маятник и грузы в состоянии покоя. Подвижный кронштейн можно перемещать вдоль колонны и фиксировать его в любом положении, задавая по миллиметровой шкале высоту h падения груза. На подвижном кронштейне закреплен фотоэлектрический датчик начала отсчета времени. На неподвижном кронштейне закреплен фотоэлектрический датчик, вырабатывающий импульс конца измерения времени t и включающий тормозной электромагнит. На основании установлен блок управления и измерения времени. Маятник состоит из четырех стержней и двух шкивов различного радиуса, укрепленных на горизонтальной оси. По стержням могут перемещаться и закрепляться четыре груза одинаковой массы m_1. При помощи грузов различной массы m маятник может приводиться во вращение.

Суммарный момент силы M, действующей на маятник, складывается из момента силы упругости нити M_T:

$$M_T = rT, \qquad /2/$$

где T - сила натяжения нити, а r - радиус шкива, и момента сил трения M_{TP}, направленного противоположно. Основной закон динамики вращательного движения /1/ имеет вид: $$\varepsilon = \frac{M_T - M_{Tm}}{J}. \qquad /3/$$

Сила натяжения нити определяется из второго закона динамики поступательного движения: $$a = \frac{F}{m} = \frac{mg - T}{m}, \qquad /4/$$

где a - ускорение груза, g - ускорение свободного падения, m - масса груза. С учётом формулы /2/ получим $$M_T = rm(g - a). \qquad /5/$$

Из уравнения зависимости пути от времени для равноускоренного движения ускорение груза равно: $$a = \frac{2h}{t^2}, \qquad /6/$$

где h - расстояние, пройденное грузом из состояния покоя до удара об ограничивающую платформу за время t.

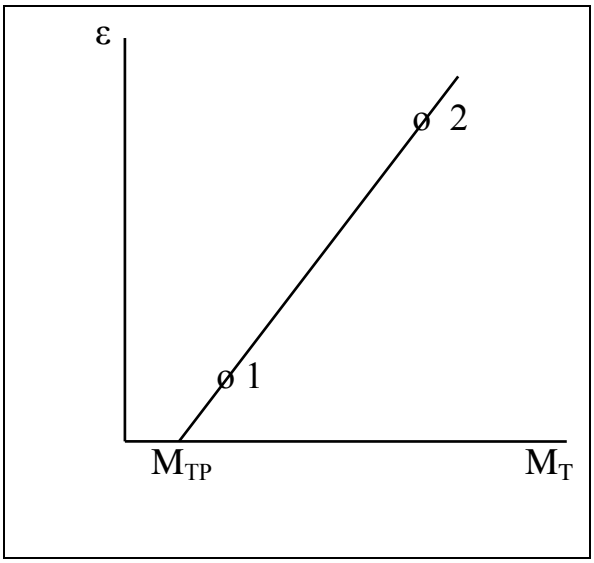


Рис.11.1

Угловое ускорение шкива определяется из соотношения $$\varepsilon = \frac{a}{r}. \qquad /7/$$

Для определения J и M_{TP} построим график зависимости $\varepsilon = f(M_T)$ (рис.11.1). Отрезок, отсекаемый прямой $\varepsilon = f(M_T)$ на оси абсцисс, есть M_{TP}, а тангенс угла наклона графика к оси абсцисс есть $\frac{1}{J}$. Поскольку формула /3/ справедлива для любых двух точек на графике (рис.11.1), J можно находить по формуле $$J = \frac{M_{T_2} - M_{T_1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \qquad /8/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА НАСТЕННОЙ УСТАНОВКЕ

1. Измерить радиус барабана r штангенциркулем.
2. Надеть петлю, которой заканчивается шнур груза-платформы, на штифт, имеющийся на барабане. Намотать на барабан шнур, вращая шкив до тех пор, пока нижний край груза не установится на нужной высоте (ее определяют с помощью прямоугольного треугольника). Зафиксировать шкив в исходном положении, нажав кнопку «тормоз» на щите управления.
3. На полу в месте падения груза поместить контактный выключатель, установив его в верхнее (отжатое) положение.
4. Установить в нулевое положение стрелку электрического секундомера.

5. Нажать кнопку «секунд». При этом включается секундомер и отключается электромагнит, удерживающий шкив. При падении груза на контактный выключатель электрическая цепь разорвется и секундомер остановится. Записать время падения груза. Повторить измерения 5-6 раз, увеличивая массу груза. Данные занести в таблицу результатов измерений.
6. Рассчитать по формулам /5/, /6/, /7/ ускорение падения груза, угловое ускорение шкива и моменты сил для каждого опыта. Построить график зависимости ε от M_T (рис .11.1).
7. Определить по графику момент сил трения и вычислить момент инерции маховика по формуле /8/, взяв для этого на прямой точки, расположенные далеко друг от друга.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

m,кг	t,c	H,м	a,м c^{-2}	ε, c^{-2}	$M_T, 10^{-2}$Н м

r= м

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом силы? Что такое плечо силы? Укажите единицы их измерения. Как определяется направление момента силы?
2. Что называют моментом инерции твердого тела? Укажите единицы его измерения? От чего зависит момент инерции твердого тела. Какие существуют методы вычисления момента инерции?
3. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите ее математическое выражение.
4. Как с помощью линейки (штангенциркуля) можно вычислить момент инерции маятника?
5. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения. В чем состоит его аналогия со вторым законом Ньютона? Выведите основное уравнение динамики вращательного движения.
6. Какие законы используются при выводе теории лабораторной работы № 11?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 4,6,16,18.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 4,5,8,9,38, 39;
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.1.4, I.2.4, I.4.1, I.4.2, I.4.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ШКИВА

Цель работы: изучение законов поступательного вращательного движения и определение момента инерции шкива.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, состоящая из шкива, секундомера и счетчика оборотов, штангенциркуль, нить с платформой; набор грузов.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

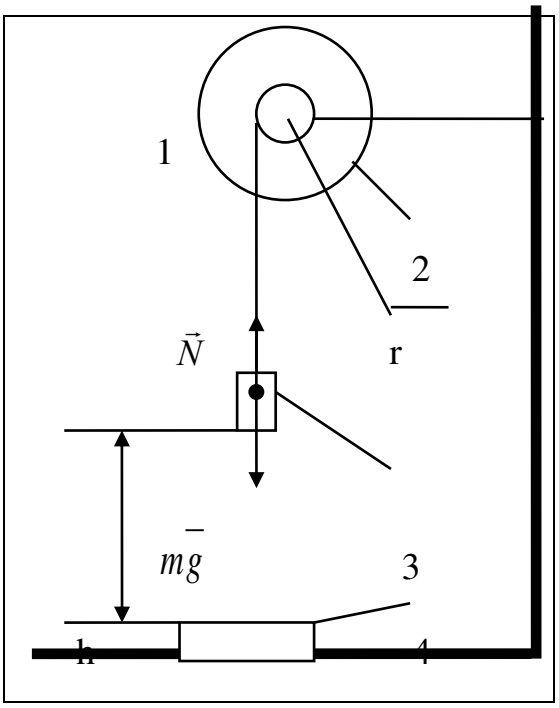


Рис.12.1

Шкив (1), момент которого необходимо определить, вращается на валу. К шкиву, на одной с ним оси, прикреплен барабан (2). На барабан намотана нить, к концу которой подвешен груз (3), поднятый над полом на высоту h.

При падении груза создается вращающий момент, под действием которого шкив будет равноускоренно вращаться.

При этом начальная потенциальная энергия груза $П = mgh$ превращается в другие виды энергии:

а) в кинетическую энергию поступательного движения самого груза

$$T_П = \frac{mv^2}{2};$$

б) в кинетическую энергию вращательного движения самого шкива $T_{ВР} = \frac{J\omega^2}{2}$

в) во внутреннюю энергию за счет преодоления сил трения $A_{ТР}$.

На основании закона сохранения энергии в момент падения груза на рычаг концевого выключателя выполняется равенство:

$$П = T_П + T_{ВР} + A_{ТР}, \qquad /1/$$

или $$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + A_0 N_1, \qquad /2/$$

где m - масса груза, v - скорость груза в момент падения на пол, J-момент инерции шкива, ω- конечная угловая скорость, A_0 работа по преодолению сил трения за один оборот, N_1 - число оборотов шкива за время падения груза. Определим работу A_0. Нить, к которой прикреплен груз, соскакивает со шкива при ударе груза о пол. Шкив некоторое время продолжает вращаться

пока его кинетическая энергия T_{BP} не будет израсходована на работу по преодолению сил трения. Если с момента прекращения движения груза до остановки шкив сделает N_2 оборотов, то энергия, затраченная на преодоление сил трения за это время равна, $A_O N_2$. По закону сохранения энергии $T_{BP} = A_O N_2$, откуда

$$A_O = \frac{J\omega^2}{2N_2}. \qquad /3/$$

Подставим значение A_O в формулу /1/ заменим $\omega = \frac{v}{r}$ и $v = \frac{2h}{t}$ где r - радиус барабана, на который наматывается нить, t - время падения груза. Выразим число оборотов груза до удара о пол через расстояние, пройденное грузом $h = 2\pi r N_1$ и вводя общее число оборотов шкива до полной остановки $N = N_1 + N_2$, получим окончательно рабочую формулу

$$J = \frac{mr\left(gt^2 - 2h\right)}{4\pi Nh}\left(2\pi rN - h\right). \qquad /4/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить радиус барабана r.

2. Подготовить установку к работе, для чего надеть петлю на свободном конце шнура на штифт барабана. Вращая шкив, намотать шнур на барабан, установить груз на определенную высоту (по заданию преподавателя). Высота груза определяется по его нижнему краю с помощью треугольника по линейке на стене. Застопорить груз на этой высоте, нажав кнопку «тормоз» на пульте управления установки. Проверить положение концевого выключателя, подняв его и аккуратно опустив (щелчка микровыключателя не должно быть). Поставить в нулевое положение стрелки секундомера.

3. Нажать кнопку «пуск». При этом включается секундомер. При опускании груза на концевой выключатель секундомер остановится, нить спадет с барабана, шкив продолжит вращаться. После остановки маховика записать число его оборотов от начала движения до остановки N и время падения груза t в таблицу результатов наблюдений 1.

4. Повторить измерения по п.п.1-3 для заданных преподавателем значений массы и заданных высот (4-5 раз).

5. Вычислить по формуле /4/ момент инерции шкива в каждом опыте. Найти его среднее значение, абсолютную (по формуле $\Delta J_{cp} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta J_i\right)^2}{n(n-1)}}$) и относительную (по формуле $\varepsilon_{CP} = \frac{\Delta J_{CP}}{J_{CP}}$) погрешности. Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя. Данные записать в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

m, кг	r, 10^{-2} м	h, м	N	t, с	J, 10^{-2}кг·м^2	$J_{ср}$,10^{-2}кг·м^2

m, кг	r, 10^{-2} м	h, м	N	t, с	J, 10^{-2}кг·м^2	$J_{ср}$,10^{-2}кг·м^2

ТАБЛИЦА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

ΔJ_i,10^{-2}кг м^2	ΔJ_i^2,10^{-2} кг м^2	$t_{\alpha,n}$	$\Delta J_{ср}$,кг м^2	$\Delta J_{ср}/J_{ср}$

7. Окончательный результат записать следующим образом:

$$J = J_{CP} \pm \Delta J_{CP} , \qquad \varepsilon = \frac{\Delta J_{cp}}{J_{cp}} 100\%$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют моментом инерции твердого тела? Каков физический смысл этой величины? Укажите единицы измерения момента инерции.
2. Запишите формулы для вычисления моментов инерции тел правильной геометрической формы.
3. Какие превращения энергии происходят в данной работе? Запишите соответствующие формулы энергии.
4. Какие законы используются в теории лабораторной работы № 12? Выведите расчетную формулу в этой работе.
5. Запишите формулу для вычисления кинетической энергии вращающегося тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 3,8,11,12,13,16,17.

2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 3,5,15,19,22,24,39,42.

3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.1, I.3.2, I.3.3, I.3.4, I.4.2, I.4.3.

4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА

Цель работы: убедиться в справедливости закона Гука для упругих деформаций и вычислить модуль Юнга для меди.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, набор грузов, индикатор для измерений малых перемещений, микрометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Если пренебречь тепловыми колебаниями атомов в, то основным отличием кристаллического состояния вещества от аморфного и газообразного является периодичность расположения атомов в нем. В любом направлении в нем можно указать межатомное расстояние r_O, через которое расположены идентичные атомы. Для решения любой задачи о свойствах твердого тела на атомном уровне достаточно рассмотреть состояние лишь одного атома, а затем учесть указанную периодичность. Зависимость потенциальной энергии U взаимодействия двух соседних атомов от расстояния между ними r представлена на рис.14.1.

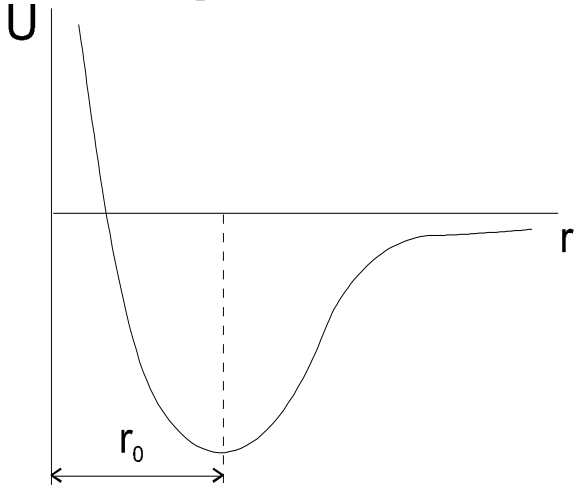


Рис.14.1

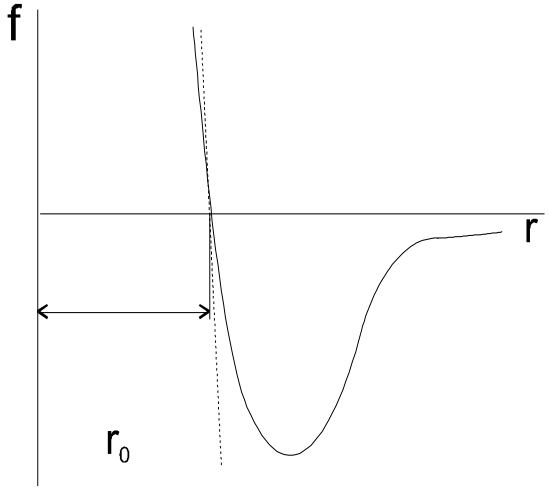


Рис.14.2

Сила f взаимодействия тел в потенциальном поле имеет вид

$$f = -(dU/dr). \qquad /1/$$

Соответствующий график зависимости $f(r)$ представлен на рис.14.2. Вблизи r_0 при малых смещениях атомов из положения равновесия $\Delta r << r_0$ можно считать что сила, действующая на атом, пропорциональна его смещению из положения равновесия $f = -\chi \Delta r$. /2/

Пользуясь этим соотношением, можно установить связь между микроскопическим параметром взаимодействия атомов χ и модулем Юнга E, фигурирующим в законе Гука: В области упругих деформаций относительная деформация прямо пропорциональна приложенному механическому напряжению $\varepsilon = \sigma / E$, /3/

где $\varepsilon = \Delta X / X$ - относительная деформация, $\sigma = F / S$ - механическое напряжение, Е - модуль продольной упругости или модуль Юнга.

С другой стороны /3/ можно представить в виде $\Delta X = -(F_{УПР} / k)$ /4/

и приходим ко второй формулировке закона Гука: абсолютная деформация прямо пропорциональна упругой силе, где $K = ES / X$ /5/

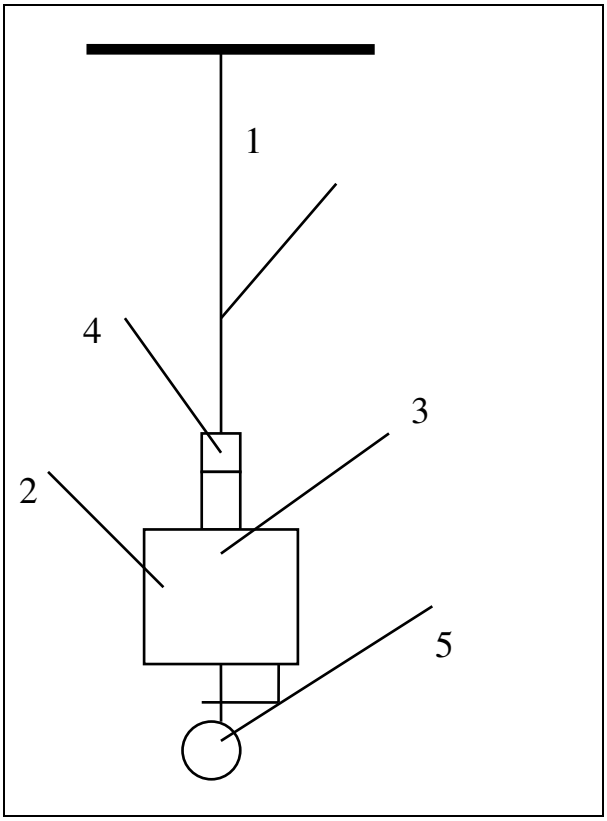


Рис.14.3

коэффициент жесткости тела. Последний зависит от модуля упругости и вида деформации. Так, для деформации изгиба пластины жесткость равна:

$$K = (AEab^3) \Big/ L^3 \qquad /6/$$

где L - длина пластины, a - её ширина, b - её толщина, A - числовой коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины и точки приложения внешней силы.

Закон Гука в форме /3/ и /4/ применим для малых упругих одноо сных деформаций.

Экспериментальная установка представлена на рис.14.3. Образец медной проволоки (1) длиной X подвешен на кронштейне. Корпус (2) измерительного блока закреплён неподвижно. В его отверстии помещается основной груз (3), центрируемый подпружиненными шариками. Дополнительные грузы (4), создающие абсолютное удлинение ΔX, помещаются на основной груз сверху. Индикатор малых перемещений (5) установлен посредине основного груза снизу с помощью штыря и планки. Перемеще-ние основного груза при удлинении проволоки вызывает поворот большой стрелки индикатора с ценой деления 10^{-5} м. Малая стрелка указывает число целых миллиметров. Установка индикатора в нулевое положение производится поворотом шкалы большой стрелки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать длину проволоки X, указанную на установке.
2. Измерить микрометром диаметр проволоки d в нескольких местах, очищенных от слоя лаковой изоляции.
3. Индикатор установить в нулевое положение, проверяя правильность установки постукиванием по корпусу. При этом большая стрелка индикатора не смещается из нулевого положения.
4. Установить на основной груз дополнительные грузы, увеличивая их величину. Измерить абсолютное удлинение ΔX нарастающим итогом. Опыт по п. 4 произвести несколько раз. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
5. Построить график зависимости $\Delta X = f(mg)$, откладывая на оси абсцисс нагрузку mg, а по оси ординат абсолютное удлинение ΔX. Провести через полученные точки наилучшим образом прямую. С учетом того, что площадь

сечения проволоки $S = 1/(4\pi d^2)$, рассчитать среднее значение модуля Юнга по формуле

$$E = (4X/\pi d^2)\left[\frac{m_2 g - m_1 g}{\Delta X_2 - \Delta X_1}\right]. \qquad /7/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

X,м	d,10^{-3}м	m,кг	mg,Н	ΔX,10^{-5}м				E,Нм$^{-2}$
				1	2	3	сред.	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое деформация? Что такое упругие и пластические деформации?
2. Что такое абсолютная и относительная деформации (удлинения), в каких единицах они измеряются?
3. Что называется механическим напряжением? Укажите единицу измерения механического напряжения.
4. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
5. Сформулируйте и запишите (выведите) закон Гука для одноосного растяжения (сжатия).
6. Каков физический смысл и единица измерения модуля Юнга? От чего зависит модуль Юнга?

ЛИТЕРАТУРА

5. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 12,21.
6. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 14,25.
7. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.3, VII.1.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: экспериментальная проверка зависимости периода упругих колебаний пружины от массы подвешенного груза и определение коэффициента жесткости пружины.

Приборы и принадлежности: стойка с измерительной линейкой, пружина, набор грузов, секундомер.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Колебания - это процесс, при котором система проходит через определенный набор состояний, возвращаясь в каждое из состояний через определенное время – период. Простейшими и одними из важнейших видов являются гармонические колебания. Это определяется не только тем, что они часто встречаются в технике, но и тем, что периодические процессы могут быть представлены в виде сумм нескольких гармонических колебаний методом разложения в ряд Фурье. При гармонических колебаниях величины, описывающие колебательный процесс (при механических колебаниях - смещение маятника из положения равновесия x, скорость и ускорение) изменяются по закону синуса или косинуса. При этом уравнение кинематики имеет вид

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_O), \qquad /1/$$

или

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_O), \qquad /1a/$$

где A - амплитуда колебаний, т.е. максимальное значение, которое может принимать величина смещения x, ω-круговая или циклическая частота, т.е. количество колебаний за 2π секунд. Она связана с периодом T и частотой ν следующими соотношениями:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \qquad /2/$$

$\omega t + \varphi_O$ -фаза колебаний, которая определяет координату x в момент времени t, φ_O -начальная фаза, т.е. фаза в момент времени t=0, T - период колебаний - время одного полного колебания, ν - частота, т.е. число колебаний, совершаемых за 1 с. Размерность ν в системе СИ [ν]=1 Гц=1с$^{-1}$. Скорость v колеблющейся материальной точки и ускорение также изменяются по гармоническому закону:

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0), \qquad /3/$$

$$a = \frac{d^2x}{dt} = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0), \qquad /4/$$

причем фаза скорости на $\frac{\pi}{2}$, а фаза ускорения на π больше, чем фаза смещения $\omega t + \varphi_O$. Из /1/ и /4/ вытекает, что

$$a = \omega^2 x. \qquad /5/$$

Следовательно, при гармоническом колебательном движении ускорение точки прямо пропорционально её смещению из положения равновесия и направлено в сторону, противоположную смещению. Уравнение динамики, описывающее гармонические колебания имеет вид $m\vec{a} = \vec{F}$ или

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -m\omega^2 x, \qquad /6/$$

т.е. условием возникновения гармонических колебаний является наличие в системе возвращающей силы, противоположной по знаку смещению и пропорциональной ему. Уравнение /6/ в форме

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = a \qquad /7/$$

есть дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний. Решением этого уравнения являются функции вида /1/ или /1a/. Условию /6/

удовлетворяют, например, упругие силы, которые согласно закону Гука, прямо пропорциональны величине абсолютной деформации, т.е. смещению из положения равновесия: $F = kx$. /8/

Поэтому колебания, совершаемые под действием упругих сил, будут гармоническими. Возвращающие силы, удовлетворяющие уравнению /6/, но не являющиеся упругими называют квазиупругими.

