Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет
Кафедра общей и прикладной физики

ФИЗИКА

Методические указания к комплексу лабораторных работ по физике для студентов-заочников (механика, молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика)

Под редакцией А.А. Кулиша

Владимир 2004

УДК 53 (07)

Составители:
А.Ф. Галкин, Е.В. Дмитриева, А.А. Кулиш, В.С. Плешивцев

Рецензент
Кандидат физико-математических наук, доцент
Владимирского государственного педагогического университета
А.В. Гончаров

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Физика. Методические указания к комплексу лабораторных работ по физике для студентов-заочников (механика, молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика) / Владим. гос. ун-т; Сост.: А.Ф. Галкин и др.; Под ред. А.А. Кулиша. Владимир 2004. 108 с.

Комплекс лабораторных работ по физике соответствует требованиям государственных стандартов инженерно-технических специальностей вузов. Методические указания состоят из вводной части, введения к каждому разделу и описания 21 лабораторной работы. В данном издании выделены основные части полного лабораторного практикума и важнейшие типы лабораторных работ по механике, молекулярной физике, электромагнетизму, колебаниям и волнам, оптике.

Методические указания направлены на организацию самостоятельной работы студентов заочной формы обучения при подготовке и выполнении лабораторных работ.

Предназначены для студентов заочной формы обучения. Могут быть использованы студентами дневной и вечерней форм обучения.

Вводная часть, разд. «Механика» и «Молекулярная физика» подготовлены доцентом А.А. Кулишом, разд. «Электричество и магнетизм», «Колебания и волны» – доцентом В.С. Плешивцевым и ассистентом Е.В. Дмитриевой, разд. «Оптика» – доцентом А.Ф. Галкиным.

Табл. 11. Ил. 56. Библиогр.: 26 назв.

УДК 53 (07)

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основе заочной формы обучения лежит самостоятельная работа студентов. Изучение физики самостоятельно – кропотливый, многогранный труд. Учебная работа по физике – комплексная: это изучение теории, решение задач и, что особенно важно, практическая проверка законов при выполнении лабораторных работ. По заочной форме обучения учебных аудиторных часов немного, поэтому с целью оптимизации учебного процесса в данном издании выделены основные части лабораторного практикума и важнейшие типы лабораторных работ. Выполнение представленных лабораторных работ позволяет, в целом, достаточно широко охватить физический практикум по механике, молекулярной физике, электромагнетизму, колебаниям и волнам, оптике и составить целостное представление о методах физического исследования и практического проявления законов физики.

Описание лабораторных работ основано на методических материалах для очной формы изучения физики с достаточно большим числом аудиторных часов. Поэтому мы позволили себе оставить соответствующую нумерацию лабораторных работ. Студенты-заочники при необходимости могут обращаться к описанию полного лабораторного практикума, в составлении которого также принимали участие преподаватели кафедры общей и прикладной физики: М.И. Андреева, О.Я. Бутковский, Л.В. Грунская, В.В. Дорожков, В.Н. Кунин, В.П. Кондаков, А.А. Шишелов.

Нами оставлены также дополнительные задания, позволяющие студентам заочной формы обучения выполнять лабораторные работы с элементами научного исследования и использовать компьютеры.

ВВЕДЕНИЕ

Физика – наука опытная: главная роль в установлении физических закономерностей принадлежит эксперименту. Эксперимент – система логически связанных целенаправленных действий. В физике в основе опытов лежат методы измерений величин и поэтому центральным является понятие методики проведения измерений.

При измерениях физических величин выполняются три последовательные операции: 1) создание экспериментальных условий, 2) наблюдение, 3) отсчет.

Создание экспериментальных условий, при которых проводятся измерения (постоянная величина напряжения или давления, значительный перепад температур, малые крутильные колебания и т.д.), осуществляется с помощью приборов, специализированных установок, электрических схем и т.п.

Отсчет следует за наблюдением и производится, как правило, по шкале с некоторым масштабом. В результате появляются “первичные экспериментальные данные”. Обработка результатов эксперимента и позволяет определить измеряемую величину.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

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

Измерения делятся на ***прямые*** и ***косвенные***.

При **прямых** измерениях определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или при помощи измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах. Примеры: измерение длины линейкой, измерение масс с помощью набора разновесов на рычажных весах, измерение силы электрического тока амперметром.

При **косвенных** измерениях измеряемая величина вычисляется из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной функциональной зависимостью. Примеры: измерение скорости тела v с использованием формулы $v = s/t$, где s – пройденный телом путь за время t при равномерном прямолинейном движении; измерение скорости свободного падения g при колебаниях математического маятника по известной формуле $g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}$, где ℓ – длина математического маятника, T – период колебаний математического маятника. Величины s, t, ℓ, T определяются в прямых измерениях.

Физические величины являются вполне определенными, неслучайными (толщина пластины, разность температур, время между двумя событиями). Однако в процессе измерения из-за влияния различных случайных факторов (колебания почвы, перепады температуры и давления, изменение положения экспериментатора при отсчете по шкале и т.д.) результаты измерения – случайные величины. Основная задача при проведении измерений – указать наиболее точное значение измеряемой величины и ошибку (погрешность) измерения. Например, при измерении фокусного расстояния линзы f получено: $f = (81 \pm 1)$ мм. Это означает, что наиболее точное значение фокусного расстояния равно 81 мм, а ошибка определения f – 1 мм.