Из /6/ и /8/ следует, что в случае гармонических колебаний, совершаемых под действием упругих сил, например колебание груза, подвешенного на пружине, уравнение динамики имеет вид $m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$, /9/

откуда $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ /10/

и $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, /11/

где k - коэффициент жесткости пружины, а m - масса подвешенного груза. Квадрат периода упругих колебаний пружинного маятника прямо пропорционален массе подвешенного груза $T^2 = \frac{4\pi^2}{k}m$. /12/

Формула /12/ получена для идеализированного случая невесомой пружины. С учетом массы пружины формула /12/ переходит в $T^2 = \frac{4\pi^2}{k}m + T_0^2$, /13/

где T_O - период колебания пружины без подвешенного груза. Формула /13/ используется для определения коэффициента жесткости пружины k.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Подвесить к пружине груз. Оттянув груз на 0.01...0.02 м, отпустить его, предоставив возможность совершать колебания. Измерить время нескольких колебаний n =30...50. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. Измерения для одного и того же груза повторить три раза и по среднему значению времени определить период колебаний по формуле $T = \frac{t}{n}$. /14/

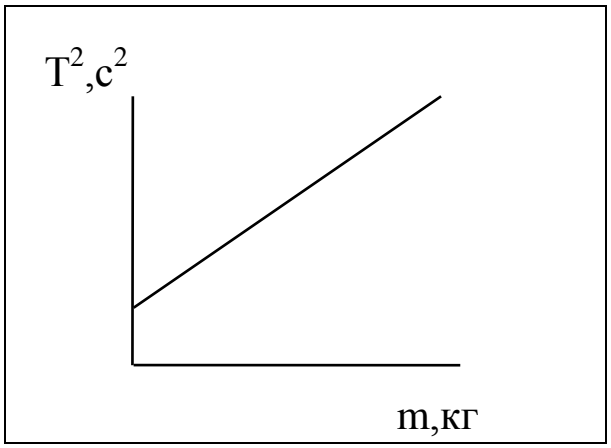
2.Увеличивая массу груза определять период колебаний согласно предыдущему пункту.

3.Построить график зависимости $T^2 = f(m)$, рис.21.1, проведя прямую через экспериментальные точки наилучшим образом. Используя две любые, возможно более далеко стоящие друг от друга, точки на графике, определить коэффициент жесткости пружины по формуле $k = 4\pi^2\frac{m_2 - m_1}{T_2^2 - T_1^2}$. /15/

4.Определить коэффициент жесткости пружины, используя закон Гука /8/ по формуле $k = \frac{F_2 - F_1}{\Delta x_2 - \Delta x_1}$. /16/

Для этого установить указатель пружины в некоторое положение, принимаемое в дальнейшем за нулевое. Измерить величину абсолютной деформации Δ

x пружины, нагруженной грузами различной массы m. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. По полученным данным построить график зависимости $\Delta x = f(F)$, рис.21.2, и рассчитать среднее значение k по формуле /16/



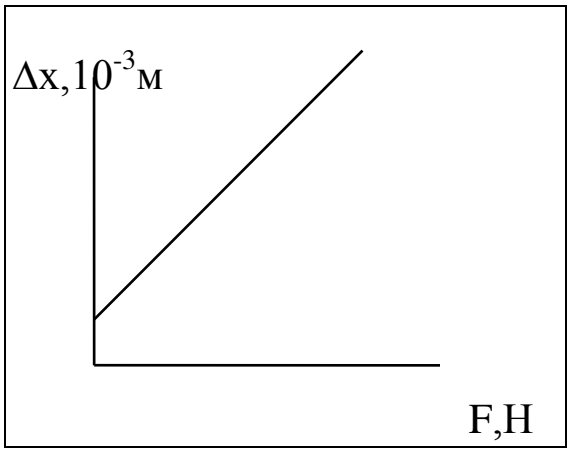


Рис.21.1 Рис.21.2

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

m, кг	n	t, c				$T^{2,}$ c^2	F, Н	Δx, 10^{-3} м
		1	2	3	Ср			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называются периодическим?
2. Какое движение называется колебательным (колебанием)?
3. Что такое гармоническое колебательное движение? Запишите уравнения кинематики и динамики гармонически колеблющегося тела?
4. Как зависят от времени скорость и ускорение при гармоническом колебательном движении?
5. Что называется периодом, частотой, фазой, амплитудой колебаний? В каких единицах измеряются эти величины?
6. Какому условию должна удовлетворять возвращающая сила, чтобы колебания, совершаемые под действием этой силы, были гармоническими.
7. Запишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний.
8. В каких единицах измеряется коэффициент жесткости пружины?

ЛИТЕРАТУРА.

4. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 140,141,142.
5. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 49,50,52,53,54;

6. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § , §I.V.1.1, IV.1.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ЦЕНТР ИНЕРЦИИ –ТОЧКА ПОДВЕСА

Цель работы: исследовать зависимость периода колебания физического маятника при изменении его приведенной длины.

Приборы и принадлежности: стержень с передвижной опорой, диск с передвижной опорой, кронштейн для установки стержня или диска, секундомер.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Физическим маятником называется твердое тело, способное совершать колебания вокруг неподвижной оси, не совпадающей с его центром инерции (центром масс). В работе в качестве физического маятника могут быть использованы стержень постоянного сечения, рис. 21.1, или сплошной диск.

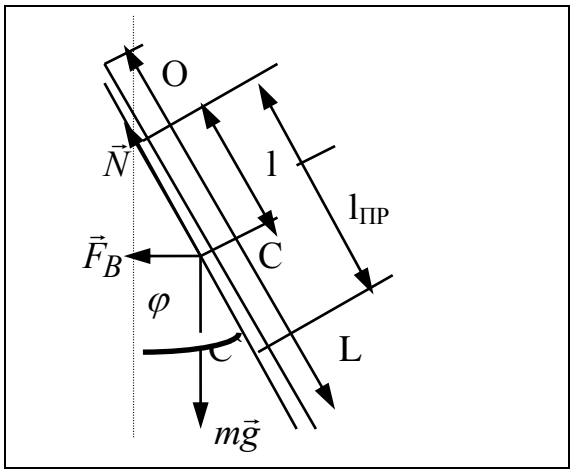


Рис.22.1

Колебания физического маятника описываются основным законом динамики вращательного движения

$$\varepsilon = \frac{M}{J}, \qquad /1/$$

где $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ - угловое ускорение, φ - угол отклонения; M - суммарный момент внешних сил; - момент инерции маятника относительно оси вращения O. Возвращающей силой в данной системе является сумма двух сил - силы реакции опоры и силы тяжести, приложенных к центру масс. Вращающий момент, стремящийся вернуть маятник в положение равновесия, создается только силой тяжести и направлен вдоль оси колебаний

$$\overline{M} = M_T = m\overline{q} \cdot \bar{l}, \qquad /2/$$

откуда

$$M = -mgl \cdot \sin\gamma, \qquad /3/$$

поскольку сила тяжести, проходит через ось подвеса, и момента силы не создает (трением пренебрегаем). Тогда уравнение динамики физического маятника имеет вид:

$$J_0 \frac{d^2\gamma}{dt^2} = -mgl \cdot \sin\varphi. \qquad /4/$$

Это уравнение описывает негармонические колебания, период которых зависит от амплитуды.

Если колебания малые ($\gamma < 0.14$ рад $\approx 8^0$), то $\sin\gamma \approx \gamma$ и тогда уравнение /4/ переходит в

$$J_0 \frac{d^2\gamma}{dt^2} = -mgl \cdot \varphi, \qquad /5/$$

которое аналогично уравнению динамики гармонических колебаний (см. методические указания к лабораторной работе №21) $\quad m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \qquad /6/$

Составляющая силы тяжести, параллельная траектории, играет в этом случае роль квазиупругой силы.

Следовательно, при малых отклонениях от положения равновесия физический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{J_0}}. \qquad /7/$$

Уравнение кинематики в этом случае имеет вид $\quad \varphi = \varphi_o \sin(\omega t + \alpha_o). \qquad /8/$

Период физического маятника в этом случае не зависит от амплитуды и определяется выражением:

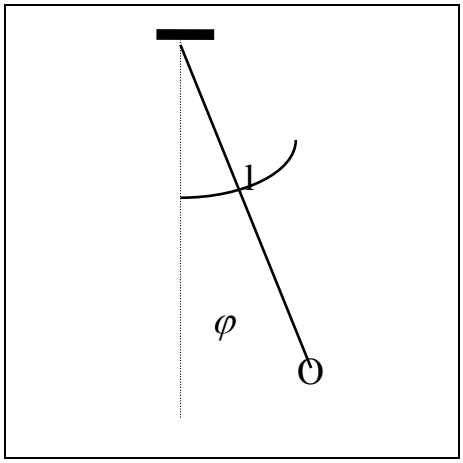


Рис.22.2

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J_0}{mgl}}. \qquad /9/$$

Для математического маятника, представляющего идеализированную систему, состоящую из материальной точки, массой m, подвешенную на невесомой нерастяжимой нити длиной l, (рис.22.2) момент инерции равен

$$J_O = ml^2. \qquad /10/$$

Тогда из /9/ и /10/ следует, что период колебаний математического маятника равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad /11/$$

Из сопоставления формул /9/ и /11/ следует, что математический маятник длиной $\quad \ell_{np} = \frac{I}{ml} \qquad /12/$

будет иметь такой же период колебаний, как и физический маятник с периодом, определяемым формулой /9/. Величина $l_{ПР}$ называется приведенной длиной физического маятника.

Точка на прямой, соединяющей ось вращения и центр масс маятника и отстоящая от оси вращения на расстоянии равном $l_{ПР}$, называется центром качания физического маятника (точка C′ на рис.22.1).

Рассмотрим маятник в виде стержня постоянного сечения. Его момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно стержню, равен $$J_c = \frac{1}{12} mL^2 . \qquad /13/$$

Используя теорему Штейнера $$J = J_O + ml^2 , \qquad /14/$$

где l - расстояние от оси вращения до параллельной ей оси, проходящей через центр масс, и пренебрегая моментом инерции подвижной опоры, получим

$$J_0 = \frac{1}{12} mL^2 + ml^2 . \qquad /15/$$

Приведенная длина рассматриваемого маятника равна

$$1_{np} = \frac{L^2}{12l} + l . \qquad /16/$$

Отсюда следует, что приведенная длина $l_{ПР}$ всегда больше l, т.е. точка подвеса и центр качания лежат по разные стороны от центра масс.

Подставляя /16/ в /12/ и далее в /9/ получим $$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}\left(\frac{L^2}{12l} + l\right)} . \qquad /17/$$

Если период колебаний математического маятника /11/ монотонно возрастает с увеличением длины нити l, то период колебаний стержня зависит от l более сложным образом. В подкоренном выражении формулы /17/ с увеличением расстояния от оси вращения до центра масс первое слагаемое убывает, а второе возрастает так, что T имеет минимум при l_{MIN}, определяемым из выражения $$\frac{d}{dl}\left(\frac{L^2}{12l} + l\right) = -\frac{L^2}{12l} + 1 = 0, \qquad /18/$$

т.е. $$l_{\min} = \frac{L}{2\sqrt{3}} = \frac{L}{\sqrt{12}} . \qquad /19/$$

При выполнении лабораторной работы необходимо построить экспериментальную и теоретическую зависимости $T = f(l)$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Установить подвижную опору маятника (стержня или диска) на верхнюю отметку (отверстие) и подвесить маятник на кронштейн. При этом расстояние между осью вращения и центром масс будет максимальным. Значение l измерить и занести в таблицу результатов наблюдений.

2.Отклонить стержень на небольшой угол ($\gamma < 8^0$) и отпустить его.

3.С помощью секундомера определить время t нескольких n (30...50) полных колебаний. Занести данные в таблицу результатов наблюдений. Определить период колебаний маятника по формуле $$T = \frac{t}{n} . \qquad /20/.$$

При этом период вычислить с точностью до третьей значащей цифры после запятой.

4.Изменить расстояние l, устанавливая острие опоры против следующих делений (отверстий) на маятнике (уменьшить 1). Измерять период колебаний физического маятника при каждом новом положении опоры в соответствии с пунктами 2,3. Опору каждый раз перемещать на 0,05 м. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Задавая значения l равные экспериментальным, по формуле /17/ для стержня и по формуле /23/ для диска теоретически рассчитать соответствующие значения периода колебаний маятника. По формулам /19/ или /24/ соответственно, вычислить расстояние от оси вращения до центра качаний.

6.По полученным экспериментальным $T_Э$ и теоретическим T_T значениям периода колебаний построить графики зависимостей $T_Э = f(l)$ и $T_T = f(l)$. Сравнить теоретическое и экспериментальное (найденное из графика $T_Э = f(l)$) значение l_{MIN}.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1, м								
t, с								
$T_Э$, с								
$T_Т$, с								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое физический маятник?
2. От чего зависит период колебаний физического маятника?
3. От чего зависит период колебаний физического маятника в случае колебаний с большой амплитудой?
4. Запишите уравнение динамики физического маятника для колебаний большой амплитуды и колебаний малой амплитуды.
5. Что такое приведенная длина физического маятника?
6. При каком условии колебания физического маятника можно считать гармоническими?
7. Вычислите период колебаний диска и кольца, подвешенных на оси, проходящей через окружность.
8. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите ее формулу.

ЛИТЕРАТУРА

7. Трофимова Т.И Курс физики /Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 140, 141,142.
8. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 49,50,52,53,54;
9. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § , §I.V.1.1, IV.1.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: определение ускорения силы тяжести.

Приборы и принадлежности: шарик, подвешенный на нитке, прямоугольный треугольник, вертикальная масштабная линейка, секундомер, установка «Универсальный маятник».

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Галилей экспериментально показал, что вблизи поверхности Земли в вакууме все тела, независимо от их формы, размеров и массы, в отсутствие опоры или подвеса двигаются с постоянным ускорением $g = 9{,}81$ м·с^2. Такое движение называется свободным падением.

Справедливость этого вывода вытекает из установленного Ньютоном второго закона динамики поступательного движения

$$a = \frac{F}{m}, \qquad /1/$$

где a – ускорение тела; m - его масса; F – равнодействующая всех сил, действующих на тело, и закона всемирного тяготения; вблизи поверхности Земли

$$F_T = \gamma \frac{M_З m}{R_З^2}, \qquad /2/$$

где F_T - сила тяготения; γ - гравитационная постоянная; $M_З$ - масса Земного шара; $R_З$ - средний радиус Земного шара. В этом случае ускорение свободного падения

$$a = g = \gamma \frac{M_З}{R_З^2}. \qquad /3/$$

Используя табличные данные $\gamma = 6{,}672 \cdot 10^{-11}$ м^3 кг$^{-1}$ с$^{-2}$, $M_З = 5,\ 975 \cdot 10^{24}$ кг и $R_З = 6{,}371 \cdot 10^6$ м можно рассчитать среднее значение g теоретически.

В предложенном выводе не учитывается влияние вращения Земли вокруг собственной оси, высоты над уровнем Земли, несферической формы Земли, неоднородного распределения вещества по плотности в ней, что на практике приводит к разным значениям g в различных точках поверхности Земли. Принятое среднее значение g=9,807 м с$^{-2}$.

Для экспериментального определения g может быть использован математический маятник - материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити. Его практической реализацией является шар небольших (по сравнению с длиной нити) размеров, $r << l$, где r – радиус шара, масса которого значительно больше массы нити, на которой он подвешен.

Из теории колебаний физического маятника (см. описание лабораторной работы №22) известно, что при малых колебаниях (амплитуда φ_0 - не превышает 8^0, см. рис.24.1) период его колебаний равен

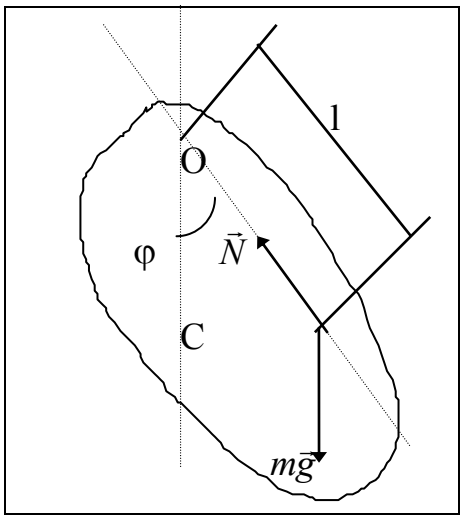


Рис.24.1

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}}, \qquad /4/$$

где J - момент инерции маятника относительно оси вращения; d - расстояние от центра масс до оси вращения. В случае математического маятника $I = ml^2$ и $d = l$, следовательно $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Измеряя T и l можно определить ускорение свободного падения. Прямое измерение длины маятника затруднено из-за низкой точности определения абсолютного положения центра шара с помощью треугольника и неудобства определения расстояния от точки подвеса до центра шара. Если положение шара X_i отсчитывать от некоторой произвольно выбранной точки, например нулевого деления вертикальной масштабной линейки, то поскольку

$$l = l_0 + x - r, \qquad /6/$$

где x - текущая координата, r - радиус шара,
зависимость $T^2 = f(x)$ имеет вид

$$T^2 = \frac{4\pi}{g}(l_0 - r + x). \qquad /7/$$

Тогда для нахождения g может быть использована формула

$$g = 4\pi^2 \frac{x_2 - x_1}{T_2^2 - T_1^2}, \qquad /8/$$

где x_i и T_i - координаты двух любых возможно более удаленных точек на графике $T^2 = f(x)$, т.е. в расчетную формулу входит разность координат нижнего края шара в двух положениях.

Данная лабораторная работа может быть выполнена в варианте №24а с использованием формулы /5/ на настольной установке (рис.24.3). Основание (1) оснащено винтами (2) для регулировки вертикальности колонны (3). Верхний кронштейн для крепления маятника (4) неподвижен. Длина маятника изменяется с помощью воротка (5). Измерение числа периодов и времени колебаний производится секундомером (6), связанным с фотоэлектрическим датчиком

(7), установленном на нижнем кронштейне. Отпуская зажимной винт можно изменять положение нижнего кронштейна до совпадения штрихов на фотоэлектрическом датчике и шаре.

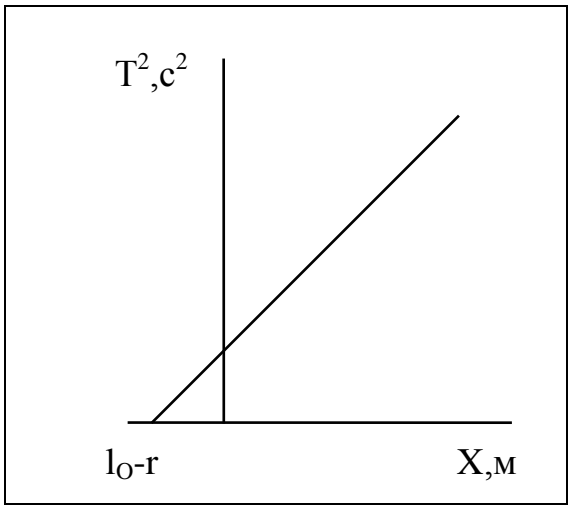


Рис.24.2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (ВАРИАНТ №24)

1.Установить треугольник одним из катетов напротив одной из меток на вертикальной масштабной линейке (см. рис.24.3) и совместить нижний край шара маятника с этим краем.

2.Измерить время нескольких колебаний ($n \approx 50$). Измерения повторить не менее пяти раз. Среднее значение времени занести в таблицу результатов наблюдений. По формуле /9/ определить период колебаний $T = \frac{t}{n}$. /9/

3.Изменить длину маятника, установив шар в новое положение и определить период колебаний в этом положении согласно предыдущему пункту. Опыт по п. 1 - 3 проделать для 5-6 положений, и результаты занести в таблицу результатов наблюдений.

4.Определить g по формуле /8/, используя значения x и T для двух точек на графике.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (ВАРИАНТ №24а)

1. Установить с помощью винтов (2) колонну (3) в вертикальное положение, рис.24.5.

2. Установить длину маятника ~0,5 м воротком (5).

3. Установить нижний кронштейн с фотодатчиком до совпадения штрихов на датчике и шаре. Измерить длину маятника l линейкой на колонне.

4. Привести маятник в движение, отклонив его на 5...7°. Включить кнопку «сеть». Нажать кнопку «сброс». Нажатием кнопки «стоп» измерить время, соответствующее n = 15...20 колебаниям. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. Рассчитать величину периода колебаний по формуле /9/ Эксперимент повторит 6...8 раз.

5. Рассчитать величину ускорения свободного падения по формуле

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \qquad /10/$$

6. Найти среднее значение ускорения свободного падения и среднюю абсолютную погрешность измерений, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», см. формулу /11/

$$\Delta g_{cp} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta g_i)^2}{n(n-1)}}\,. \qquad /11/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

x, м	h, м	t,c	T, c	T^2, c	g, м·с$^{-2}$

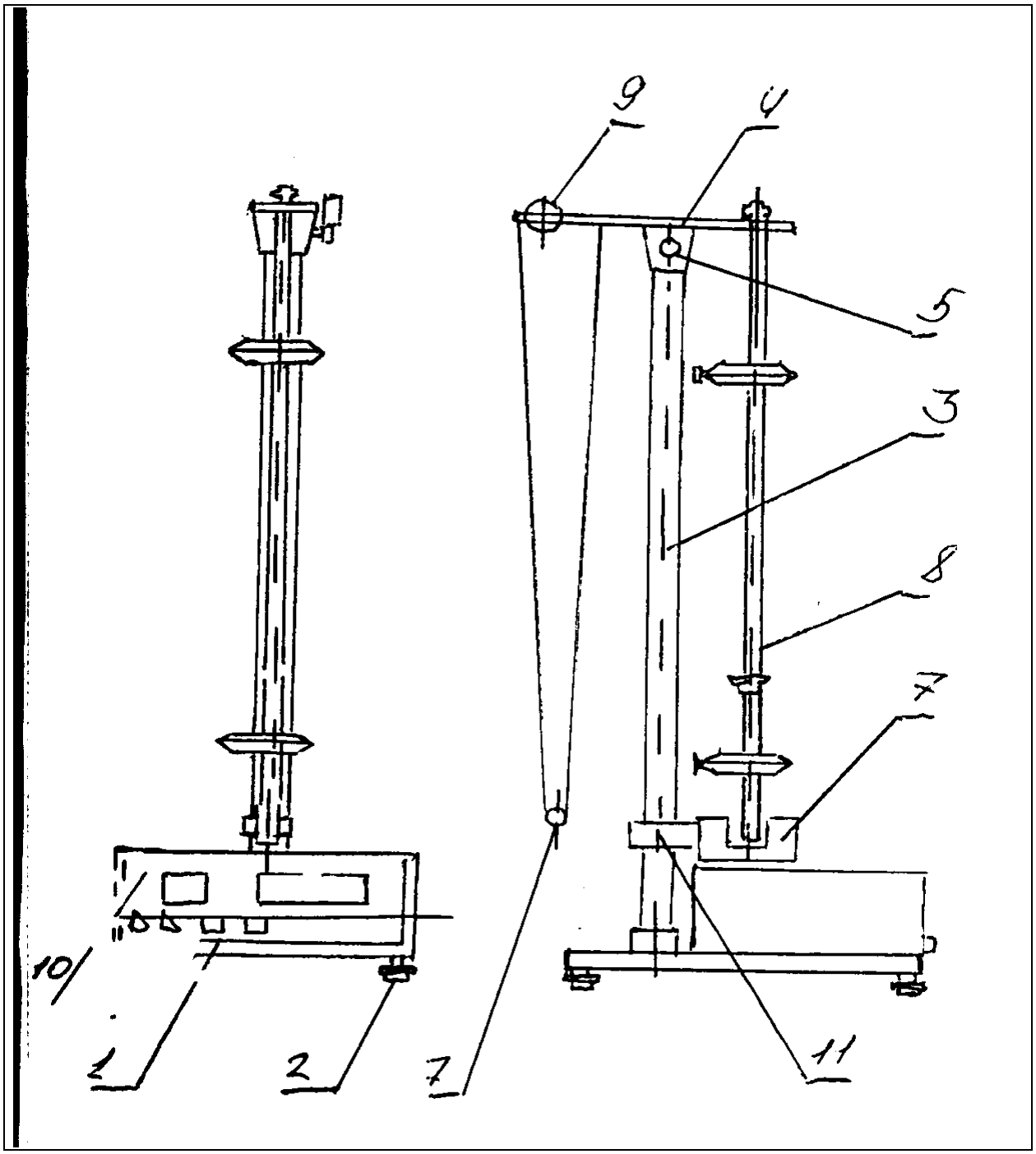


Рис.24.3

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид движения называется свободным падением?
2. От каких факторов зависит ускорение свободного падения?
3. Как и почему изменяется ускорение свободного падения с изменением высоты над поверхностью Земли?
4. Что такое математический маятник?
5. Запишите формулу для определения периода колебаний математического маятника.
6. Запишите уравнение динамики колебаний и уравнение динамики малых колебаний физического и математического маятников.

ЛИТЕРАТУРА

10. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 23,27,140,141,142.
11. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 16,32,49,50,52,53,54;
12. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § , § I.6.2, I.7.3, IV.1.2.
13. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: изучение связи термодинамических величин при различных процессах в идеальном газе и определение отношения молярных теплоемкостей идеального газа при постоянном давлении и постоянном объеме.

Приборы и принадлежности: баллон с тремя выводами, насос, манометр, соединительные шланги, кран

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При небольших плотностях и средних температурах газы можно рассматривать как совокупность хаотически движущихся частиц малого размера, взаимодействующих при столкновениях как абсолютно упругие шары и невзаимодействующих между столкновениями. Такой коллектив называется идеальным газом.

Термодинамические параметры: давление P, объем V, и температура T идеального газа в любом состоянии связаны между собой согласно уравнению Менделеева - Клапейрона

$$PV = \frac{m}{M}RT, \qquad /1/$$

где m - масса газа , M - его молярная масса, R - универсальная газовая постоянная ($R = 8{,}31695 \cdot 10^3$ Дж·К$^{-1}$·кмоль$^{-1}$) .

Внутренняя энергия идеального газа складывается из кинетической энергии поступательного движения молекулы $\frac{mv^2}{2}$ вдоль трех взаимно перпендикулярных осей координат и кинетической энергии вращательного движения молекул $\frac{J\omega^2}{2}$ вокруг трех осей координат. В зависимости от того, сколько атомов содержит молекула газа, моменты инерции относительно некоторых из этих трех осей могут быть близки к нулю, и соответствующим вкладом в энергию можно пренебречь. Исходя из принципа равнораспределения энергии по степеням свободы в массе газа с достаточно большим числом молекул, можно считать, что внутренняя энергия идеального газа равна:

$$U = \frac{i}{2} NKT = \frac{i}{2}\frac{m}{M} N_A KT = \frac{i}{2}\frac{m}{M} RT, \qquad /2/$$

где N - количество молекул газа , N_A - число Авогадро, а изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M} R\Delta T, \qquad /3/$$

откуда вытекает, что температура есть мера внутренней энергии газа.

Согласно закону сохранения энергии в термодинамике количество теплоты ΔQ, подводимое к газу, идет на увеличение его внутренней энергии ΔU и на совершение газом работы A против внешних сил:

$$\Delta Q = \Delta U + A. \qquad /4/$$

Молярная теплоемкость газа есть количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля газа на 1 К. Эта величина зависит от рода газа и характера процесса. В том случае, если процесс идет при постоянном объеме (изохорно), A=0, и, как это следует из (3) и (4) в предположении, что m=M,

$$C_v = \frac{i}{2} R. \qquad /5/$$

Если процесс в газе изобарный, то исходя из того, что работа равна

$$A = P\Delta V. \qquad /6/$$

Аналогично используя /1/ получим $C_p = \frac{i+2}{2} R.$ /7/

Откуда отношение молярных теплоемкостей при постоянном давлении и объеме (коэффициент Пуассона) γ равно $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}.$ /8/

Для воздуха, состоящего практически полностью из кислорода O_2 и азота N_2, молекулы которых состоят из двух атомов, число степеней свободы равно i=5 (3 поступательных и 2 вращательных степени свободы). Откуда γ=1,400.

Более точная теория дает для O_2 γ =1,401 и для N_2 γ=1,403, а для воздуха с учетом концентрации O_2 и N_2 γ=1,403.

Установка для определения отношения молярных теплоемкостей γ (рис.31.1), состоит из герметичного баллона (1), механического насоса (2), U-образного жидкостного манометра (3), крана (4) и выпускного клапана (5).

В осях P,V графики газовых процессов, протекающих при работе установки, изображены на рис.31.2. В начальном состоянии I давление газа, его объем и температура равны соответственно P_1, V_1, T_1. Накачка газа в баллон с

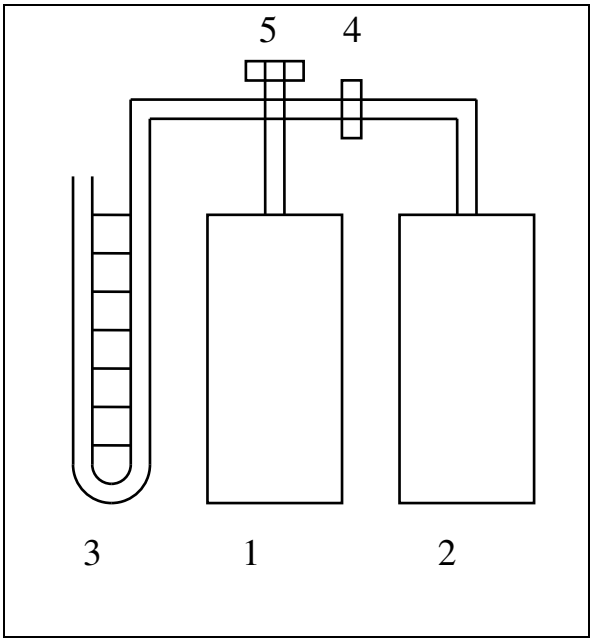


Рис.31.1

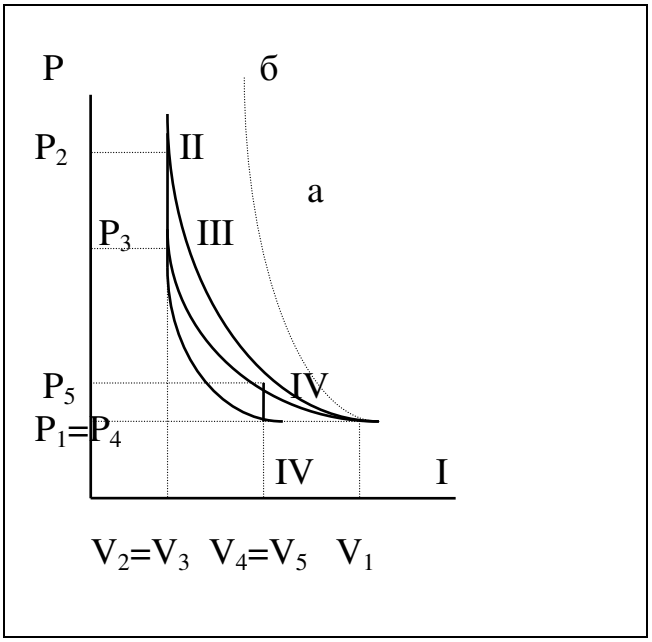


Рис.31.2

бесконечно малой скоростью происходит изотермически, т.е. изменение параметров состояния P,V,T описывается кривой (а) на рис.31.2. Если накачка газа производится с бесконечно большой скоростью, т.е. адиабатно, то изменение параметров описывается кривой (б). Практически накачка производится с конечной скоростью и изменение параметров состояния при этом политропном процессе описывается кривой I-II. Переход из состояния II в III является изохорным процессом. Возникающая разность давлений фиксируется манометром.

$$P_3 - P_1 = \rho g \Delta h_1 . \qquad /9/$$

Переход из состояния III в состояние IV происходит путем адиабатного истечения газа через клапан (5) до уравнивания давлений в баллоне и на воздухе $P_4 = P_1$. /10/

Переход из состояния IV в V происходит при постоянном объеме. Возникающая разность давлений равна: $P_5 - P_4 = \rho g \Delta h_2$. /11/

Тогда параметры газа в состояниях I=V, III, V связаны уравнениями

$P_3V_3 = P_5V_5$ - изотермический процесс /12/

$P_3V_3^{\gamma} = P_4V_4$ - адиабатный процесс /13/

$V_4 = V_5$ - изохорный процесс. /14/

Решая уравнения /9/, /10/, /11/, /12/, /13/ и /14/ совместно получим

$$\frac{P_1 + \rho g h_1}{P_1} = \left(\frac{P_1 + \rho g h_1}{P_1 + \rho g h_2} \right)^{\gamma}, \qquad /15/$$

где P_1 - атмосферное давление. Отсюда вытекает

$$\gamma = \frac{\ln\left(P_1 + \rho g \Delta h_1\right) - \ln P_1}{\ln\left(P_1 - \rho g \Delta h_1\right) - \ln\left(P_1 + \rho g \Delta h_2\right)}. \qquad /16/$$

При малых разностях высот столбов в коленах манометра $\Delta h_1 \approx 4\Delta h_2 \approx 0{,}1$ м дополнительное давление значительно меньше атмосферного $\rho g \Delta h_1 \approx 0{,}01 P_1$, тогда, используя формулу для приближенных вычислений $\ln(1+\alpha) \approx \alpha$, получим $\gamma = \dfrac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}$. /17/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить герметичность соединительных шлангов, крана (4) и закрытого клапана (5). Вода в манометре должна быть налита примерно до половины высоты U-образной трубки манометра.

2. Открыть кран (4) и накачивать воздух в баллон насосом (2) с небольшой скоростью так, чтобы не выплеснуть воду из трубки манометра. Накачав воздух до давления P_2 в состоянии II на рис.31.2 (до разности высот уровней в коленах манометра 0,10... 0,13 м), закрыть кран (4), выждать, пока разность высот уровней не перестанет изменяться (примерно 3 минуты). Это означает, что газ перешел из состояния II в состояние III. Замерить разность высот Δh_1 .

3. Открыть клапан баллона (5), нажав его (в течение 1...2 секунд). При этом газ адиабатиочески вытекает из баллона до установления в последнем атмосферного давления. При этом произойдет переход из состояния III в состояние IV. После этого клапан закрыть. Газ начнет изохорно переходить из состояния IV в V в течение примерно 3 мин. Когда давление в баллоне перестанет изменяться, замерить разность высот Δh_2. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

4. Вычислить γ по формуле /17/. Определить $\gamma_{СР}$, $\Delta\gamma_{СР}$ и $\dfrac{\Delta\gamma_{ср}}{\gamma_{ср}}$, используя методическое пособие «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум» [4].

5. Окончательный результат записать в форме: $\gamma = \gamma_{ср} \pm \Delta\gamma_{ср}$, $\varepsilon = \dfrac{\Delta\gamma_{ср}}{\gamma_{ср}} 100$ %.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Δh_1 , м	Δh_2, м	$\Delta h_1 - \Delta h_2$,м	γ	$\Delta\gamma_i$,	$\Delta\gamma^2_i$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое идеальный газ? Какие предположения делаются при введении такой модели описания газа?
2. Запишите уравнения связи термодинамических величин и нарисуйте графики изопроцессов идеального газа.
3. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона состояния идеального газа.
4. Сформулируйте закон сохранения энергии в термодинамике и запишите его выражения в общем случае и при различных процессах в идеальном газе.
5. Что такое теплоемкость тела, удельная и молярная теплоемкость вещества? В каких единицах они измеряются?
6. От чего зависит молярная теплоемкость идеального газа?
7. Запишите выражения для молярных теплоемкостей при изохорном и изобарном процессах. Запишите уравнение Майера.
8. Что такое коэффициент Пуассона? Запишите формулу его вычисления.
9. Что такое адиабатный процесс? Как его можно реализовать практически? Запишите выражения для закона сохранения энергии при адиабатном процессе.
10. Запишите уравнения связи термодинамических параметров при адиабатном процессе и нарисуйте его график в осях давление-объем.

ЛИТЕРАТУРА

8. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 42, 50, 51, 52, 53, 54, 55.
9. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 83,84,86,87, 97.
10. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.1.4, II.2.5, II.3.6, II.3.7.
11. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум. Под ред. Леонтьева Н.Г.// Зерноград, АЧГАА - 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: изучить явление поверхностного натяжения и определить коэффициент поверхностного натяжения этилового спирта.

Приборы и принадлежности: цилиндр с делениями и краном (бюретка), стакан, колбы с водой и испытываемой жидкостью (этиловым спиртом).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Силы взаимодействия между молекулами быстро убывают с увеличением расстояния между ними. Поэтому можно считать, что молекулы взаимодействуют только с ближайшими соседями, которые находятся вблизи сферы взаимодействия радиуса r=3R, где R - эффективный радиус молекулы.

Рассмотрим жидкость, имеющую свободную поверхность (границу раздела фаз жидкость - газ). Молекулы, находящиеся внутри жидкости, окружены соседними со всех сторон симметрично (рис.35.1а).

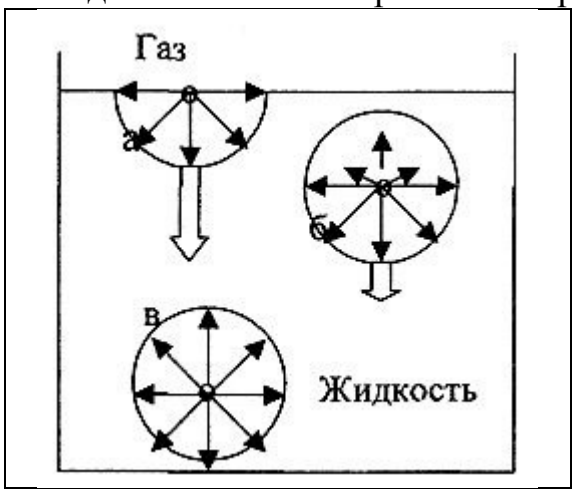


Рис.35.1

Молекулы, находящиеся в слое толщиной h≈3R вблизи границы раздела фаз жидкость - газ, окружены соседними несимметрично, и на них действуют не скомпенсированные силы, направленные внутрь жидкости (рис.35.1б,в).

В случае границы раздела фаз жидкость - твердое тело в зависимости от величины межмолекулярных сил и плотности частиц по обе стороны от границы раздела, такие нескомпенсированные силы могут быть направлены как внутрь жидкости (в случае жидкости, не смачивающей поверхность твердого тела), так и внутрь твердого тела (в случае смачивающей жидкости).

Перемещение молекулы в поверхностный слой из глубины жидкости будет сопровождаться совершением работы, величина и знак которой зависят от соотношения сил взаимодействия молекулы соседнего слоя с молекулами «своей» и «чужой» среды. В случае границы раздела фаз жидкость - газ эта работа отрицательна, т.к. может совершаться только внешними силами. При этом поверхность будет увеличиваться $dA = -\sigma dS$. /1/

Здесь σ - коэффициент поверхностного натяжения, dA=dW - работа, необходимая для изотермического увеличения поверхности жидкости на единицу площади или, что то же самое, свободная энергия единицы поверхности жидкости.

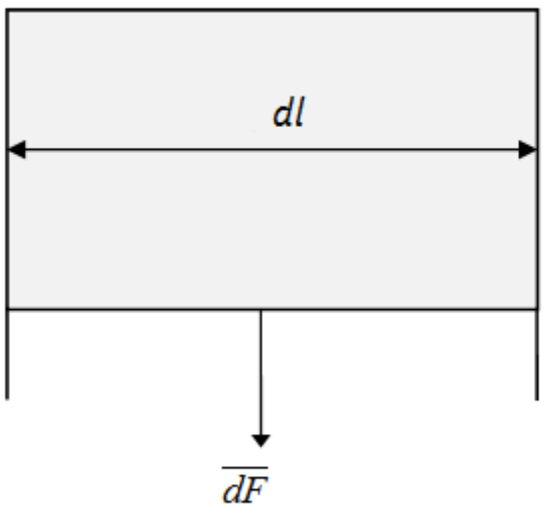


Рис.35.2.

Следовательно, поверхность жидкости обладает избыточной по сравнению с остальной массой жидкости свободной (потенциальной) энергией. Стремясь к минимуму энергии, система предоставленная самой себе, будет уменьшать свою поверхность до минимально возможной вели-

чины (сокращать поверхность). Это означает, что существуют направленные по касательной к поверхности силы поверхностного натяжения $F_н$, стремящиеся сократить (уменьшить) поверхность жидкости, причем

$$\sigma = \frac{dF_н}{dl}, \qquad /2/$$

где dl - длина контура, ограничивающего жидкость. Сила $dF_Н$ перпендикулярна dl. Отсюда вытекает второе определение коэффициента поверхностного натяжения: он равен силе, действующей по касательной к поверхности жидкости по нормали к контуру, ограничивающему жидкость, приходящейся на единицу длины контура.

При увеличении температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается вследствие уменьшения сил межмолекулярного взаимодействия

$$\sigma = B\left(T_k - T - T_0\right)\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{\frac{2}{3}}, \qquad /3/$$

где $T_к$ – критическая температура, ρ - плотность жидкости, М - ее молярная масса, В и T_0 - постоянные.

В таблице 1 приведены значения коэффициента поверхностного натяжения воды при различных температурах.

Таблица 1

Коэффициент поверхностного натяжения воды при различных температурах

Т, К	283	288	293	298	303	313
σ, 10^{-2} ($Нм^{-3}$)	7,422	7,325	7,275	7,178	7,118	6,956

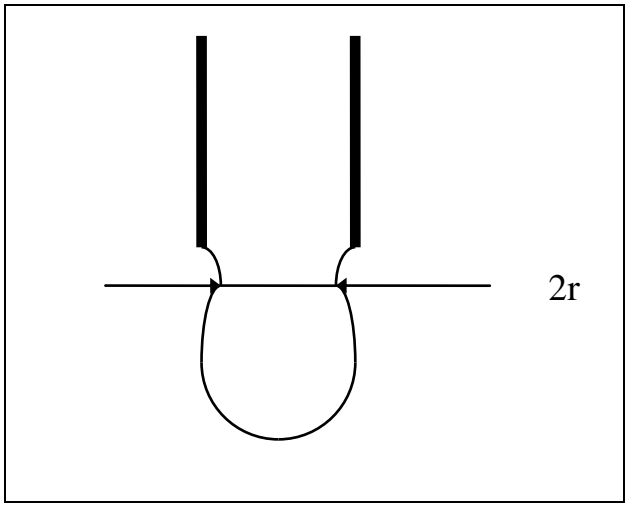


Рис.35.3

В работе коэффициент поверхностного натяжения определяется методом отрыва капель (методом Стокса). При медленном вытекании жидкости из узкой трубы капля отрывается в тот момент, когда сила тяжести и сила поверхностного натяжения равны: $F_т = F_н$. Сила тяжести равна:

$$F_T = mg = \rho_{ж} V_0 g, \qquad /4/$$

где V_0 - объем капли, $ρ_ж$ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

Сила поверхностного натяжения $F_н$ приложена перпендикулярно контуру поперечного сечения шейки капли в момент отрыва (рис.35.3).

$$F_{,H} = 2\pi r\sigma, \qquad /5/$$

где r - радиус шейки капли в момент отрыва. Измерение r затруднено, поэтому σ определяют мето дом сравнения. Если известен коэффициент

поверхностного натяжения одной жидкости, (в нашем случае воды), то из равенства /4/ и (5) следует:

$$\rho_B V_{0B} g = 2\pi r \sigma_B . \qquad /6/$$

Аналогично для испытуемой жидкости (спирта) $\rho_C V_{0C} g = 2\pi r \sigma_C .$ /7/

Объемы V_{0B} и V_{0C} могут быть определены по количеству капель N_B, N_C и объему вытекшей жидкости V_B, V_C

$$V_{0B} = \frac{V_B}{N_B} \quad \text{и} \quad V_{0C} = \frac{V_C}{N_C} . \qquad /8/$$

Тогда, предполагая, что радиусы шеек капель в обоих случаях одинаковы (и близки к радиусу нижнего конца трубки), а также предполагая, что объем протекшей жидкости в обоих случаях тоже одинаков, из /6/, /7/ и /8/ получим

$$\sigma_2 = \frac{N_1 \rho_2 \sigma_1}{N_2 \rho_1} . \qquad /9/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Промыть воронку и бюретку небольшим количеством воды. Использованную воду вылить.
2. Налить в бюретку воды. Под кран бюретки поставить стакан для сбора воды.
3. Медленно открывая кран, добиться раздельного падения капель с частотой, удобной для счета (ν = 0,5 ... 1,0 с).
4. Определить количество капель N_B, соответствующих вытеканию определенного постоянного во всех опытах количества жидкости ($V_i \sim 2 \cdot 10^{-6}$ м^3).
5. Опыт по п. 4 повторить 5...6 раз. При этом доливать жидкость (воду) в бюретку после каждого опыта. Между опытами кран бюретки не перекрывать. Количество капель N_B занести в таблицу результатов наблюдений.
6. Вылить воду из бюретки и крана в колбу. Сменить стакан для слива жидкости. Промыть стакан небольшим количеством испытуемой жидкости, которую затем вылить. В качестве испытуемой жидкости использовать подкрашенный этиловый спирт.
7. Проделать опыты с испытуемой жидкостью по п.п. 2-5. Количество капель N_C занести в таблицу результатов наблюдений.
8. По графикам, имеющимся на лабораторной установке, или по таблицам 1 и 2 интерполированием, определить коэффициент поверхностного натяжения и плотность воды, а также плотность этилового спирта, соответствующие температуре, при которой проводится эксперимент.

Таблица 2

Плотности воды $\rho_в$ и этилового спирта $\rho_с$ при различных температурах

Т, К	277	283	288	293	298	303	308
$\rho_в$, 10^3 кг м^3	1,0000	0,99973		0,99823		0,99567	
$\rho_с$, 10^3 кг м^3		0,7979	0,7936	0,7893	0,7851	0,7809	0,7767

9. Используя полученные значения плотности и коэффициента поверхностного натяжения воды, а также средние значения количества капель N_1 и N_2, определить коэффициент поверхностного натяжения испытуемой жидкости по средним значениям N_1 и N_2 .

10. Формулы для средней абсолютной погрешности

$$\Delta N = t_{\alpha n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta N_i^2}{n(n-1)}}, \qquad /10/$$

и средней относительной погрешности определения коэффициента поверхностного натяжения

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_B}{N_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_C}{N_C}\right)^2} \qquad /11/$$

можно получить, пользуясь методическими указаниями «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум». При этом погрешностями табличных значений можно пренебречь ввиду их малости. Значение надежности выбирается α=0,95 или по заданию преподавателя. Результат записать в виде: $\sigma \pm \Delta\sigma$ =.....±.....10^{-2} Н/м

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

	Вода			Испытуемая жидкость		
№	N_B	ΔN_B	ΔN_B^2	N_C	ΔN_C	ΔN_C^2

σ_1= 10^{-2} Н·м$^{-1}$, ρ_2= ,10^3 кг·м$^{-3}$, ρ_1= ,10^3 кг·м^3 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление поверхностного натяжения?
2. Каков молекулярный механизм поверхностного натяжения?
3. Что такое коэффициент поверхностного натяжения? В каких единицах он измеряется? От чего он зависит?
4. Как изменяется коэффициент поверхностного натяжения при увеличении температуры?
5. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения идеального газа?
6. Запишите рабочую формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 60, 66,67,68,69.

2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 115,116, 117, 118,119.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.5.1, II.6.1, II.6.4.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум. Под ред. Леонтьева Н.Г.// Зерноград, АЧГАА - 2002, 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель работы: изучение явления теплового расширения твердого тела и определение коэффициента теплового расширения.

Приборы и принадлежности: испытуемые стержни из различных материалов (сталь, медь, алюминий, стекло), трубчатый нагреватель с кронштейном (дилатометр), индикатор малых перемещений (микрометрическая головка), пробирки с водой, штангенциркуль, термометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Газы, жидкости и твердые тела как фазы вещества обычно различают по их физическим свойствам. Различия этих свойств, кроме внешних условий и химического состава, обусловлены структурой вещества, независимо от того, состоит оно из молекул, атомов или ионов. Фазовые состояния различают, прежде всего, по степени упорядоченности расположения структурных единиц в пространстве.

В газе структурные единицы движутся полностью хаотично, что обусловлено большой величиной кинетической энергии структурных единиц по сравнению с потенциальной энергией их взаимодействия. На рис.36.1 представлена зависимость потенциальной энергии взаимодействия структурных единиц от расстояния между ними. В газообразном состоянии структурные единицы обладают энергией $\varepsilon_Г$ (рис.36.1).

В жидкости имеет место ближний порядок, когда на расстоянии порядка 1.....100 эффективных радиусов атомов (молекул, ионов) эти структурные единицы расположены упорядочено. При этом структурные единицы обладают энергией $\varepsilon_Ж$, рис.36.1. По степени упорядочения структурных единиц к жидкостям примыкают аморфные тела (стекла, полимеры), которые иногда ошибочно считают твердыми телами.

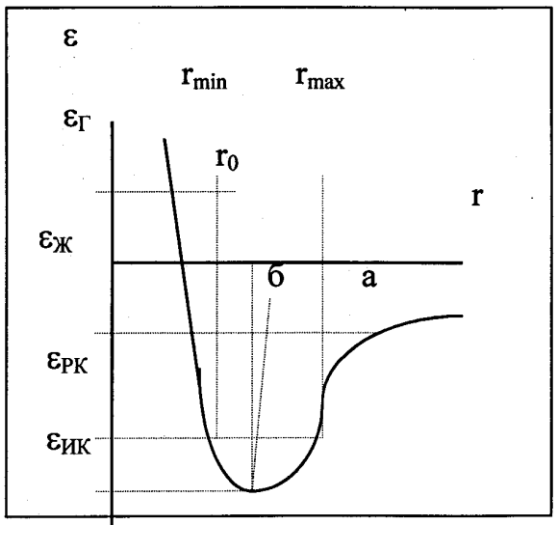


Рис. 36.1

В твердых или кристаллических телах (реальных кристаллах) имеет место как ближний, так и дальний порядок, т.е. структурные единицы,

расположенные упорядоченно на расстоянии 10^5.....10^7 межатомных расстояний. При этом структурные единицы, обладающие энергией ε_{PK} (рис.36.1), совершают колебательные движения вокруг упорядоченно расположенных положений равновесия.

Различные величины межатомных расстояний в различных направлениях обуславливают анизотропию - различие физических свойств кристаллов в различных направлениях. В поликристаллических твердых телах их физические свойства усреднены вследствие того, что кристаллографические направления отдельных зерен ориентированы в пространстве хаотически.

При Т=0 К энергия кристалла минимальна $\varepsilon_{ИК} = \varepsilon_0$ и структурные единицы не совершают тепловых движений, находясь друг от друга на расстоянии r_0. Кинетическая энергия теплового движения молекул при этом равна нулю. Такие объекты называются идеальными кристаллами.

Колебательное движение структурных единиц, возникающее при нагревании вследствие увеличения кинетической энергии $\varepsilon_к \approx$ кТ

$$W = \varepsilon_K + \varepsilon_0, \qquad /1/$$

является ангармоническим, т.к. изображенная на рис.36.1 зависимость потенциальной энергии от расстояния между атомами (сплошная кривая а), описываемая формулой /2/

$$\varepsilon = f(r) = \frac{A}{r^m} - \frac{B}{r^n}, \qquad /2/$$

причем $m > n$, несимметрична относительно r_0 и $(r_{\min} - r_0) \neq (r_{\max} - r_0)$. По

Рис.36.1

этому среднее расстояние между молекулами

$$r_{CP} = \frac{r_{\min} + r_{\max}}{2} \neq r_0 \qquad /3/$$

при нагревании изменяется (это изменение показано пунктирной кривой б на рис.36.1). Следовательно, длина твердого тела, складывающаяся из расстояний между молекулами,

$$L = nr_{CP} \qquad /4/$$

при нагревании изменяется. При фазовом переходе, вследствие изменения структуры и межатомных расстояний, длина твердого тела также изменяется. Поэтому измерения теплового расширения позволяют судить об изменении межатомных расстояний и структуры кристаллических тел.

У большинства веществ в температурной области существования одной фазы длина образца зависит от температуры линейно и обычно увеличивается

$$L = L_0 + L_0\alpha(T - T_0), \qquad /5/$$

где T_0 - некоторая начальная температура (комнатная или 273 К), $\alpha = \frac{dL}{L_0 dT}$ - коэффициент линейного расширения, равный относительному удлинению тела при нагревании на 1 К, L_0 - начальная длина тела, L- длина тела при температуре Т.

Из /5/ можно получить аналогичную зависимость объема от температуры для поликристаллического твердого тела:

$$V = V_0 + V_0\beta(T - T_0), \qquad /6/$$

где V_0 - объем тела при температуре T_0, V - объем при T, а $\beta = \frac{dV}{V_0 dT}$ - коэффициент объемного расширения, равный относительному изменению объема тела при нагревании на 1 К. Можно показать, что для изотропных (например, поликристаллических) твердых тел $\beta \approx 3\alpha$.

Коэффициент линейного расширения определяют с помощью дилатометров. Используемый в данной работе простейший дилатометр состоит из трубчатого нагревателя, в который помещается пробирка с водой и стержнем из испытуемого материала, и устанавливаемого на кронштейне индикатора малых перемещений (микрометрической головки).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Поместить испытуемый стержень в пробирку с водой на 3....5 мин. (до установления теплового равновесия), после чего измерить длину стержня L_0 штангенциркулем. Начальную температуру воды T_0 измерить термометром.
2. Поместить пробирку с водой и стержнем в нагреватель. Привести в контакт со стержнем микрометрическую головку, для чего оттянуть шток индикатора вверх, установить индикатор над стержнем, повернув кронштейн, и опустить шток на конец стержня. Повернуть шкалу до совмещения стрелки с нулевым делением, постукивая при этом по корпусу прибора.
3. Включить нагреватель и, после закипания воды в пробирке и наступления теплового равновесия, измерить абсолютное удлинение $L\text{-}L_0=l$. При этом температура образца равна температуре кипения воды T_K=373 К. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
4. Произвести измерения по пп.1-3 со стержнями из других материалов.
5. Рассчитать значения коэффициента линейного расширения по формуле

$$\alpha = \frac{l}{L_0(T_K - T_0)}. \qquad /7/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Материал	$L_0, 10^{-2}$ м	$\Delta L_0, 10^{-2}$ м	$1, 10^{-5}$м	$\Delta 1, 10^{-5}$м	T_0,К	T,К	ΔT,К

6. Формула для оценки погрешности измерения может быть получена из /7/ в соответствие с методическими указаниями «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум»:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \frac{\Delta T_R^2 + \Delta T_0^2}{(T_K - T_0)^2}}. \qquad /8/$$

Т.к. все измерения проводятся один раз, то за абсолютные погрешности измерения длины стержня, абсолютного удлинения стержня и температуры принимается половина цены деления соответствующего прибора:
$\Delta L=5\ 10^{-4}$ м, $\Delta l=5\ 10^{-6}$ м, $\Delta T=0.25$ К. Абсолютная погрешность измерения коэффициента линейного расширения находится по формуле

$$\Delta\alpha = \varepsilon_\alpha \alpha . \qquad /9/$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение твердого тела (реального кристалла).
2. Нарисуйте зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними.
3. Объясните с помощью зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними причины расширения тел при нагревании.
4. Напишите формулу зависимости длины тела от температуры.
5. Дайте определение коэффициента линейного расширения тела. В каких единицах он измеряется?
6. От чего зависит коэффициент линейного расширения тела?

ЛИТЕРАТУРА

12. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 60.
13. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.5.1, II.6.1, II.6.4.
14. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум. / Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА - 2002, - 35 с.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1. Физические постоянные (константы).

Физическая постоянная	Обозначение	Значение постоянной
Постоянная Больцмана	k	$1{,}38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Газовая постоянная (молярная)	R	8,31451 Дж/(моль·К)
Гравитационная постоянная	G	$6{,}67260\ 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2
Абсолютный нуль температуры	T_0	0К=-273,15 ^{0}С
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}02214 \cdot 10^{26}$кг·моль$^{-1}$
Нормальный молярный объём	$V_н$	22,41383 м^3/моль
Ускорение свободного падения	g	9,80665 м/с^2
Число Фарадея	F	$9{,}648456\ 10^4$ Кл/моль
Атомная единица массы	а.е.м.	$1{,}66054\ 10^{-27}$ кг

Таблица 2. Ускорение свободного падения на различных широтах на уровне моря g, 10^{-2} м/с^2

Широта	0^0	1^0	2^0	3^0	4^0	5^0	6^0	7^0	8^0	9^0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0^0	978,030	,032	,036	,044	,055	,069	,086	,107	,130	,156
10^0	978,186	,218	,253	,291	,332	,376	,422	,471	,523	,577
20^0	978,634	,693	,754	,818	,884	,952	,022	,094	,168	,244
30^0	979,321	,400	,481	,563	,646	,730	,815	,902	,989	,077
40^0	980,166	,255	,345	,435	,525	,616	,706	,797	,887	,977
50^0	981,066	,155	,244	,331	,418	,504	,588	,672	,754	,835
60^0	981,914	,992	,068	,142	,215	,285	,355	,420	,485	,547
70^0	982,606	,663	,718	,770	,820	,867	,911	,952	,990	,026
80^0	983,058	,088	,115	,138	,159	,176	,190	,201	,209	,214
90^0	983,216									

Таблица 3. Упругие постоянные твёрдых веществ
Модуль Юнга E, модуль сдвига G, отношение Пуассона μ.
Упругие константы материала зависят от технологии обработки. Приводимые значения приближённые.

Вещество	E, 10^{10} Н/м^2	G, 10^{10} Н/м^2	μ
Алюминий	7,05	2,63	0,345
Железо	21,2	8,2	0,29
Сталь	20,9	8,12	0,293
Стали легированные	21,0-22,0		
Стали углеродистые	20,0-21,0		
Медь	12,98	4,83	0,34
Латунь	9,7-10,2	3,5	0,34-0,40

Таблица 4. Плотность ρ при 20^0C, температурные коэффициенты линейного α и объемного β расширения (при 0-100^0C) веществ и материалов

Вещество, материал	ρ, 10^3 кг/м^3	α, 10^{-5} ^{0}C^{-1}	β, 10^{-5} ^{0}C^{-1}
1	2	3	4
Алюминий	2,71	2,38	
Дюралюминий (95%Al,4%Cu)	2,79	2,26	
Железо кованое	7,874	1,19	
Железо литое	7,85	1,02	
Чугун	7,6	1,00	
Сталь углеродистая	7,85	1,17	
Сталь нержавеющая	7,70-7,90	1,06-1,60	

Медь	8,96	1,66	
Латунь	8,30-8,70	1,84	
Бронза (80%Cu, 20%Sn)		1,75	
Титан	4,5		
Свинец	11,350	2,90	
Лёд	0,917		
Кирпич (при t=20^{0}C)		0,3-0,9	
Гравий(насыпная)	1,50-1,70		
Земля сухая(насыпная)	1,40-1,60		
Песок сухой(насыпная)	1,20-1,65		
Кварцевое стекло	0,6	0,6	
Стекло лабораторное		0,79-0,85	
Стекло оконное (20-200^{0}C)		1,0	
Фарфор		0,25-0,40	
Масло касторовое	0,960		
Трансформаторное масло	0,884.		
Керосин	0,800		96,0
Бензин			100-124
Этиловый спирт	0,789-0,791		108
Ацетон			143

Таблица 5. Коэффициент линейного расширения α,10^{-6} $К^{-1}$

Материалы	Температура, К				
	0	40	100	200	300
Алюминий	0	1	11	19,5	23
Медь	0	1	9,5	15	17,5
Сталь	0	0,5	5	10	11,5
Стекло (пирекс)	0	-0,5	1,6	2,5	3,2

Таблица 6.Плотность дистиллированной воды при различных температурах

t, ^{0}C	T, К	ρ, 10^3 кг/м^3	t, ^{0}C	T, К	ρ, 10^3 кг/м^3
-10	263	0,998150	24	297	0,997299
-5	268	0,999300	25	298	0,997047
0	273	0,999841	26	299	0,996785
1	274	0,999901	27	300	0,996515
2	275	0,999941	28	301	0,996235
3	276	0,999965	29	302	0,995946
4	277	0,999973	30	303	0,995649
5	278	0,999965	31	304	0,99537
6	279	0,999941	32	305	0,99505
7	280	0,999902	33	306	0,99472

8	281	0,999849	34	307	0,99440
9	282	0,999782	35	308	0,99406
10	283	0,999701	40	313	0,992210
11	284	0,999606	50	323	0,98804
12	285	0,999498	60	333	0,98231
13	286	0,999377	70	343	0,97779
14	287	0,999244	80	353	0,97180
15	288	0,999099	90	363	0,96531
16	289	0,998943	100	373	0,95835
17	290	0,998775	150	423	0,9173
18	291	0,998596	200	473	0,8628
19	292	0,998406	250	523	0,794
20	293	0,998205	300	573	0,810
21	294	0,997994	350	623	0,574
22	295	0,997772	374,15	647,15	0,307
23	296	0,997540			

Таблица 7.Зависимость плотности этилового спирта от температуры

t, ^{0}C	10	15	20	25	30	35
T,K	283	288	293	298	303	308
ρ, 10^3 кг м$^{-3}$	0,7979	0,7936	0,7893	0,7851	0,7809	0,7767

Таблица 9.Коэффициент поверхностного натяжения воды и этилового спирта при различных температурах

Вещество	t ^{0}C	0	5	10	15	20	25
Вода	$\sigma 10^{-3}$ н/м	75,60	74,83	74,22	73,33	72,71	71,81
Спирт этиловый	$\sigma 10^{-3}$ н/м	24,22		23,14		22,32	
	t ^{0}C	30	35	40	45	50	60
Вода	$\sigma 10^{-3}$ н/м	71,17	70,29	69,55	68,60	67,91	66,18
Спирт этиловый	$\sigma 10^{-3}$ н/м	21,70		20,60		19,80	19,10
	t ^{0}C	70	80	90	100	120	150
Вода	$\sigma 10^{-3}$ н/м	64,42	62,61	60,75	58,85	54,9	48,63
Спирт этиловый	$\sigma 10^{-3}$ н/м			16,4		13,4	10,1
	t ^{0}C	180	210	240	300	370	
Вода	$\sigma 10^{-3}$ н/м	42,25	35,4	28,57	14,40	0,47	
Спирт этиловый	$\sigma 10^{-3}$ н/м	6,7	3,3	0,1			

1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

При изучении теории электрических явлений в процессе выполнения лабораторных работ студенты проводят измерения физических величин с помощью электроизмерительных приборов. При этом они должны научиться определять тип прибора по обозначениям на шкалах и т.п.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы классифицируют по следующим признакам:

1) по роду измеряемой величины;
2) по виду тока;
3) по типу отсчетного устройства;
4) по принципу действия;
5) по классу точности прибора.

Классификация основных типов электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины приведена в таблице 1.

Таблица 1

Род измеряемой величины	Название прибора	Условное обозначение на шкале
Сила тока I	Амперметр	A
Сила тока I	Килоамперметр	kA
Сила тока I	Миллиамперметр	mA
Сила тока I	Гальванометр	G
Напряжение U	Вольтметр	V
Напряжение U	Киловольтметр	kV
Напряжение U	Милливольтметр	mV
Сопротивление R	Омметр	Ω
Сопротивление R	Мост сопротивлений	Ω
Электрическая мощность P	Ваттметр Киловаттметр	W kW
Электрическая энергия W	Счетчик ватт-часов киловатт-часов	Wh kWh
Количество электричества Q	Счетчик ампер-часов Куметр	Ah Q
Фаза φ	Фазометр	$\cos\varphi$

По виду тока электроизмерительные приборы подразделяются на предназначенные для измерения постоянного тока (обозначение на шкале прибора: постоянного (—)), переменного (~), трехфазного и т.п.

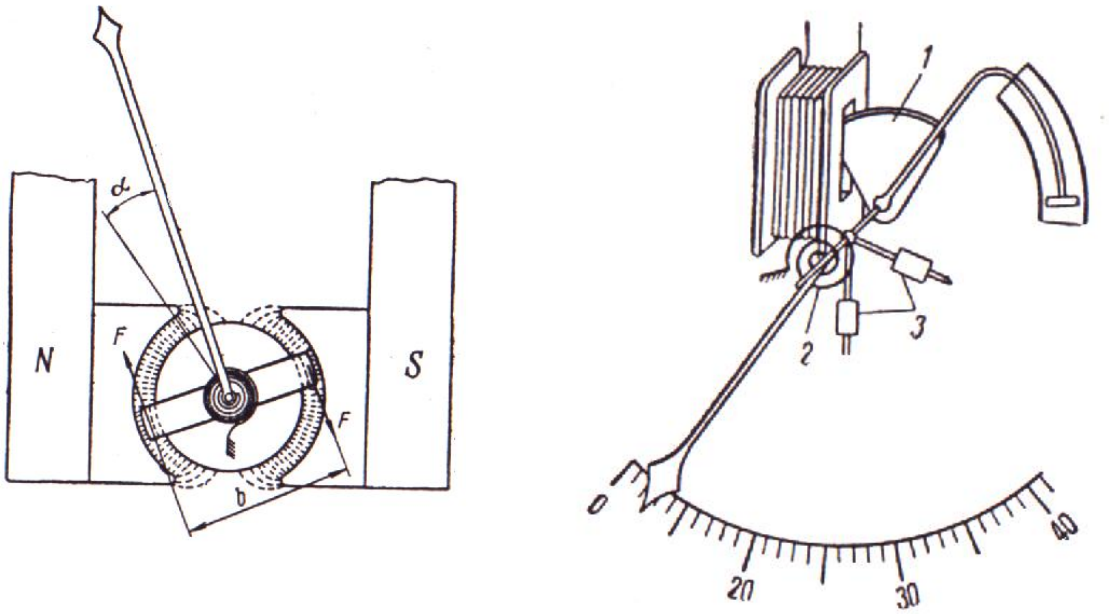
По типу отсчетного устройства электроизмерительные приборы бывают стрелочные, цифровые, самопишущие, цифропечатающие, осциллографы и др.

1.2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы по принципу действия делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, термоэлектрические, вибрационные и др. Наиболее распространенными для лабораторных измерений являются приборы первых трех систем.

1.2.1. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии между магнитным полем постоянного магнита и подвижной катушки (рамки), по которой проходит измеряемый ток (рис.1а).



а б

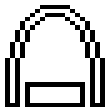
Рис.1. Приборы магнитоэлектрической (а) и электромагнитной (б) систем

При наличии в подвижной рамке электрического тока на нее со стороны магнитного поля действует вращающий момент силы, пропорциональный силе тока. В результате рамка со стрелкой поворачивается на некоторый угол до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом упругой силы, создаваемым возвращающей пружиной. Так как индукция поля во всех точках зазора постоянного магнита одинакова и направлена радиально, а противодействующий момент силы пружин пропорционален углу поворота подвижной рамке со стрелкой, то отклонение стрелки пропорционально измеряемому току.

Поэтому шкала магнитоэлектрических приборов равномерная, что является одним из достоинств приборов этой системы. К достоинствам приборов магнитоэлектрической системы можно отнести и следующие: а) высокие точность и чувствительность; б) малое влияние внешних магнитных полей и температуры; в) малую потребляемую мощность. Недостатками являются: а) пригодность только для постоянного тока; б) чувствительность к электриче-

ским перегрузкам и механическим воздействиям; в)относительно высокая стоимость.

Приборы магнитоэлектрической системы используют в качестве гальванометров, амперметров и вольтметров в цепях постоянного тока. При наличии детектирующего устройства их используют и для измерений в цепях переменного тока.

На шкале прибора эта система обозначается знаком 
Кроме того, на шкале значком ⎓ указывается то, что прибор может измерять только постоянный ток.

1.2.2. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

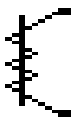
Принцип их работы основан на взаимодействии магнитного поля, образуемого измеряемым током при прохождении его по обмотке неподвижной рабочей катушки с щелевым зазором, и подвижного сердечника в виде диска специальной формы из ферромагнитного сплава, укрепленного эксцентрично на оси со стрелкой. При пропускании тока через катушку диск втягивается в нее и стрелка отклоняется. Противодействующий момент силы создается пружиной. На одной оси со стрелкой также закреплен воздушный успокоитель (демпфер), гасящий колебания стрелки (рис.1б). Момент силы взаимодействия между магнитным полем и ферромагнитным диском только приблизительно пропорционален квадрату силы тока, а противодействующий момент силы пропорционален углу поворота, и шкала электромагнитных приборов неравномерная.

Приборы данной системы пригодны для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока, поскольку направление момента силы, действующего на ферромагнитный диск, не зависит от направления тока, протекающего по обмотке прибора.

Достоинствами электромагнитных приборов являются: а) пригодность для измерений постоянного и переменного тока; б) простота конструкции и сравнительная дешевизна; в) пригодность для измерений больших токов без вспомогательных приспособлений (шунтов, трансформаторов тока); г) устойчивость к токовым перегрузкам и механическим воздействиям.

К недостаткам следует отнести: а) неравномерность шкалы; б) низкую чувствительность; в) зависимость показаний от внешних магнитных полей.

Приборы электромагнитной системы применяются в качестве амперметров и вольтметров.

На шкале прибора эта система обозначается знаком 
Кроме того, на шкале значком ≂ указывается то, что прибор может измерять постоянный и переменный ток.

1.2.3. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по двум катушкам. Одна из них неподвижна, а вторая может поворачиваться вокруг оси внутри

первой. В обоих случаях вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален квадрату силы тока, протекающего через прибор, и $\cos\varphi$ между фазами переменных тока и напряжения, рис.2. Поэтому приборы электродинамической системы имеют неравномерную шкалу.

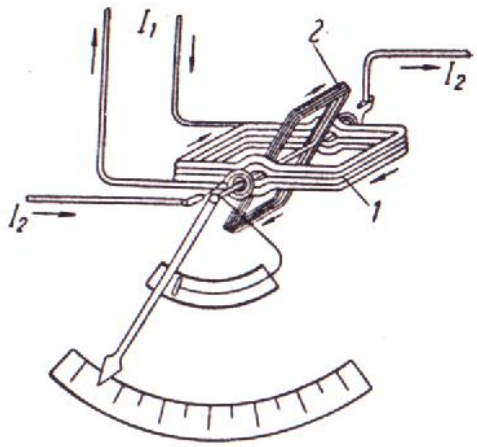


Рис.2. Прибор электродинамической системы

Электродинамические приборы можно применять для измерений в цепях и постоянного, и переменного тока.

Приборы электродинамической системы могут применяться в качестве амперметров, вольтметров и ваттметров. В первом случае обе катушки включаются в цепь последовательно с нагрузкой, во втором - параллельно. В третьем случае одна (токовая) катушка включается последовательно с нагрузкой, а другая (катушка напряжения) - параллельно.

Достоинства электродинамических приборов: а) высокая точность и чувствительность; б) возможность измерений как постоянного, так и переменного тока; в) возможность непосредственного измерения мощности (использования прибора в качестве ваттметра).

Недостатками приборов данной системы являются: а) чувствительность к токовым и механическим перегрузкам, большая потребляемая мощность; б) неравномерная шкала; в) сравнительно высокая стоимость.

На шкале прибора эта система обозначается знаком ⏥. На шкале знаком ≃ указывается то, что прибор может измерять постоянный и переменный ток.

1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, МОЩНОСТИ

Электроизмерительные приборы рассмотренных систем, как правило, имеют малый предел измерения, т.е. могут служить в качестве гальванометров. Для расширения предела измерения прибора как амперметра к нему нужно подключить параллельно шунт, а в качестве вольтметра – последовательно добавочное сопротивление.

1.3.1. АМПЕРМЕТРЫ

Приборы, предназначенные для измерения силы тока - амперметры - включаются последовательно с измеряемым участком цепи. В этом случае сила тока, проходящего через прибор и измеряемый участок, одинакова. Однако, включение амперметра последовательно с измеряемым участком увеличивает сопротивление участка, что приводит к уменьшению силы тока на

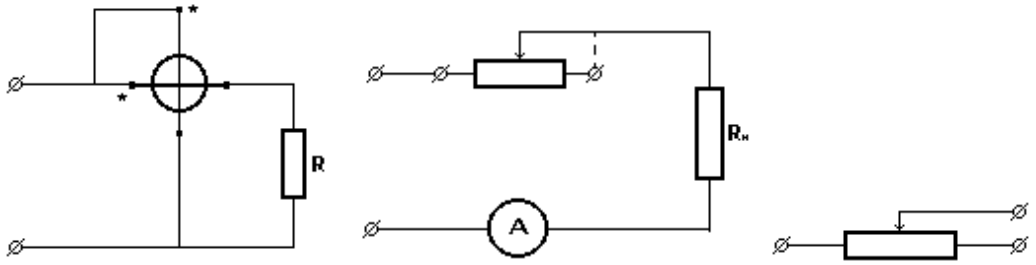
участке, по сравнению с истинным. Для того чтобы включение амперметра не изменяло заметно тока в цепи, его внутреннее сопротивление должно быть достаточно малым по сравнению с сопротивлением участка. Идеальным является амперметр с нулевым сопротивлением.

1.3.2. ВОЛЬТМЕТРЫ

Вольтметры предназначены для измерения электрического напряжения и подключаются параллельно измеряемому участку. При этом падения напряжения на приборе и нагрузке одинаковы. Для того чтобы подключение вольтметра мало влияло на падение напряжения на нагрузке, его сопротивление должно быть значительно больше, чем сопротивление нагрузки. Идеальным является вольтметр с бесконечно большим сопротивлением.

1.3.3. ВАТТМЕТРЫ

Измерение электрической мощности, потребляемой на участке цепи, можно производить с помощью амперметра и вольтметра $P = U * I$. Непосредственный отсчет мощности можно осуществить с помощью приборов электродинамической системы, имеющих две катушки. Ваттметр имеет четыре клеммы и подключается согласно схеме на рис.3а.



а б в

Рис.3 - Подключение прибора электродинамической системы как ваттметра (а). Подключение реостата как дополнительного сопротивления (б) и как делителя напряжения (в)

1.4. РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1.4.1. РЕОСТАТЫ

Реостаты - это устройства, служащие для изменения сопротивления электрической цепи. При этом изменяется сила тока в цепи и напряжение на ее участках. В лабораториях при небольших токах применяют ползунковые реостаты. Такой реостат состоит из проволоки, намотанной на керамический каркас. На реостате имеются три клеммы: две нижние - для подключения концов обмотки, и верхняя - для подключения ползунка. Путем перемещения ползунка можно менять число витков проволоки, введенной в цепь, меняя величину вводимого сопротивления. В качестве материала для проволоки берут сплавы, обладающие высоким удельным сопротивлением (константан, манганин, нихром и др.).

1.4.1.1. Включение реостата для регулирования силы тока

Реостат включается в цепь последовательно: к одной из нижних клемм и клемме ползунка (рис.53). Вторая нижняя клемма остается неподключенной. При перемещении ползунка меняется сопротивление и ток в цепи. Перед подключением источника тока ползунок должен быть передвинут к свободной нижней клемме. В этом случае ток будет минимальным. Сопротивление реостата подбирают как минимум на порядок большим, чем сопротивление остальной цепи. Недостаток ограничителя тока в том, что с его помощью нельзя уменьшить ток до нуля.

1.4.1.2. Включение реостата для регулирования напряжения (как делителя напряжения или потенциометра)

В этом случае используются все три клеммы реостата (рис.3в). Полное сопротивление реостата подключается нижними клеммами к источнику напряжения. Если необходимо подать на потребитель не все напряжение источника U_o, а его часть, то рабочий участок цепи подключают между одной из нижних клемм и ползунком. При увеличении сопротивления той части реостата, к которой подключена рабочая цепь, увеличивается напряжение U, подаваемое на нагрузку. Перед подключением источника энергии ползунок должен быть передвинут к той нижней клемме, от которой отходят два провода (на источник тока и на нагрузку). В этом случае U=0. Сопротивление реостата выбирают на порядок меньше, чем сопротивление остальной цепи. В этом случае напряжение на ней будет меняться примерно пропорционально смещению ползунка от крайнего положения.

1.5. ПОГРЕШНОСТИ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является погрешность, т.е. степень приближения его показаний к действительному значению измеряемой величины.

В качестве «истинного» значения измеряемой величины может быть принят результат измерения, выполненного на образцовом приборе.

Разность между показанием рабочего прибора a и истинным значением измеренной величины $a_Д$ называется абсолютной погрешностью измерения: $\Delta a = a - a_Д$. Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Величина абсолютной погрешности не дает полного представления о точности измерений, она должна быть сопоставлена с измеряемой величиной. Поэтому при оценке точности измерений используется относительная погрешность, равная отношению абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины: $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_Д} \approx \frac{\Delta a}{a}$. Это отношение выражается в относительных единицах либо в процентах.

Из сравнения показания прибора с действительным значением измеряемой величины следует, что на различных участках шкалы относительная погрешность различна по величине. Поэтому для характеристики точности

электроизмерительных приборов используется приведенная относительная погрешность.

Приведенная относительная погрешность $\varepsilon_{ПРИВ}$ - это отношение минимальной абсолютной погрешности $|\Delta a|_{MIN}$ к предельному (номинальному) значению измеряемой величины, т.е. к пределу измерения прибора a_{MAX}:

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{|\Delta a|_{MIN}}{a_{MAX}} 100\% . \qquad /1/$$

Приведенная относительная погрешность может быть определена через число делений на шкале прибора N:

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{\delta / 2}{a_{MAX}} = \frac{a_{MAX} / 2N}{a_{MAX}} = \frac{1}{2N}, \qquad /2/$$

где δ - цена деления прибора. На практике, вместо $\varepsilon_{ПРИВ}$ используют стандартную приведенную относительную погрешность $\varepsilon_{ПРИВ.СТ}$ - класс точности прибора, который обычно указывают на его шкале.

По классу точности приборы делятся на контрольные или поверочные, имеющие классы точности 0.05, 0.1, 0.2; лабораторные, имеющие классы точности 0.5, 1.0, 1.5, и показывающие, имеющие классы точности 1.5, 2.5, 4.0.

Если класс точности прибора известен, то в качестве минимальной средней абсолютной погрешности при измерениях берется ее значение, определяемое по классу точности используемого прибора:

$$\Delta a_{MIN} = \frac{\varepsilon_{ПРИВ.СТ} * a_{MAX}}{100\%} . \qquad /3/$$

Средняя абсолютная погрешность, полученная в эксперименте, будет всегда больше или равна минимальной средней абсолютной погрешности - $\Delta a_{СР} \geq \Delta a_{MIN}$.

Относительная погрешность измерения зависит от значения измеряемой величины и больше (или равна) класса точности прибора - $\varepsilon_{СР} \geq \varepsilon_{ПРИВ.СТ}$.

Для того чтобы средняя относительная погрешность была близка к классу точности прибора, необходимо подобрать прибор так, чтобы измеряемая величина была близка к его пределу измерения $a \to a_{MAX}$, для чего необходимо, чтобы стрелка прибора находилась во второй половине шкалы $a \geq 0{,}5 a_{MAX}$. Тогда $\varepsilon_{ПРИВ.СТ} \leq \varepsilon_{СР} \leq 2\varepsilon_{ПРИВ.СТ}$. Следовательно, при измерениях с заданной точностью $\varepsilon_{СР}$ необходимо использовать прибор с классом точности $\varepsilon_{ПРИВ.СТ} \geq 0.5\varepsilon_{СР}$.

1.6. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Часто требуется измерять электрические величины в широких пределах с достаточной степенью точности в каждом интервале. Для этой цели удобны многопредельные приборы, в которых изменение пределов достигается включением различных шунтов для амперметров или добавочных сопротив-

лений для вольтметров. Такие наборы различных шунтов или добавочных сопротивлений устанавливают внутри прибора. На панели прибора имеется несколько клемм: одна общая (обозначаемая значками (-) или (*)), а остальные подключены к различным шунтам или добавочным сопротивлениям с соответствующим пределом измерения. Может быть также только пара клемм, и в этом случае изменение пределов измерения производится переключателем на панели прибора.

Как правило, многопредельные приборы имеют одну шкалу, цена деления прибора изменяется при переключении предела. Поэтому цену деления прибора необходимо определять для каждого предела.

Многопредельный прибор надо включать так, чтобы относительная погрешность измерения была близкой к классу точности прибора.

При пользовании многопредельными приборами необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) если заранее не известен диапазон измеряемых величин, прибор первоначально включают на максимальный предел во избежание порчи;

б) до начала измерений определяют приближенное значение измеряемой величины на максимальном пределе, а затем переключают прибор на тот предел, значение которого ближе всего к значению измеряемой величины, оставаясь больше нее.

в) если измеряемая величина увеличивается в процессе эксперимента, то измерения на выбранном пределе продолжают до тех пор, пока стрелка не дойдет до конца шкалы, а затем переходят на следующий предел.

При переходе с одного предела измерения на другой необходимо определять цену деления шкалы на каждом пределе.

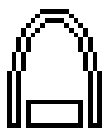
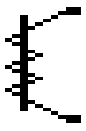
Цена деления определяется как отношение предела измерения, на котором работает прибор, к числу делений его шкалы.

1.7.УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Технические характеристики электроизмерительного прибора обозначаются условными знаками обычно на лицевой стороне его шкалы. На шкале или над клеммами прибора указывается, для измерения каких величин он предназначен.

Обязательно указываются следующие технические характеристики, приведенные в таблице 4.

Таблица 4

Техническая характеристика	Условное обозначение
Система прибора: магнитоэлектрическая	
электромагнитная	

электродинамическая 

Класс точности прибора 0.2, 1.0,....

Прибор предназначен для включения в цепь:

- постоянного тока
- переменного тока
- постоянного и переменного тока

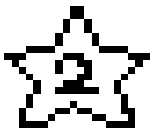


Рабочее положение прибора вертикальное

Рабочее положение прибора горизонтальное



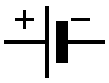
Измерительный механизм изолирован от корпуса, и проведено испытание при напряжении 2 кВ.



1.8. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование — Обозначение

1. Гальванический элемент



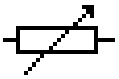
Примечание: знаки полярности можно не ставить.

2. Постоянный резистор (постоянное сопротивление)



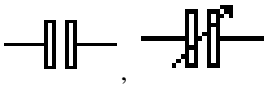
3. Реостат (сопротивление переменное)





Обозначение переменного сопротивления (реостата), включаемого в цепь последовательно

4. Конденсаторы постоянной и переменной емкости



5. Катушка индуктивности (дроссель) без сердечника



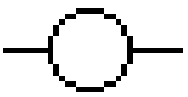
Катушка индуктивности (дроссель) с ферромагнитным сердечником



6. Трансформаторы с сердечником и без сердечника

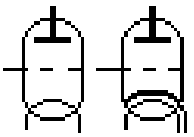


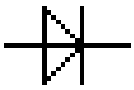
7. Прибор измерительный

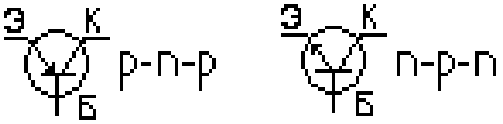


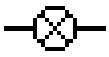
8. Диод вакуумный косвенного накала

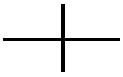


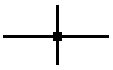
9. Триод вакуумный 

10. Диод полупроводниковый 

11. Транзистор 

12. Лампа накаливания 

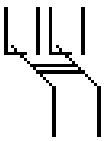
13. Пересечение проводов, электрически не соединенных 

14. Электрические провода с соединением 

15. Заземление 

16. Соединение с корпусом 

17. Выключатель однополюсный (ключ) 

18. Выключатель двойной (на два положения) 

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждый студент, выполняющий лабораторный практикум по физике, ведет два журнала: журнал наблюдений и журнал отчетов. Журнал наблюдений и журнал отчетов могут быть выполнены в виде папки или тетради и должны вестись аккуратно.

В журнале наблюдений приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Расчетные формулы.
3. Таблицы результатов наблюдений.
4. Результаты вычисления искомых физических величин.
5. Конечные результаты.

В журнале отчетов приводятся следующие сведения:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Краткая теория с чертежом и принципиальной схемой установки.
4. Таблица результатов наблюдений.
5. Графики, выполненные на миллиметровой бумаге.
6. Результат и выводы.

Лабораторная работа визируется преподавателем после снятия данных подписью в журнале наблюдений и после оформления - подписью в журнале отчетов. Отчеты без подписи в журнале наблюдений не принимаются. Жур-

нал наблюдений и журнал отчетов студент сдает преподавателю в конце сессии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Цель работы: определение электроемкости конденсаторов и изучение закономерностей последовательного и параллельного соединения конденсаторов.

Приборы и принадлежности**:** конденсатор известной емкости (эталонный), конденсаторы неизвестной емкости, баллистический гальванометр, вольтметр, реостат, источник напряжения, двойной переключатель, ключ, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, называется конденсатором. Простейшим является плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных друг другу проводящих пластин (обкладок), разделенных тонким слоем диэлектрика.

Электроемкостью конденсатора называется величина, численно равная отношению заряда q, находящегося на одной из обкладок, к разности потенциалов между этими обкладками $C = \frac{q}{U}$. /1/

Несколько конденсаторов можно соединить в батарею. При параллельном соединении емкость батареи равна сумме емкостей каждого из конденсаторов $C = \sum_{i=1}^{n} C_i$. /2/

При последовательном соединении емкость батареи рассчитывается по формуле $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$. /3/

В данной работе емкость конденсатора определяется баллистическим гальванометром - прибором, предназначенным для измерения протекающего через него электрического заряда. В процессе измерения на рамку действует момент силы, пропорциональный силе тока $M_{вр} = k_1 \cdot I$. /4/

Под действием этого момента рамка будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент не будет уравновешен моментом кручения пружины, возвращающим рамку в первоначальное положение. Момент кручения пружины пропорционален углу поворота рамки $M_{возвр} = k_2 \cdot \alpha$. /5/

Из условия равновесия следует $k_1 I = k_2 \alpha$. /6/

Отсюда вытекает, что сила тока, протекающего по рамке гальванометра прямо пропорциональна углу поворота рамки

$$I = \frac{k_2}{k_1}\alpha \qquad \text{или} \qquad I = B\alpha, \qquad /7/$$

где B - постоянная баллистического гальванометра.

Баллистический гальванометр отличается от обычных гальванометров тем, что его рамка обладает большим моментом инерции и, следовательно, большим периодом колебаний. Это свойство позволяет измерять величину заряда, прошедшего через гальванометр, при кратковременном импульсе тока. Так как период поворота рамки значительно больше времени разряда Δt, это позволяет измерить угол поворота α. Зная угол α, можно измерить и заряд $q = I\Delta t$, поскольку заряд, протекающий через рамку прибора, пропорционален углу поворота рамки $q = B\alpha$, /8/

Для отсчета угла поворота α на одной оси с рамкой прикрепляется маленькое зеркало, на которое падает узкий луч света от осветителя. Отраженный световой луч попадает на шкалу, по которой ведется отсчет. При повороте рамки на угол α световой луч отклоняется, смещаясь по шкале на n делений. При небольших отклонениях угол поворота рамки α прямо пропорционален отбросу светового луча n, отсчитываемому по шкале.

Измерение емкости баллистическим гальванометром производится методом сравнения. Если эталонный конденсатор с емкостью С зарядить от источника постоянного тока, а затем разрядить через гальванометр, то на основании /8/ и учитывая, что заряд протекающий при разряде конденсатора через гальванометр равен $q = CU$, можно записать

$$CU = B\alpha.. \qquad /9/$$

Заменив эталонную емкость С неизвестной емкостью C_x, получим:

$$C_xU_x = B\alpha_x. \qquad /10/$$

Разделив /10/ на /11/, получим $\frac{CU}{C_xU_x} = \frac{\alpha}{\alpha_x}$ или $\frac{CU}{C_xU_x} = \frac{n}{n_x}$. /11/

Отсюда можно определить неизвестную емкость $C_x = C\frac{n_x}{n}\frac{U_x}{U}$. /12/

Если измеряемые емкости незначительно отличаются по величине, конденсаторы удобно заряжать при одном и том же напряжении. В этом случае формула для расчета неизвестной емкости принимает вид $C_x = C\frac{n_x}{n}$. /13/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис.42.1. На схеме схеме: Е - источник постоянного напряжения; $К_1$ - ключ; $К_2$ - кнопка для замыкания накоротко гальванометра с целью гашения колебания рамки; R - реостат, включенный в цепь в качестве делителя напряжения; V – вольтметр; $К_3$ - двойной переключатель; С – конденсатор; Г - баллистический гальванометр.

2.Подключить эталонный конденсатор С. Движок реостата установить в та-

ком положении, чтобы в цепи было минимальное напряжение. Все ключи

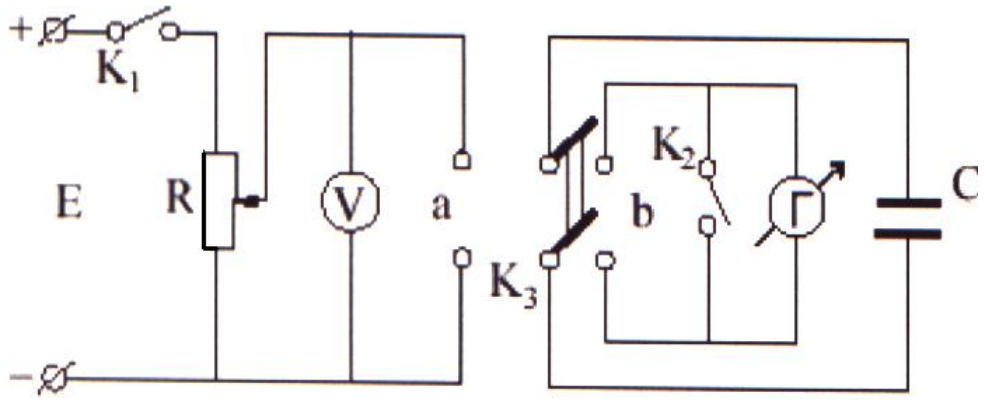


Рис.42.1

разомкнуты.

3.Включить осветитель и установить шкалу так, чтобы на ней получилось резкое изображение нити, совпадающее с нулем шкалы.

4.Включить ключ $К_1$ и, перемещая движок реостата, установить напряжение U = 0,1 В.

5.Зарядить конденсатор, замкнув переключатель $К_2$ на клеммы «а». Затем разрядить конденсатор через гальванометр, замкнув переключатель на клеммы «б». Отсчитать при этом первый максимальный отброс зайчика. Повторить измерения не менее трех раз, предварительно погасив колебания рамки гальванометра кратковременным нажатием на кнопку $К_2$ в момент прохождения светового зайчика через нуль шкалы. Найти среднее значение отклонения зайчика. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Заменить эталонный конденсатор другим - сначала $С_1$, а затем $С_2$ и произвести с ними измерения по пункту 4. Определить емкости этих конденсаторов по формуле /13/.

6.Определить по пунктам 4,5 емкость батарей из конденсаторов $С_1$ и $С_2$, соединенных параллельно и последовательно. Если отброс зайчика по шкале при измерении емкости батареи мал (менее 10 см), то в этом случае увеличить напряжение зарядки в 2-3 раза. Расчет емкости производить по формуле /12/.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№	Измеряемые емкости	Отклонение луча				$С_{изм.}$, мкф	$С_{вычисл.}$, мкф
		1	2	3	Средн.		
1	Эталон						
2	$С_1$						
3	$С_2$						
4	Паралл.соед.						
5	Последов. соед						

7.Данные, полученные в результате измерений при параллельно и последовательно соединенных конденсаторах, сравнить со значениями емкости C_1 и C_2, рассчитанными теоретически при последовательном и параллельном соединении конденсаторов по формулам /2/ и /3/.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое конденсатор?
2. Дайте определение электроемкости конденсатора. В каких единицах измеряется электроемкость?
3. От чего зависит электроемкость конденсатора?
4. Напишите формулу электроемкости плоского конденсатора.
5. Напишите (выведите) формулу для вычисления суммарной емкости батареи конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §93, 94.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - § 26,27.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.4.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43.
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ КИРХГОФА

Цель работы: проверить справедливость правил Кирхгофа для разветвленной цепи.

Приборы и принадлежности: электрическая цепь, смонтированная на панели, вольтметр, два источника питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В разветвленных электрических цепях для расчета токов используют два правила, сформулированные Кирхгофом.

Первое правило относится к узлам цепи. Узлом называется точка, в которой сходятся более чем 2 проводника (рис.43.1). Первое правило Кирхгофа гласит: Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = 0. \qquad /1/$$

При этом, силы токов, текущих к узлу, считаются положительными, а текущие от узла – отрицательными. Так, для узла на рис.43.1, можно записать

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0. \qquad /1a/$$

Первое правило Кирхгофа вытекает из закона сохранения заряда. В цепи заряды не могут накапливаться, поэтому заряд, пришедший в узел за интервал времени Δt должен быть равен заряду, ушедшему из узла за тоже время.

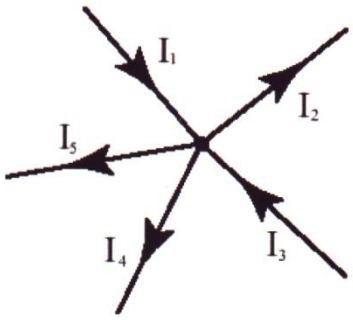


Рис.43.1

Для нахождения неизвестных токов первого правила Кирхгофа недостаточно, так как число независимых уравнений, которое вытекает из него, меньше числа неизвестных токов. Необходимо составить еще несколько независимых уравнений. Для этого применяют второе правило Кирхгофа, которое справедливо для произвольного замкнутого контура в электрической цепи.

Рассмотрим замкнутый контур ABCD (рис.43.2). Зададим направление обхода контура произвольно, например, по часовой стрелке. Применим к каждому из неразветвленных участков контура AB, BC, CD и DA закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I_1R_1 = \phi_B - \phi_A + E_1.$$
$$-I_2R_2 = \phi_c - \phi_B - E_2. \qquad /2/$$
$$-I_3R_3 = \phi_D - \phi_C.$$
$$-I_4R_4 = \phi_A - \phi_D.$$

В этих уравнениях падение напряжения берется со знаком (+), если направление тока совпадает с направлением обхода контура и со знаком (-), если направление обхода контура и направление тока противоположны.

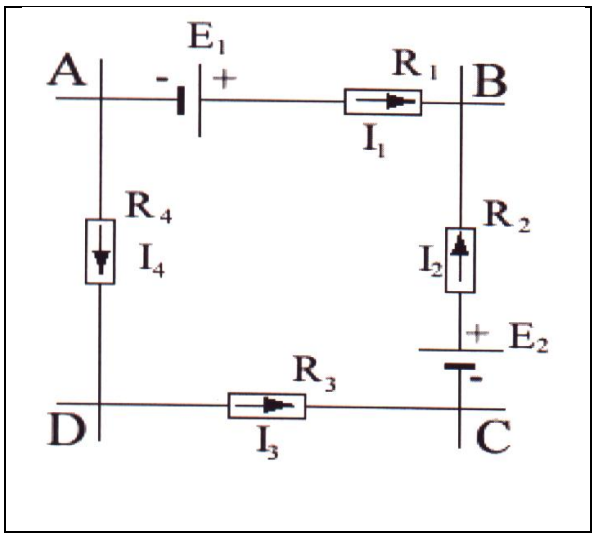


Рис.43.2

Значение Э.Д.С. берется со знаком (+), если направление обхода контура совпадает с направлением от отрицательного полюса источника тока к положительному полюсу, и со знаком (-) - в противном случае.

При сложении уравнений /2/ получаем:

$$I_1R_1 - I_2R_2 - I_3R_3 - I_4R_4 = E_1 - E_2$$

В общем случае получаем уравнение

$$\sum_K I_к R_к = \sum_n E_n\,, \qquad /2/$$

которое выражает второе правило Кирхгофа: В произвольном замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма Э.Д.С. равна алгебраической сумме падений напряжений на соответствующих участках контура.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Начертить в тетради рабочую схему, собранную на панели. Записать в таблицу 1 результатов наблюдений значения всех сопротивлений, обозначив их на схеме соответствующим образом. Величины сопротивлений даны с точностью ± 1%.

2.Подключить источники тока к клеммам, расположенным на панели. С помощью вольтметра определить полярность подключения источников и обозначить ее на схеме.

3.Определить цену деления вольтметра. Измерить вольтметром значения Э.Д.С.(*E*) и падений напряжения (*U*) на всех участках и записать их в таблицу 1 результатов наблюдений. Пользуясь обозначением полярности клемм на вольтметре, определить направления токов на всех участках цепи и показать их стрелками на схеме (направление тока принято брать от положительного полюса вольтметра к отрицательному).

4.Вычислить абсолютные погрешности измеренных значений напряжений и Э.Д.С. по классу точности прибора ε и пределу его измерения $U_{пред}$.

$$\Delta U(\Delta E) = < \varepsilon > \cdot U_{пред} \qquad /3/$$

и относительные погрешности $$\varepsilon_u = \frac{\Delta U}{U}. \qquad /4/$$

5.Используя закон Ома, рассчитать значения сил токов на каждом участке цепи. Вычислить относительные погрешности измерения токов по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_u^2 + \varepsilon_R^2} \qquad /5/$$

и абсолютные погрешности измерения токов по формуле $\Delta I = \varepsilon_I I$. /6/

Данные занести в таблицу 1 результатов наблюдений.

Таблица 1 результатов наблюдений

Участок Величина	1	2	3
E, В			
ΔE, В			
R, Ом			
$\varepsilon_R = \Delta R/R$			
U, В			
ΔU, В			
$\varepsilon_U = \Delta U/U$			
I, 10^{-3} А			
ΔI, 10^{-3} А			
$\varepsilon_I = \Delta I/I$			

6.Для узлов и контуров, заданных преподавателем, проверить справедливость правил Кирхгофа. При этом левые и правые части уравнений, выражающих правила Кирхгофа, должны отличаться на величину, не превышающую погрешности каждой из этих сумм:

$$\left|\sum_k I_k\right| \le \Delta\left(\sum_k I_k\right) \qquad /7/$$

$$\left|\sum_k U_k - \sum_n E_n\right| \le \Delta\left(\sum_k U_k - \sum_n E_n\right) \qquad /8/$$

Погрешности сумм определяются выражениями

$$\Delta\left(\sum_k I_k\right) = \sqrt{(\Delta I_1)^2 + (\Delta I_2)^2 + \ldots\ldots + (\Delta I_k)^2} \qquad /9/$$

$$\Delta\left(\sum_k U_k - \sum_n E_n\right) = \sqrt{(\Delta U_1)^2 + \ldots + (\Delta U_k)^2 + (\Delta E_1)^2 + \ldots + (\Delta E_n)^2}\,. \qquad /10/$$

Таблица 2. Результаты проверки первого правила Кирхгофа

Узел	$\lvert\Sigma I_k\rvert$	$\Delta(\Sigma I_k)$

Таблица 3. Результаты проверки второго правила Кирхгофа

Контур	$\lvert\Sigma U_k\rvert$	$\lvert\Sigma E_n\rvert$	$\lvert\Sigma U_k\rvert - \lvert\Sigma E_n\rvert$	$\Delta(\lvert\Sigma U_k\rvert - \lvert\Sigma E_n\rvert)$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сила тока? В каких единицах она измеряется?
2. Что такое электродвижущая сила источника тока? В каких единицах она измеряется?
3. Что такое падение напряжения? В каких единицах оно измеряется?
4. Сформулируйте 1 правило Кирхгофа и запишите его математическое выражение. Из какого закона вытекает это правило?
5. Сформулируйте 2 правило Кирхгофа и запишите его математическое выражение. Из какого закона вытекает это правило?
6. Как определяется направление тока на участке цепи с помощью вольтметра?
7. Сформулируйте правила определения знаков токов, падений напряжений и Э.Д.С. источников в 1 и 2 правилах Кирхгофа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §101.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - § 36.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.8.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: измерить сопротивление катушки мостом постоянного тока и определить удельное сопротивление материала проводника.

Приборы и принадлежности: измерительный мост постоянного тока, катушка (обмотка реостата), штангенциркуль, линейка, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Сопротивление однородного проводника постоянного поперечного сечения можно определить по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \qquad /1/$$

где ρ - удельное сопротивление материала проводника, l - длина проводника, S – площадь поперечного сечения проводника. Измерив сопротивление, длину и площадь поперечного сечения проводника, можно рассчитать его удельное сопротивление

$$\rho = \frac{RS}{l}. \qquad /2/$$

Сопротивление в данной работе определяется с помощью моста постоянного тока. Мост постоянного тока предназначен для измерения сопротивления методом сравнения. Схема простейшего моста изображена на рис.44.1. Он состоит из четырех сопротивлений, образующих замкнутый четырехугольник: R – искомое сопротивление; R^* - магазин сопротивлений, с помощью которого можно набирать различные значения сопротивления в широком диапазоне; R_1 и R_2 - известные сопротивления. В одну диагональ моста (AC) включен источник тока, в другую (BD) - чувствительный гальванометр Г. Если замкнуты ключи K_1 и K_2, то по параллельным ветвям ABC, ADC и в цепи гальванометра пойдут токи, показанные на рисунке. Падения напряжения на всех четырех сопротивлениях определяются из закона Ома

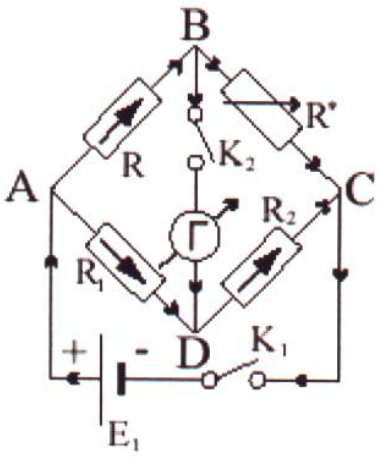


Рис.44.1

$$U = \varphi_B - \varphi_A = IR; \quad U^* = \varphi_C - \varphi_B = I^* R^*;$$
$$U_1 = \varphi_D - \varphi_A = I_1 R_1; \quad U_2 = \varphi_C - \varphi_D = I_2 R_2. \qquad /3/$$

Подбирая соответствующим образом сопротивления, можно добиться, чтобы падения напряжения на участках AB и AD, BC и DC были одинаковы

$$I_1 R_1 = IR \quad \text{и} \quad I^* R^* = I_2 R_2. \qquad /4/$$

В этом случае потенциалы точек B и D будут одинаковы ($\varphi_B = \varphi_D$) и ток в цепи гальванометра $I_г$ будет равен 0. Отсюда по первому правилу Кирхгофа

$$I = I^*, \quad I_1 = I_2. \qquad /5/$$

Такое состояние моста называется уравновешенным. Из равенств (4) и (5) следует $$\frac{R}{R^*}=\frac{R_1}{R_2}. \qquad /6/$$

Зная величины сопротивлений R^*, R_1, R_2 можно определить неизвестное сопротивление $$R=\frac{R_1}{R_2}\cdot R^*. \qquad /7/$$

Равновесия моста можно добиться, изменяя R^*, а также R_1 и R_2. Обычно задаются не значения сопротивлений R_1 и R_2, а их отношение

$$n=\frac{R_1}{R_2}. \qquad /8/$$

Тогда $$R=n\cdot R^*. \qquad /9/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью моста постоянного тока измерить сопротивление R реостата. Измерения производить согласно инструкции, данной на рабочем месте.
2. Измерить внешний диаметр витка D штангенциркулем и длину намотки реостата L линейкой.
3. Подсчитать число витков N. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
4. Определить диаметр проволоки по формуле $$d=\frac{L}{N} \qquad /10/$$
5. Определить средний диаметр витка $$D_{\text{ср}}=D-d. \qquad /11/$$
6. Площадь поперечного сечения провода равна $$S=\frac{\pi d^2}{4}=\frac{\pi L^2}{4N^2}. \qquad /12/$$
7. Длина проволоки равна $$l=\pi D_{\text{ср}}N. \qquad /13/$$
8. Определить удельное сопротивление проводника, из которого изготовлен реостат по формуле $$\rho=\frac{RL^2}{4D_{\text{ср}}N^3} \qquad /14/$$
9. Формулу относительной погрешности $\varepsilon_\rho=\frac{\Delta\rho}{\rho}$ можно вывести из выражения /15/. При выводе формулы относительной погрешности воспользуемся соотношением

$$\varepsilon_\rho=\frac{\Delta\rho}{\rho}=\sqrt{\left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial R}\Delta R\right]^2+\left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial L}\Delta L\right]^2+\left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial D}\Delta D\right]^2+\left[\frac{\partial(\ln\rho)}{\partial N}\Delta N\right]^2}, \qquad /15/$$

откуда $$\varepsilon_\rho=\frac{\Delta\rho}{\rho}=\sqrt{\left[\frac{1}{R}\Delta R\right]^2+\left[\frac{2}{L}\Delta L\right]^2+\left[\frac{1}{D}\Delta D\right]^2+\left[\frac{3}{N}\Delta N\right]^2}. \qquad /16/$$

10. Рассчитать относительную погрешность измерения удельного сопротивления по формуле /16/ и абсолютную погрешность измерения удельного со-

противления по формуле $\Delta\rho = \rho\varepsilon_\rho$. При вычислении относительной погрешности измерения удельного сопротивления принять:

$\frac{\Delta R}{R}$ = 0,005= ± 0,5 % (величина определяется по классу точности прибора);

$\Delta L = К_\alpha \frac{\delta}{3}$ - (абсолютная погрешность измерения линейкой $\delta = \pm 0{,}5$мм);

$\Delta D_{ср} = \Delta D = K_\alpha \frac{\delta}{3}$ - (абсолютная погрешность измерения штангенциркулем $\delta = \pm 0{,}05$ мм);

$К_\alpha = 2$ - коэффициент Гаусса при надежности $\alpha = 0{,}95$;

$\Delta N = \pm 1$ виток.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

R, Ом	$\frac{\Delta R}{R}$	L, м	ΔL, м	$\frac{\Delta L}{L}$	D, 10^{-2}м	ΔD, 10^{-2}м	$\frac{\Delta D}{D}$	N	ΔN	$\frac{\Delta N}{N}$	$D_{СР}$, 10^{-2}м

Записать результат в виде $\rho = \rho_{ср} \pm \Delta\rho$; ε_ρ=.....%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сопротивление проводника? В каких единицах оно измеряется?
2. От чего зависит сопротивление проводника?
3. Запишите формулу для вычисления сопротивления однородного проводника постоянного сечения.
4. Что такое удельное сопротивление материала? В каких единицах оно измеряется?
5. Запишите (выведите) формулу для вычисления сопротивления проводников при их последовательном и параллельном соединении.
6. Изобразите схему моста Уитстона. Для какой цели в нее включен гальванометр?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §98,101.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §34.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике.// Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §III.8.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КОНТАКТА ПОЛУПРОВОДНИКОВ p- и n- ТИПА

Цель работы: ознакомиться с особенностями проводимости p-n перехода и снять вольт - амперную характеристику полупроводникового диода.

Приборы и принадлежности: набор полупроводниковых диодов различных типов, многопредельный миллиамперметр постоянного тока, панель с добавочными сопротивлениями, вольтметр постоянного тока, реостат, коммутирующий ключ (переключатель), источник постоянного тока.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Контакт примесных полупроводников p- и n- типа называется p-n переходом. При контакте электронного (n-типа) и дырочного (p-типа) полупроводников через поверхность соприкосновения происходит диффузия основных носителей тока - электронов из n- полупроводника в p-, а дырок из p- в n-. В результате диффузии в пограничном слое возникает двойной заряженный слой рис.47.1. Напряженность электрического поля, возникающего в зоне контакта, направлена от n – области, заряженной положительно, к p- области, заряженной отрицательно. Это поле препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. При некоторой напряженности $\overline{E'}$ этого поля установится динамическое равновесие носителей тока.

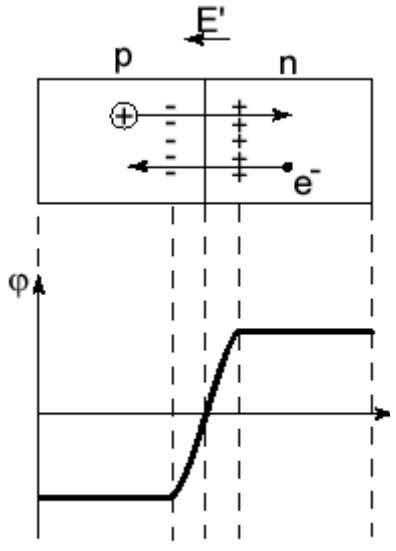


Рис.47.1

Пограничный слой вследствие рекомбинации дырок и электронов обеднен носителями тока и обладает высоким сопротивлением. Этот слой называется запирающим.

Через пограничный слой от p- к n-полупроводнику течет ток основных носителей, а в обратном направлении – ток неосновных носителей. Основными носителями в n-полупроводнике являются свободные электроны, а в p-полупроводнике – дырки. Неосновными носителями в n-полупроводнике являются дырки, в p-полупроводнике – свободные электроны. В отсутствии внешнего поля суммарный ток равен нулю.

Если к p-n переходу приложить внешнее электрическое поле $\overline{E}$ направления, противоположного направлению поля двойного слоя (такое поле называют прямым), подключив к p- полупроводнику «+», а к n-полупроводнику «-

» источника тока, то внешнее поле ослабит внутреннее, и высота потенциального барьера уменьшится. Ток основных носителей, текущий через контакт, увеличится, а ток неосновных носителей не изменится. При одном и том же напряжении ток основных носителей во много раз превышает ток неосновных носителей, так как концентрация основных носителей во много раз превышает концентрацию неосновных. Возникнет суммарный ток, называемый прямым током, как показано на рис.47.2.

Если к p-n переходу приложить внешнее электрическое поле $\bar{E}$ того же направления, что и поле запирающего слоя (такое поле называют обратным), подключив к p- полупроводнику «-», а к n-полупроводнику «+» источника тока, то внешнее поле усилит внутреннее, и высота потенциального барьера возрастет. Это приводит к уменьшению тока основных носителей, а ток неосновных носителей не изменится. Возникнет суммарный ток, называемый обратным, как показано на рис.47.2.

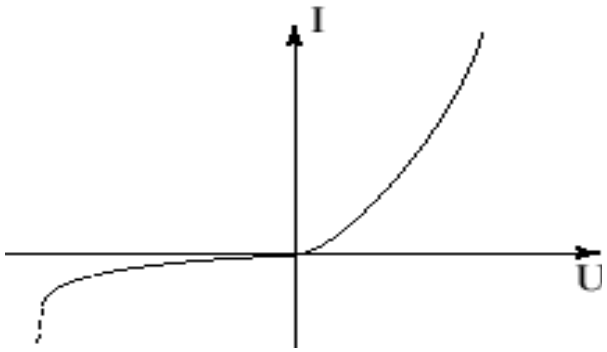


Рис.47.2

Сила прямого и обратного тока через переход зависит от величины приложенного напряжения. Типичная вольт-амперная характеристика p-n-перехода приведена на рис.47.2. Из графика видно, что p-n переход обладает выпрямляющим действием, пропуская ток преимущественно в одном направлении. Полупроводниковые диоды широко применяются в качестве выпрямителей переменного тока.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать схему по рис.47.3а.

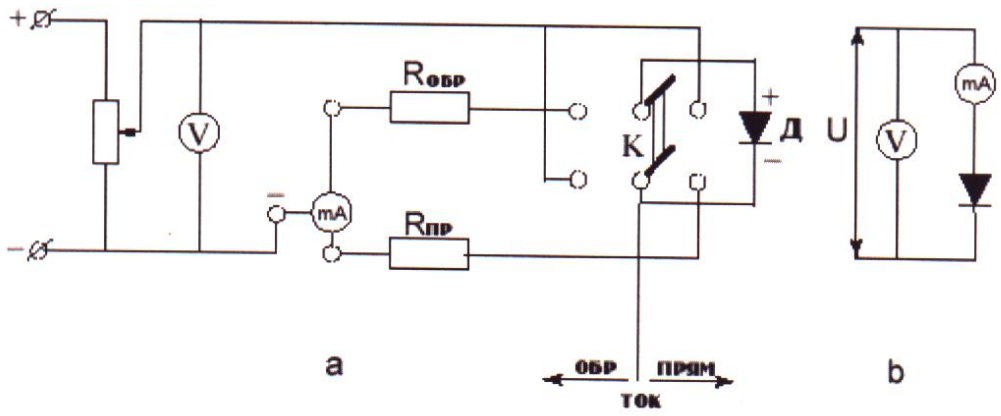


Рис.47.3

На схеме обозначены: R – реостат; V – вольтметр; mA – миллиамперметр; $R_{обр}$, $R_{пр}$ - добавочные резисторы, включаемые для того, чтобы сопротивле-

ние миллиамперметра на обоих пределах было равным 1 кОм; К - переключатель для изменения знака напряжения на диоде (стрелками показано его положение для измерения прямого и обратного тока); Д - диод, исследуемый в работе.

2.После проверки схемы преподавателем подключить ее к источнику питания. Постепенно увеличивая ток от нуля (значения тока согласовать с преподавателем), записывать показания миллиамперметра и вольтметра. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U ,В	1	2	3	4	5	6		и т.д.
I, мА								
$U_Д$, В								

Последняя строка таблицы – напряжение, приложенное к диоду - $U_д$, получается вычитанием силы тока в миллиамперах из соответствующего напряжения на вольтметре, выраженного в вольтах. Возможность таких вычислений определяется тем, что сопротивление амперметра за счет подключения добавочного резистора делается равным R_A = 1 кОм. Из рис.47.3-б следует: $U = U_Д + IR_A$, откуда $U_Д = U - IR_A$. /1/

3.Изменив коммутационным ключом К полярность напряжения на диоде, повторить измерения по п.2 для обратной ветви вольт-амперной характеристики.

4.Повторить п.п. 2 и 3, заменив диод на другой.

5.Результаты измерений изобразить графически, откладывая по оси абсцисс напряжение на диоде - $U_д$, а по оси ординат - ток через диод. Прямой ток и прямое напряжение откладывать в положительном направлении осей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы проводимости существуют в полупроводниках?
2. Какие процессы протекают при контакте p- и n -полупроводников? К чему они приводят?
3. Каков принцип действия полупроводникового диода?
4. Изобразите вольт-амперную характеристику диода, объясните ее вид.
5. Пойдет ли ток через контакт полупроводников в направлении p-n, n-p?
6. Каков механизм возникновения разности потенциалов при контакте p- и n-полупроводников?
7. От чего зависит ток через p-n переход?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §240-243,248.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §53,57-59,64.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §V11.2.8-10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: ознакомиться с одним из методов определения напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянной ЭДС, переключатель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов. Величину проекции напряженности земного магнитного поля Н на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_s. Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана в данной точке, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана . Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклонятся в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

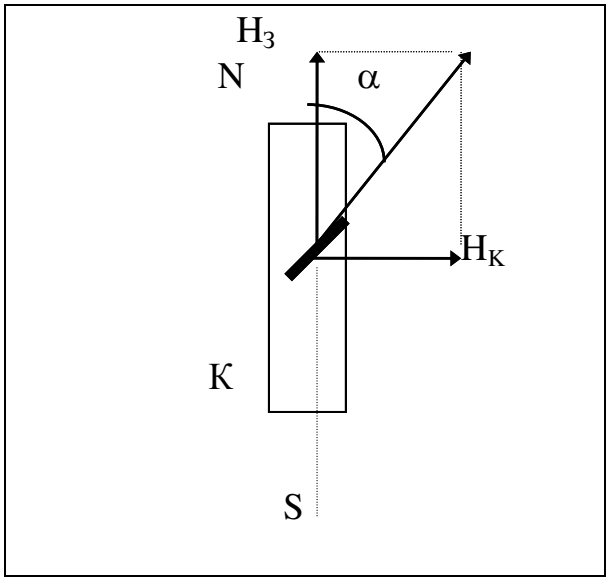


Рис.51.1

Эти свойства магнитной стрелки используются в тангенс-гальванометре для определения H_s. Тангенс-гальванометр (рис.51.1) представляет собой плоскую вертикальную катушку К. В центре катушки в горизонтальной плоскости расположена магнитная стрелка. При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка установится вдоль магнитного меридиана Земли N-S. Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки по ней пропус-

тить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α. Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая напряженности поля Земли H_s и поле, созданное током катушки с напряженностью $H_к$. Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение равновесия, при котором равнодействующая двух полей будет совпадать с линией, соединяющей
полюса стрелки. На рис.51.1 NS – направление магнитного меридиана Земли, вдоль которого устанавливается первоначально магнитная стрелка, помещенная в центре катушки. Магнитное поле, создаваемое катушкой с током в ее центре (вектор $H_к$) направлено перпендикулярно к плоскости витков вдоль оси катушки. Из рис.51.1 видно, что $tg\alpha = {H_K}/{H_3}$. Следовательно

$$H_3 = {H_K}/{tg\alpha}. \qquad /1/$$

Величина напряженности поля $H_к$, созданного током в центре витка, вычисленная по закону Био-Савара-Лапласа для случая кругового тока, равна:

$$H_K = \frac{I}{2r}, \qquad /2/$$

где I - ток, текущий в катушке, r - радиус витка катушки.
Напряженность магнитного поля в катушке с числом витков N вычисляется по формуле /2/ с учетом числа витков. Подставляя значение $H_к$ в формулу /1/, получим:

$$H_3 = \frac{IN}{2rtg\alpha}. \qquad /3/$$

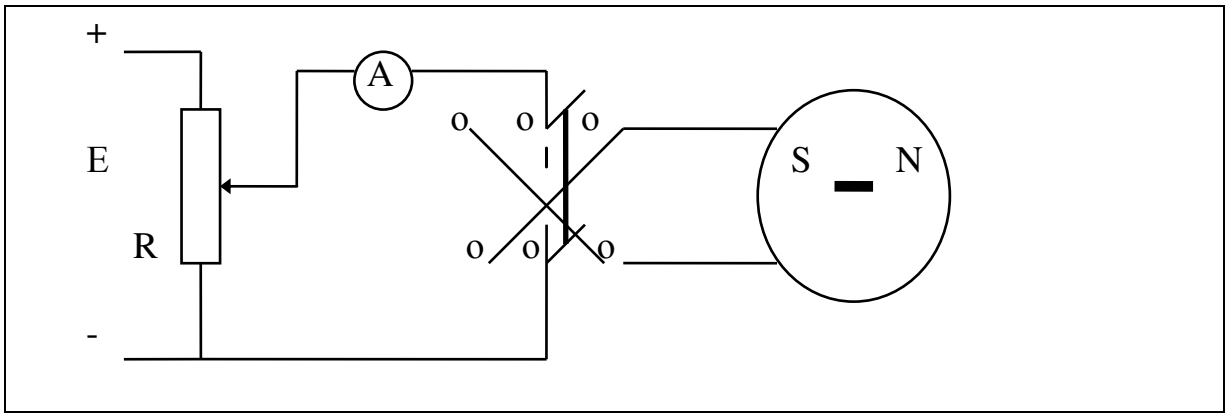


Рис.51.2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис.51.2 и представить её на проверку преподавателю.
2.Поворачивая тангенс-гальванометр, установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана. В этом случае стрелка гальванометра должна ориентироваться на угол 90^o либо 270^o.
3.При помощи движка реостата установить заданное значение тока и измерить значение угла α_1 положения стрелки гальванометра с точностью до половины углового градуса.

4.При помощи переключателя К изменить направление тока в катушке. Определить угол отклонения α_2 при той же величине тока. Величину тока и величины углов α_1 и α_2 занести в таблицу результатов наблюдений.
5.Повторить опыт по п.п.2,3 5-6 раз при различных значениях тока. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
6.Вычислить значения $\alpha_1+\alpha_2$. В случае существенного (на величину более 2 угловых градусов) отличия какого-либо значения такой суммы от остальных, проверить соответствующие величины α_1 и α_2.
7.Построить график зависимости $tg\alpha=f(I)$. Убедиться в том, что $tg\alpha$ зависит от тока прямо пропорционально.
8.Вычислить величины H_3 по формуле /3/ для каждого значения тока. Найти среднее значение $H_{3\,CP}$.
9.Рассчитать средние абсолютную и относительную погрешности измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле $\Delta H_3 = t(\alpha,n)\sqrt{\frac{\sum \Delta H_i^2}{n(n-1)}}$.

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя.
α= , $t_{\alpha,n}$= . Результаты записать в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

n_i	I, A	α_1	α_2	$\alpha_1+\alpha_2$	$\alpha = \frac{\lvert\alpha_1-\alpha_2\rvert}{2}$	$tg\alpha$	H_i, А/м	ΔH_i, А/м	ΔH_i^2, $А^2/м^2$

10.Окончательный результат записать в виде

$$H_3 = H_{CP} \pm \Delta H_3 \text{ А/м}; \qquad \varepsilon_N = \frac{\Delta H}{H_3}100\% .$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа и запишите его формулу. Как определяется направление вектора индукции магнитного поля? В каких единицах измеряется индукция магнитного поля в системе СИ?
2. Запишите формулу связи индукции и напряженности магнитного поля. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля в системе СИ?
3. Запишите формулы для вычисления индукции кругового тока, отрезка прямого тока, соленоида.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для индукции магнитного поля.
5. Дайте определение линиям индукции магнитного поля. Сформулируйте правило определения направления линий индукции магнитного поля.

Нарисуйте линии индукции магнитного поля кругового тока, отрезка прямого тока, соленоида.

ЛИТЕРАТУРА

1.Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§109,110.
2.Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, -§40,42.
3.Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.10.1, III.10.2, III.10.3.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, - 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 53

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: исследование зависимости индукции магнитного поля в ферромагнетике от величины намагничивающего поля B=f(H) и зависимости магнитной проницаемости от величины намагничивающего поля μ=f(H)

Приборы и принадлежности: тороидальный трансформатор с сердечником (тороид), электронный осциллограф, амперметр, реостат, интегрирующая RC-цепочка, регулируемый источник переменной ЭДС.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. При внесении веществ в магнитное поле, происходит их намагничивание. Намагниченный магнетик создает собственное магнитное поле, которое складывается с внешним намагничивающим полем. Вектор магнитной индукции $\overline{B}$ равен сумме векторов магнитной индукции внешнего поля $\overline{B}_0$ и собственного поля магнетика $\overline{B}'$

$$\overline{B} = \overline{B}_0 + \overline{B}' \qquad /1/$$

Индукция магнитного поля в магнетике связанна с напряженностью намагничивающего поля $\overline{H}$ соотношением

$$\overline{B} = \mu\mu_0\overline{H} \qquad /2/$$

где μ - относительная проницаемость вещества: $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$Г/м - магнитная постоянная (в системе СИ).

По магнитным свойствам вещества делятся на:

1.ПАРАМАГНЕТИКИ, намагничивающиеся по направлению внешнего поля, для них магнитная проницаемость немного больше единицы (μ>1)

2.ДИАМАГНЕТИКИ, намагничивающиеся против внешнего магнитного поля для них магнитная проницаемость немного меньше единицы (μ<1).

3.ФЕРРОМАГНЕТИКИ, которые, как и парамагнетики, намагничиваются по направлению внешнего магнитного поля, но магнитная проницаемость намного больше единицы (μ>>1). Кроме того, магнитная проницаемость

ферромагнетиков не является постоянной величиной, а зависит от напряженности внешнего намагничивающего поля Н. С увеличением напряженности внешнего намагничивающего поля магнитная проницаемость сначала быстро возрастает, достигая максимума, причем достигаются значения $\mu>>1$, а затем уменьшается, приближаясь к значению $\mu=1$ при очень сильных полях (рис.53.1).

Поэтому зависимость индукции магнитного поля В от напряженности Н не является линейной, как для пара- и диамагнетиков, а носит более сложный характер (рис.53.2). С увеличением напряженности внешнего магнитного

поля Н индукция поля в ферромагнетике В сначала резко возрастает и достигает значительной величины при сравнительно небольшой величине напряженности внешнего магнитного поля Н, а затем изменяется медленно, возрастая пропорционально Н, кривая (а) на рис.53.2, называемая основной кривой намагничивания. Это соответствует состоянию насыщения ферромагнетика (при $\mu\to1$). При насыщении индукция собственного поля ферромагнетика В’ перестает расти, и величина суммарной индукции поля В увеличивается только за счет возрастания индукции внешнего поля B_0, которая пропорциональна Н. Если затем в ферромагнетике, намагниченном до насыщения уменьшать напряженность внешнего поля Н, то индукция поля внутри ферромагнетика В тоже начнет уменьшаться. Однако при полном исчезновении внешнего поля (Н=0) ферромагнетик не размагничивается полностью, в нем сохраняется остаточная индукция $B_{ост}$. Для полного размагничивания ферромагнетика нужно создать магнитное поле противоположного направления напряженностью $H_к$; эта напряженность называется коэрцитивной силой. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик начнет перемагничиваться, и при $H=H_{max}$ намагнитится до насыщения в противоположном направлении. Затем намагничивая ферромагнетик в прямом направлении можно вновь достигнуть $B=B_{max}$. Такое явление отставания изменения магнитной индукции от изменения напряженности намагничивающего поля называется магнитным гистерезисом, а замкнутая кривая (б) на рис.53.2 - петлей гистерезиса.



Рис.53.1.

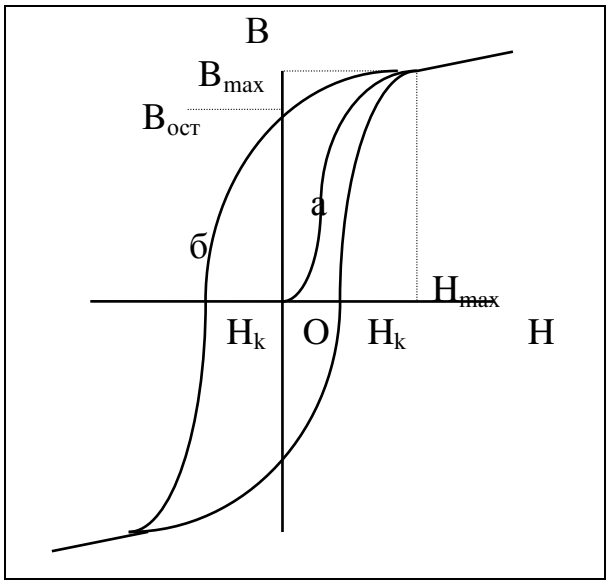


Рис.53.2

Целью данной работы является получение зависимости B=f(H) и μ=f(H) для ферромагнетика. В качестве исследуемого образца используется железный сердечник тороидальной формы. На тороиде имеется две обмотки: основная (первичная) и вспомогательная (вторичная). Через первичную обмотку тороида пропускается переменный ток. В сердечнике возникает переменное магнитное поле, перемагничивающее образец 50 раз в секунду - в соответствии с частотой переменного тока. При этом напряженность поля периодически изменяется от H_{max} до $-H_{max}$. Максимальная величина напряженности поля связана с амплитудным значением силы переменного тока I_m соотношением

$$H_{\max} = n_1 I_m = \frac{N_1}{l_{CP}} I_m, \qquad /3/$$

где N_1-число витков первичной обмотки; $l_{ср}$ - длина тороида, измеренная по его средней линии.

В соответствии с изменениями напряженности внешнего поля H в сердечнике периодически изменяется и индукция магнитного поля B, зависящая от H. Графически эта зависимость изображается петлей гистерезиса. Для наблюдения петли гистерезиса на экране электронного осциллографа используется схема, приведенная на рис.53.3.

Первичная обмотка тороида питается от источника регулируемого переменного напряжения. С резистора R_1, включенного последовательно в первичную цепь, на пластины электронного осциллографа, отклоняющие электронный луч в горизонтальном направлении (вход «X»), подается напряжение

$$U_m = I_1 R_1 . \qquad /4/$$

Это напряжение пропорционально напряженности магнитного поля

$$U_m = \frac{R_1 l_{cp}}{N_1} H . \qquad /5/$$

Следовательно, величина отклонения электронного луча от оси «X» пропорциональна напряженности магнитного поля.

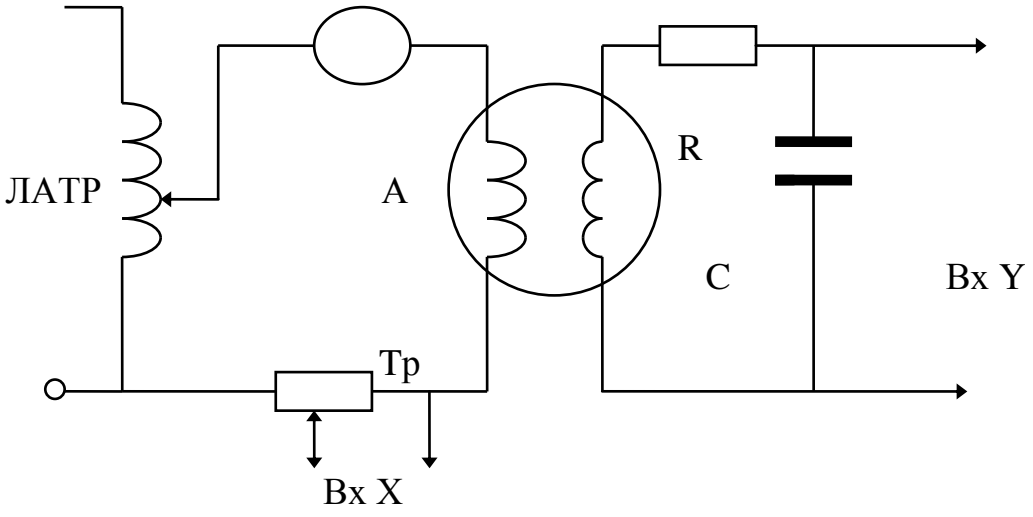


Рис.53.3

Во вторичной обмотке, вследствие изменения магнитного поля, наводится ЭДС индукции, прямо пропорциональная скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \qquad /6/$$

где N_2 - число витков во вторичной обмотке; $\Phi = BS$ - поток магнитной индукции в сердечнике; S - площадь поперечного сечения сердечника.

Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа на вертикально отклоняющие пластины (вход «Y») необходимо подать не напряжение $U_2 \approx \varepsilon_i$, пропорциональное $\frac{dB}{dt}$, а напряжение, пропорциональное индукции B. Для этого во вторичной цепи применена интегрирующая RC-цепочка. На вход цепочки со вторичной обмотки подается ЭДС индукции, которая равна сумме падений напряжения на резисторе - U_R и конденсаторе U_c

$$|\varepsilon_i| = U_R + U_c$$

или

$$N_2 S \frac{dB}{dt} = R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q, \qquad /7/$$

где $I = \frac{dQ}{dt}$ - сила тока во вторичной цепи. Значения сопротивления R и емкости C подбираются таким образом, чтобы $U_R >> U_c$. Тогда

$$N_2 S \frac{dB}{dt} = R \frac{dQ}{dt}. \qquad /8/$$

При изменении индукции поля на величину dB заряд конденсатора изменяется на dQ, причем

$$dQ = \frac{N_2 S}{R} dB. \qquad /9/$$

Полный заряд конденсатора в любой момент времени можно найти путем интегрирования

$$Q = \frac{N_2 S}{R} \int dB = \frac{N_2 S}{R} B. \qquad /10/$$

Отсюда вытекает, что напряжение на обкладках конденсатора, подаваемое на вход «У» осциллографа, равно

$$U_y = \frac{Q}{C} = \frac{N_2 S}{RC} B. \qquad /11/$$

Следовательно, отклонение электронного луча по оси «У» пропорционально индукции магнитного поля B. Поэтому фигура, описываемая электронным лучом на экране осциллографа, выражает зависимость B=f(H), т.е. является петлей магнитного гистерезиса. Если изменять величину амплитуды тока намагничивания в первичной обмотке, то изменяются значения H_{max} и B_{max}, т.е. размеры и форма петли гистерезиса. При этом концы петли лежат на основной кривой намагничивания. Иными словами, основная кривая намагничивания является геометрическим местом крайних точек петли, образуемой при различных значениях тока в первичной обмотке. Поэтому, измеряя координаты X и У концов петли при различных значениях намагничивающего тока, можно получить основную кривую намагничивания, выражающую зависимость B=f(H). Зная величины B и H для основной кривой

намагничивания, можно получить относительную магнитную проницаемость для каждого значения напряженности внешнего поля Н $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$. /12/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, рис.53.3.

2.Включить осциллограф. После того как на экране появится светящаяся точка, вывести ее ручками «ось Х» и «ось У» в центр экрана.

3.Установить в первичной обмотке тороида максимально возможный ток и ручками «усиление» по осям Х и У добиться, чтобы изображение петли гистерезиса заняло большую часть экрана.

ПРИМЕЧАНИЕ. Если петля повернута в обратную сторону, поменять местами провода на клеммах «вход У».

4.Зарисовать в тетради изображение петли гистерезиса.

5.Вывести на ноль регулятор усиления по оси Х. При этом на экране получится вертикальная линия, длина которой У пропорциональна индукции В. Изменяя величину тока в первичной цепи от 0 до максимального значения через каждые 0.05 А, измерить длину этой линии Y. Значения силы тока и длины линии занести в таблицу результатов наблюдений. По результатам измерений построить график зависимости Y=f(I), который аналогичен графику B=f(H).

ПРИМЕЧАНИЕ. С помощью амперметра измеряется действующее I, а не максимальное значение силы переменного тока. Однако поскольку они находятся в пропорциональной зависимости $\left(I = {I_m}/{\sqrt{2}}\right)$, то величина напряженности Н прямо пропорциональна эффективному значению тока..

6.Определить величину $\mu' = \frac{Y}{I}$, которая пропорциональна магнитной проницаемости $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$.

Построить график зависимости $\mu' = f(I)$, которая аналогична зависимости $\mu = f(H)$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Сила тока [А]										
Ордината линии Y [В]										
μ’										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение напряженности и индукции магнитного поля. В каких единицах они измеряются? Как они связаны между собой?
2. Что такое ферромагнетики? Какими свойствами они обладают?
3. Что такое домены? Как их можно наблюдать? Какую форму они имеют?

4. Почему возникают домены? Когда прекращается процесс разбиения на домены ?
5. Нарисуйте основную кривую намагничивания ферромагнетиков.
6. Нарисуйте петлю гистерезиса. Что такое коэрцитивная сила и остаточная намагниченность?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§135,136.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, -§59;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.13.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 56
ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ДОБРОТНОСТИ

Цель работы: получить резонансную кривую колебательного контура и по ширине полосы пропускания рассчитать его добротность и коэффициент затухания.

Приборы и принадлежности: генератор незатухающих колебаний, колебательный контур с микроамперметром, источник питания генератора, соединительные повода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим процессы, происходящие в колебательном контуре, состоящем из конденсатора C, катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис.56.1).

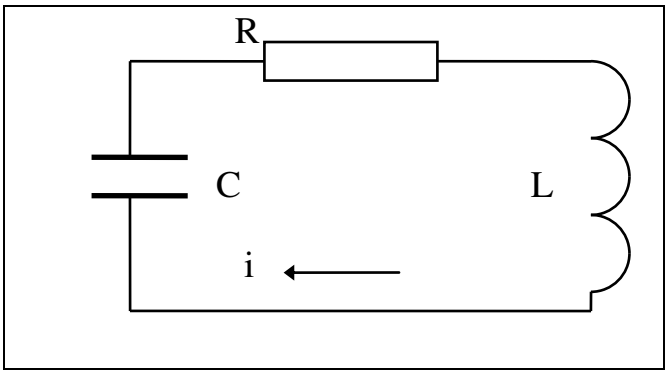


Рис.56.1

Если на обкладках конденсатора имеется заряд q, по цепи идет ток разряда $i = \frac{dq}{dt}$, а в катушке наводится ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = L\frac{di}{dt}$. В любой момент времени на основании закона Ома для неоднородного участка цепи справедливо уравнение динамики затухающих колебаний

$$-L\frac{di}{dt} = Ri + \frac{q}{C}. \qquad /1/$$

Поскольку сила тока по определению равна $i = {dq}/{dt}$, то из /1/ получим дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2q}{dt^2}+\frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt}+\frac{1}{LC}\cdot q=0. \qquad /2/$$

Здесь q - заряд на конденсаторе. Решение этого обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$q=q_0e^{-\beta t}\cos\omega t. \qquad /3/$$

Уравнение /3/ называется уравнением кинематики затухающих колебаний. Здесь $q_m=q_0e^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний; $\beta=\frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания, измеряемый в $с^{-1}$. Он равен величине обратной времени, в течение которого амплитуда уменьшается в *e* раз, где *e*=2,7183 – основание натуральных логарифмов. Можно показать, что циклическая частота затухающих колебаний ω связана с собственной циклической частотой (циклической частотой собственных гармонических незатухающих колебаний) $\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ и коэффициентом затухания β выражением

$$\omega=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}. \qquad /4/$$

График зависимости /3/ показан на рис.56.2.

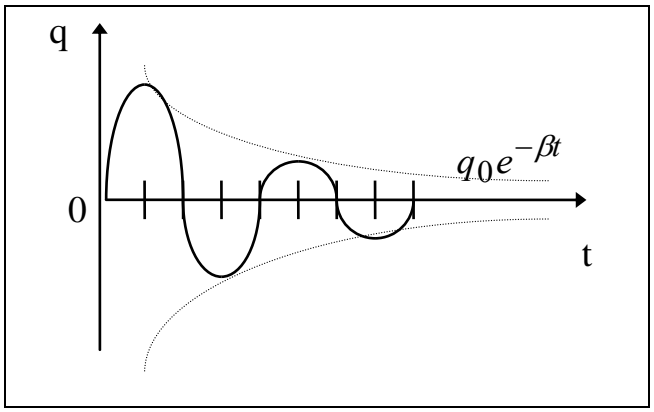


Рис.56.2.

Сила тока в контуре с затуханием равна $I=I_0e^{-\beta t}\cos(\omega t+\varphi_0)$, т.е. опережает заряд по фазе. Добротностью Q называется безразмерная величина, показывающая во сколько раз умноженная на 2π энергия колебаний W больше энергии, потерянной в контуре за период $-\frac{dW}{dt}$. Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний

$$W=\frac{Lq_m^2}{2}=\frac{Lq_0^2}{2}\cdot e^{-2\beta t}. \qquad /5/$$

Тогда можно показать, что добротность равна

$$Q=\beta T=\frac{\omega}{2\beta}\approx\frac{\omega_0}{2\beta}. \qquad /6/$$

Добротность контура влияет на его избирательность, т.е. на способность контура подавлять сигналы, приходящие на частотах, отличающихся от той, на которую контур настроен. Если в колебательном контуре, рис.56.1 действует переменная ЭДС внешнего источника сигналов $U=U_m\cos\omega t$, то уравнение динамики вынужденных колебаний имеет вид

$$U_m\cos\omega t-L\frac{di}{dt}=Ri+\frac{q}{C}. \qquad /7/$$

По аналогии с /2/ дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид $$\frac{d^2q}{dt^2}+\frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt}+\frac{q}{LC}=\frac{U_m}{L}\cos\omega t\,. \qquad /8/$$

Через достаточно большой промежуток времени t собственные колебания контура затухают, и решение этого неоднородного дифференциального уравнения имеет вид $$q=\frac{U_m}{\omega\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}}\cdot\cos(\omega t+\varphi_0)\,, \qquad /9/$$

т.е. заряд меняется с частотой внешней ЭДС. Зависимость силы тока от времени имеет вид $$i=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}}\cdot\cos(\omega t+\varphi_0-\frac{\pi}{2})\,. \qquad /10/$$

Зависимость амплитуды тока от циклической частоты переменной ЭДС ω имеет вид

$$I_m=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}} \qquad /11/$$

и показана на рис.56.3.

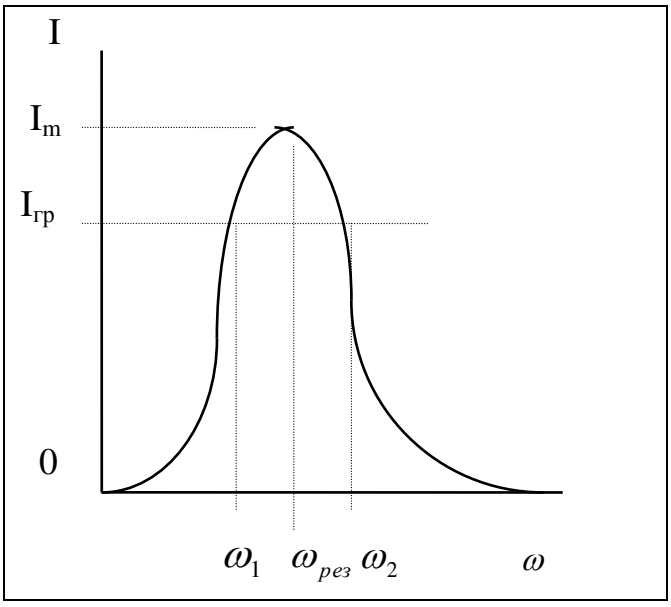


Рис.56.3.

При приближении частоты сигнала к частоте собственных гармонических колебаний контура

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad /12/$$

амплитуда тока $I_{рез}$ максимальна. Явление резкого возрастания амплитуды колебаний при совпадении частоты внешнего сигнала с частотой собственных колебаний контура называется резонансом. Частота, при которой это происходит, называется резонансной. Она равна

$$\omega_{рез}=\frac{1}{\sqrt{LC+2(\frac{R}{2L})^2}}\,. \qquad /13/$$

Амплитуда тока при резонансе равна $$I_{рез}=\frac{U_m}{R}\,. \qquad /14/$$

Назовем граничной частоту, на которой энергия колебаний в контуре в 2 раза меньше энергии колебаний на резонансной частоте $W_{гр}=\frac{1}{2}W_{рез}$.

При этом амплитуда тока $I_{гр}$ на граничной частоте равна $I_{гр} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{рез}$

Поскольку энергия в колебательном контуре пропорциональна квадрату тока, получим

$$(\frac{I_{р НЬК}}{I_{гр}})^2 = \frac{R^2 + (\omega_{го} L - \frac{1}{\omega_{гр} C})^2}{R^2} = 1 + (\frac{\omega_{гр} L}{R} - \frac{1}{\omega_{гр} RC})^2 = 2. \qquad /15/$$

Здесь $\omega_{гр}$ - граничная частота. Корни уравнения /15/ имеют вид

$$\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}, \qquad \omega_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}. \qquad /16/$$

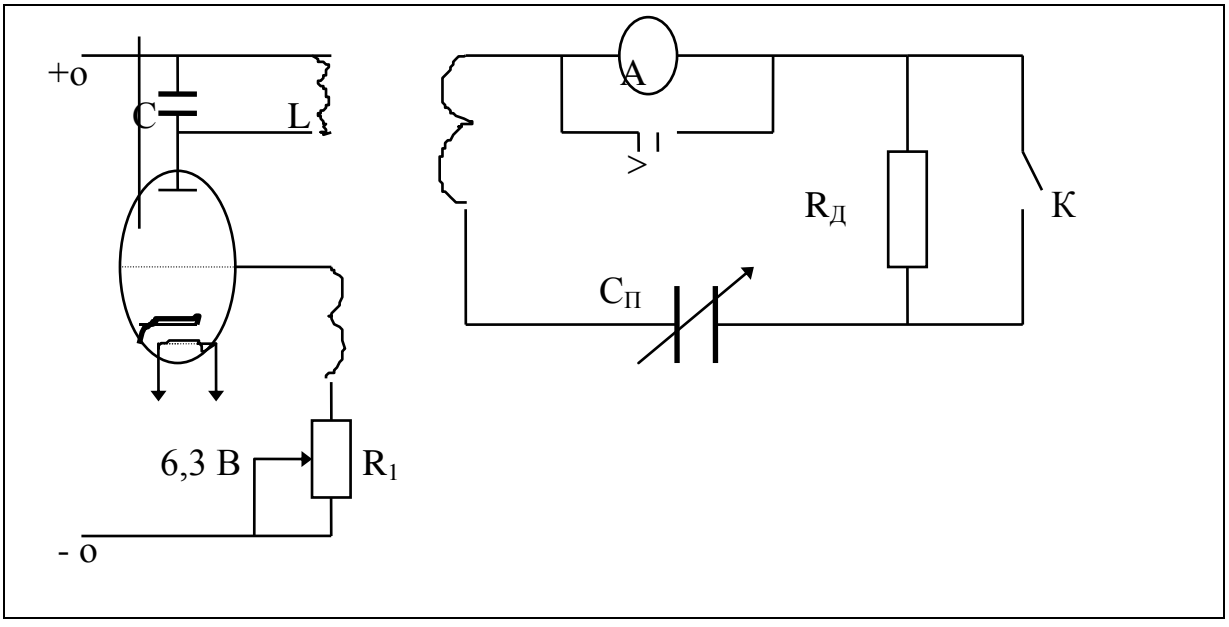
Еще два отрицательных корня отбрасываем, как не имеющие физического смысла. Граничные циклические частоты ω_1 и ω_2 показаны на рис.56.3.

Ширина полосы пропускания контура $\Delta\omega$ - это область циклических частот, на которых энергия ослабляется контуром не больше чем вдвое

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L} = 2\beta = \frac{\omega_{рез}}{Q}. \qquad /17/$$

Таким образом, чем больше добротность контура, тем уже полоса пропускания, тем лучше отстраивается контур от посторонних сигналов. Колебательные контуры, используемые в радио и телевидении, имеют добротность порядка 10÷200, причем, если Q<10 контур плохой, если Q>100 - хороший.

В работе измеряется добротность и коэффициент затухания контура по ширине полосы пропускания. Установка состоит из генератора колебаний,



а б

Рис.56.4.

(рис.56.4а) и исследуемого контура, в цепь которого включен микроамперметр А, шунтированный высокочастотным диодом (рис.54.4б).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить к генератору источники питания.
2. Расположить исследуемый контур так, чтобы его катушка оказалась на одной оси с катушкой генератора на расстоянии 15-20 см от последнего. Стрелка ручки управления переменным конденсатором $C_П$ должна стоять примерно на середине шкалы.
3. Вращением ручки переменного резистора R_1 на корпусе генератора добиться возбуждения генератора. Стрелка микроамперметра отклонится от нуля.
4. Изменяя емкость конденсатора, настроить контур в резонанс с генератором, при этом ток в контуре будет максимальным. Перемещением контура относительно генератора добиться отклонения стрелки микроамперметра до значения тока, близкого к максимальному. После этого расположение контура и генератора не изменять.
5. Изменяя емкость контура поворотом ручки подстроечного конденсатора, записать номера 15-20 делений шкалы настройки и соответствующих токов в контуре в таблицу результатов наблюдений 1. Ручку управления подстроечного конденсатора поворачивать на 20 делений вдали от номера деления, соответствующего резонансу, и на 10-5 делений вблизи номера деления, соответствующего резонансу.
6. Повторить п.5, изменив добротность контура подключением добавочного сопротивления $R_Д$ с помощью ключа К. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.
7. Используя градуировочный график, по номерам деления шкалы настройки определить соответствующие частоты ν, а по ним – циклические частоты, используя соотношение $\omega=2\pi\nu$. По результатам измерений построить резонансные кривые (см. рис.56.3). Определить резонансные частоты $\omega_{рез}$, соответствующие максимальным значениям тока на обоих графиках. На каждом графике на уровне $I_{ср} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{рНК}$ провести прямую и на ее пересечении с соответствующей резонансной кривой определить граничные частоты полосы пропускания ω_1 и ω_2 (см. рис.56.3).
8. По формуле /16/ вычислить значения коэффициента затухания контура и добротности для каждого из случаев. Результаты по пп.7,8 занести в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

n	ν, МГц	I_1, мкА	n	ν, МГц	I_2, мкА

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

$\omega_{рез}, 10^6 с^{-1}$	$I_{рез}$, мкА	$I_{гр}$, мкА	$\omega_1, 10^6 с^{-1}$	$\omega_2, 10^6 с^{-1}$	Q	$\beta, 10^6 с^{-1}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнение динамики вынужденных электромагнитных колебаний (закон Ома). Каков физический смысл слагаемых в этом уравнении?
2. Запишите уравнение кинематики (решение уравнения динамики) вынужденных электромагнитных колебаний.
3. Что такое резонанс? При каких условиях он наступает?
4. От каких параметров контура зависит резонансная частота незатухающих колебаний?
5. Нарисуйте график зависимости амплитуды незатухающих колебаний от частоты "вынуждающей силы".
6. Что такое добротность? В каких единицах она измеряется? Как она связана с коэффициентом затухания. От каких параметров схемы она зависит?

ЛИТЕРАТУРА.

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§140, 141, 143, 147, 148.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §88, 89, 90,91;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.1.1, IV.1.2, IV.1.3, IV.2.1, IV.2.2, IV.2.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 57
ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: проверить на опыте экспоненциальный характер убывания амплитуды затухающих электромагнитных колебаний, определить логарифмический декремент затухания колебательного контура и его добротность.

Приборы и принадлежности: колебательный контур с генератором возбуждения, электронный осциллограф, источник ЭДС, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

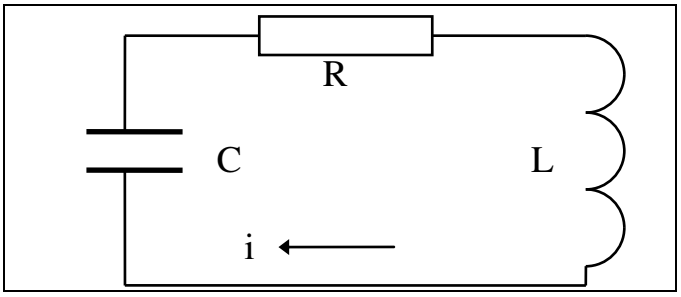


Рис.57.1

Рассмотрим процессы, происходящие в колебательном контуре, состоящем из конденсатора С, катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис.57.1).

Если на обкладках конденсатора имеется заряд q, по цепи идет ток разряда $i = \frac{dq}{dt}$, а в катушке наводится ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = L\frac{di}{dt}$. В любой момент времени на основании закона Ома для неоднородного участка цепи справедливо уравнение динамики затухающих колебаний

$$-L\frac{di}{dt} = Ri + \frac{q}{C}, \qquad /1/$$

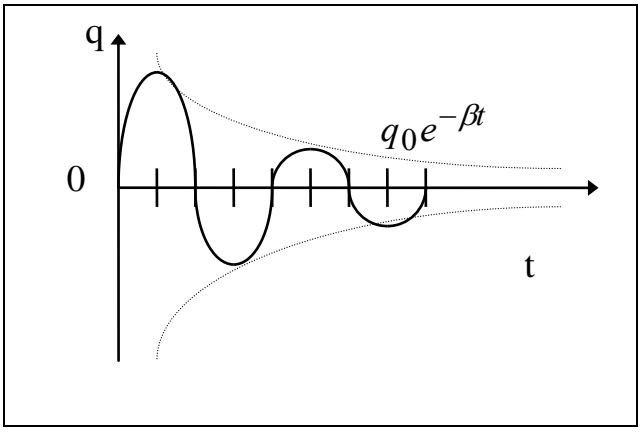
где $U_c = \frac{q}{C}$ - напряжение на обкладках конденсатора; $U_R = iR$ - падение напряжения на активном сопротивлении. Поскольку сила тока по определению равна $i = {dq}/{dt}$, то из /1/ получим дифференциальное уравнение затухающих колебаний

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}\cdot q = 0. \qquad /2/$$

Здесь q - заряд на конденсаторе. Решение этого однородного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$q = q_0 e^{-\beta t}\cos\omega t, \qquad /3/$$

График зависимости /3/ показан на рис.57.2. Уравнение /3/ называется уравнением кинематики затухающих колебаний. Здесь $q_m = q_0 e^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний, $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания, измеряемый в $с^{-1}$.



Он равен обратной величине времени, в течение которого амплитуда уменьшается в е раз. Можно показать, что циклическая частота зату-

хающих колебаний связана с частотой собственных гармонических незатухающих колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и Рис.57.2 коэффициентом затухания выражением

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}\,. \qquad /4/$$

Сила тока в контуре с затуханием равна $I = I_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0)$, т.е. опережает заряд по фазе.

Логарифмическим декрементом затухания δ называется натуральный логарифм отношения амплитуд двух следующих друг за другом (через период Т) колебаний

$$\delta = Ln\frac{I_0 e^{-\beta(t+T)}}{I_0 e^{-\beta t}}. \qquad /5/$$

Можно показать, что

$$\delta = \beta T\,. \qquad /6/$$

Добротностью Q называется безразмерная величина, показывающая во сколько раз умноженная на 2π энергия колебаний W больше энергии, потерянной в контуре за период $-dW$

$$Q = \frac{2\pi W}{-dW}. \qquad /7/$$

Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний $W = \frac{Lq_m^2}{2} = \frac{Lq_0^2}{2}\cdot e^{-2\beta t}$. Тогда можно показать, что при малом затухании добротность равна

$$Q = \frac{\pi}{\delta}. \qquad /8/$$

Добротность контура не зависит от энергии колебаний и времени. Она, как и логарифмический декремент затухания, является параметром колебательной системы. Выражение /8/ позволяет, зная логарифмический декремент затухания контура, вычислить его добротность.

Лабораторная установка (рис.57.3) представляет колебательный контур, возбуждаемый импульсами от генератора возбуждения ГВ. В контуре воз-

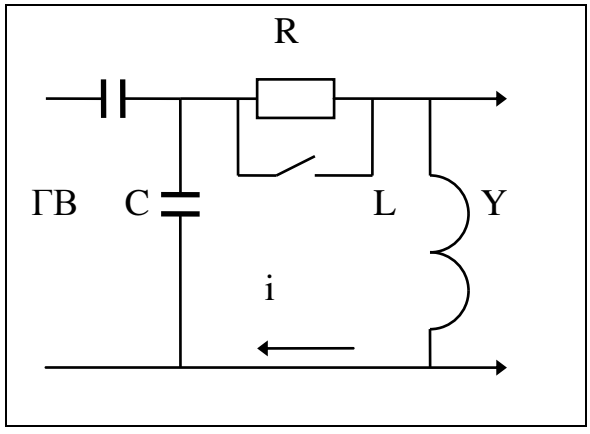


Рис.57.3

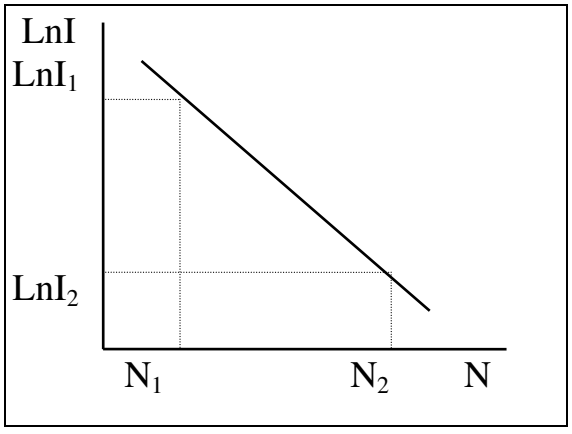


Рис.57.4

никают затухающие колебания, которые подаются на выход «У» электронного осциллографа. На экране осциллографа наблюдается картина, аналогичная представленной на рис.57.2. Амплитуды колебаний *I* можно измерить с помощью осциллографа. Из /5/ следует, что $LnI = LnI_0 - \delta N$, т.е. логарифм амплитуды колебания является линейной функцией номера колебания N, рис.57.4, и логарифмический декремент затухания может быть найден, как угловой коэффициент этой функции из графика (рис.57.4)

$$\delta = \frac{LnI_1 - LnI_2}{N_2 - N_1}. \qquad /9/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Колебательный контур подключить к входу «У» электронного осциллографа. Осциллограф включить в сеть и дождаться появления изображения в виде горизонтальной линии на экране.

2.Подключить контур (рис.57.3) к выходу сигнала «50 Гц» осциллографа, используемого как генератор возбуждения. При этом на экране возникнет изображение затухающих колебаний. Установить размер максимальной амплитуды колебаний в пределах 4-5 см. Длительность развертки подобрать такую, чтобы изображение стало устойчивым, а его «нулевая» линия совпала с горизонтальной осью шкалы на экране.

3.Перемещая изображение по горизонтали, измерить амплитуды 5-8 колебаний. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.

4. Подключить к контуру дополнительное сопротивление $R_Д$=10 Ом и повторить измерения по п.3. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.

5.Вычислить логарифмы амплитуд и построить графики LnI=f(N) аналогично изображенному на рис.57.4 (на одном листе миллиметровой бумаги).

6.Расчитать для обоих случаев значения δ по формуле /9/ и Q по формуле /8/. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 2.

7.По изображению затухающих колебаний (аналогичному представленному на рис.54.2), зная масштаб развертки по оси абсцисс на осциллографе, определить количество полных колебаний, приходящихся на определенное расстояние на оси абсцисс на экране. Вычислить значения периодов колебаний T_1 (для случая, когда добавочное сопротивление не включено), и T_2 в случае, когда добавочное сопротивление $R_д$=10 Ом включено. Результаты занести в таблицу результатов наблюдений 2.

8.Вычислить значения коэффициента затухания, используя формулу /6/. Используя выражения для коэффициента затухания для двух случаев измерений, $\beta_1 = \frac{R}{2L}$, и $\beta_2 = \frac{R + R_д}{2L}$, найти сопротивление контура R по формуле

$$R = \frac{R_Д}{(\beta_2 / \beta_1) - 1}, \qquad /10/$$

и его индуктивность L по формуле $$L = \frac{R_Д}{2(\beta_2 - \beta_1)}. \qquad /11/$$

9. Вычислить циклическую частоту колебаний $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, сравнить ее величину с β_1 и β_2. Убедится, что ω_o намного больше коэффициента затухания $\beta << \omega_0$. Если это условие выполняется, т.е. коэффициент затухания мал, по формуле Томсона $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ найти значение ёмкости С.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

N	$R_д$=0		$R_д$=10 Ом	
	I	lnI	I	lnI

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

N	δ	Q	l,см	N	T, 10^{-3} С.	β	R, Ом	L Гн	С, мкФ
1									
2									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнение динамики затухающих электромагнитных колебаний (закон Ома). Каков физический смысл слагаемых в этом уравнении?
2. Запишите уравнение кинематики (решение уравнения динамики) затухающих электромагнитных колебаний. Можно ли считать эти колебания гармоническими?
3. Что такое коэффициент и логарифмический декремент затухания? В каких единицах они измеряются?
4. От каких параметров контура зависит коэффициент затухания и логарифмический декремент?
5. От каких параметров контура зависит период затухающих колебаний?
6. Дайте определение добротности контура. Выведите ее выражение. Как связаны между собой Q и δ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §140, 141,143,147,148.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §88,89,90.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.1.1, IV.1.2, IV.1.3, IV.2.1.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1.Электроизолирующие материалы

Диэлектрическая проницаемость ε, напряжённость пробивного электрического поля $E_п$, плотность ρ', удельное сопротивление ρ веществ (при 20 ^{0}C)

Материал	t ^{o}C	ε	$E_п$, 10^6 В/м	ρ', 10^3 кг/м^3	ρ, Ом м
Воздух		1,0006			
Бумага	18	2-2,5			
Текстолит					10^8-10^9
Плексиглас		3,0-3,9	18,5	1,2	10^{11}-10^{13}
Гетинакс		3,5-6,5			
Полистирол		2,2-2,8	25-50	1,05-1,65	510^{13}-510^{15}
Полиэтилен		2,7-3,5			10^{12}-10^{14}
Слюда	18	4,5-8	50-200	2,3-3,2	10^{13}-10^{16}
Кварц					1-3 10^{16}
Стекло		5-10	30-150	2,2-4,0	10^6-10^{15}
Фторопласт		2,5-2,7		2,14	1,2 10^{16}
Эбонит		2,5-4,5	25-100	1,3	2 10^{16}
Янтарь		2,7-2,9	20-30	1,06-1,11	5 10^{18}
Резина		2,2-3,0	16-40		10^{13}
Парафин	20	2,0-2,5	15-50		10^{14}-10^{18}
Фарфор	18	4,4-6,8			7 10^{12}-4 10^{13}

Таблица 2. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов и сплавов (при 200С)

Вещество	t, ^{0}C	ρ, 10^{-8} Ом·м	α,10^{-3} К$^{-1}$
Алюминий		2,82-3,21	3,862-4,9
Железо		9,8	5,0
Железо (0,1%С)		12,0	6,2
Сталь легированная		4,5	1,5
Серебро		1,62	3,6
Медь		1,75	3,9-4,15
Латунь		2,5-8	1,5-7
Бронза оловянистая		18	
Никель		7,24	5,4

Магний		4,46	3,9
Молибден		5,6	4,7
Вольфрам		7,0	
Графит		1300	

Таблица 3.Коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, индукция насыщения и магнитная проницаемость некоторых веществ

Ферромагнетик	$H_к$, Э	$B_{ост}$ Гс	$B_{макс}$ Гс	$\mu_{макс}$
Жёсткие ферромагнетики				
Магнетит ($FeO\ Fe_2O_3$)	50	6000		
Углеродистая сталь (1%C)	40-60	9000-7000		
Хромовая сталь (3%Cr, 1%C)	60-80	10500-8500		
Мягкие ферромагнетики				
Чистое железо (отжиг в водороде)	0,025	2000	21600	280000
Мягкое железо	0,5	8400	21500	8000
Трансформаторное кремнистое железо (1%Si)	0,7	15000	25000	10000
Трансформаторное железо (4%Si)	0,35	5000	20000	15000
Углеродистое железо (0,1%C)	3,0	10000	18000	3000
Пермаллой (78%Ni, 22%Fe)	0,06	5000	10000	80000
Гиперник (50%Ni, 50%Fe)	0,05	6000	11000	70000

Напряжённость магнитного поля на магнитном экваторе - ~ 27,1А/м, у магнитных полюсов - ~ 52,5А/м. В магнитных аномалиях, напряжённость возрастает; в районе Курской магнитной аномалии она достигает~ 160А/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные физические константы ГСССД 1-87 /М.: Госкомстандарт СССР. 1987.
2. Гольдин Л.Л. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л.Л. Гольдин - М.: Наука, 1973.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - М.: Мир, 1982.
4. Скороходов Е.А. Общетехнический справочник / Е.А. Скороходов. -М.: Машиностроение, 1982.
5. Кошкин Н.И., Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. - М.: Наука, 1980.
6. Чайлдс У. Физические постоянные / У. Чайлдс. - М.: ГИЗ, 1962.
7. Карякин Н.И., Краткий справочник по физике. / Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. - М. ВШ, 1964.
8. Енохович А.С. Справочник по физике и технике /. А.С Енохович. - М.: Просвещение, 1983.

Учебное издание

Леонтьев Николай Георгиевич
канд. физ. мат. наук, доцент
Белоусов Александр Васильевич
канд. физ. мат. наук, доцент
Гуриненко Людмила Александровна
канд. техн. наук, доцент

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ)

Механика. Колебания. Молекулярная физика. Постоянный ток. Электромагнетизм

Редакция авторская

Объём ЭИ: 2,031Мб.
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF).

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ
347740, г. ЗЕРНОГРАД Ростовской области, ул. Ленина,21.