Величина погрешности используется при сравнительном анализе экспериментальных данных, позволяющем сделать обоснованный вывод. Например, необходимо установить, зависит ли сопротивление проволочной катушки от температуры. Измеренное сопротивление катушки оказалось равным 18,22 Ом при температуре 15°C и 18,31 Ом при 25°C. Следует ли придавать значение разнице этих величин? Если ошибка составляет 0,01 Ом, то разница значима, если ошибка равна 0,10 Ом, то – незначима. Для первого случая вывод: сопротивление катушки зависит от температуры. Во втором случае вывод: сопротивление катушки не зависит от температуры в пределах погрешности измерения.

Ошибки (погрешности) измерения делятся на два типа: систематические и случайные.

Систематическая ошибка – ошибка, которая остается постоянной на протяжении всей серии измерений. Систематические погрешности, как правило, обусловлены: 1) неисправностью измерительных приборов, 2) ошибочностью выбранного метода измерений, 3) упущениями со стороны наблюдателя. Их можно уменьшить, относясь критически к методам измерения и строго следя за исправным состоянием приборов. Если на измерительном инструменте не указана погрешность измерения, то за величину систематической ошибки принимается половина цены деления шкалы.

Случайная ошибка – ошибка, которая изменяется произвольным образом от одного измерения к другому, в равной степени может быть как положительной, так и отрицательной. Случайные ошибки оцениваются методами математической статистики. Рассмотрим некоторые положения этой теории.

Прямые измерения

Обозначим истинное значение некоторой физической величины через x. Результаты n отдельных измерений – $x_1, x_2, \ldots, x_n$ (случайные величины). Тогда абсолютной ошибкой Δx_i i-го измерения называется разность: $\Delta x_i = x - x_i$. Абсолютные ошибки также являются случайными величинами. Огромное количество опытных фактов, накопленных в экспериментальной физике, позволяет установить два основополагающих предположения относительно абсолютных ошибок измерения:

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

2. Большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые, т.е. вероятность появления погрешности уменьшается с ростом величины погрешности.

Эти два предположения лежат в основе теории ошибок.

Найдем наиболее точную оценку величины x. С этой целью проведем ряд преобразований. Величины отдельных измерений можно выразить так:

$$x_1 = x - \Delta x_1;$$

$$x_2 = x - \Delta x_2;$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$x_n = x - \Delta x_n.$$

Почленное сложение всех равенств дает: $\sum_{i=1}^{n} x_i = n \cdot x - \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i$.

Отсюда для x получим

$$x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i + (1/n)\sum_{i=1} \Delta x_i = \langle x \rangle + \frac{1}{n}\sum_{i=1} \Delta x_i ,$$

где $\langle x \rangle = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ – среднее арифметическое из n измерений.

Из предположения 1 при $n \to \infty$ следует: $\lim \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i = 0$.

Поэтому при бесконечно большом числе измерений $x = <x>$. Однако в реальном эксперименте число измерений всегда ограничено, т.е. $x \cong < x >$. При обработке результатов измерений в качестве наиболее точного значения величины x принимается среднее арифметическое из n измерений.

Для оценки отклонения истинного значения x от среднего арифметического рассмотрим некоторые понятия теории вероятности.

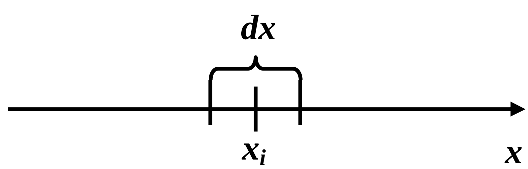
Случайная величина может быть дискретной (выпадение герба монеты или какой-либо грани кубика при подбрасывании), т.е. принимать ряд дискретных значений, или непрерывной (температура в помещении).

Для дискретной величины: если в N опытах случайная величина появляется N_i раз, то вероятность P появления этой величины равна

$$P = \lim_{N \to \infty} \frac{N_i}{N}.$$

Пример. Если подбросить монету 10 раз, то пусть герб выпадет 3 раза и $v_i = 0{,}3$ ($v_i = N_i / N$ – относительная частота появления герба в опыте). Но если подбросить монету 10^5 раз, то v_i будет очень близко к 0,5. Если подбросить 10^{10} раз, то v_i будет еще ближе к 0,5. Таким образом, величина 0,5 – вероятность появления герба в опыте. Понятие вероятности справедливо для случайных процессов. Мы не знаем, появится ли данное событие (выпадение герба) в опыте, но мы характеризуем появление этого события понятием вероятности и численным значением вероятности.

Если случайная величина x – непрерывная, то ставится вопрос: какова вероятность того, что случайная величина окажется в опыте в определенном бесконечно малом интервале dx около некоторого значения x_i.



Эта вероятность пропорциональна ширине интервала dx и зависит от значения x_i, т.е. $dP(x) = y(x)dx$. За вероятность появления случайной величины x в интервале dx около значения x_i $dP(x_i) = y(x_i)\,dx$ принимают относительную частоту появлений этой величины в интервале dx около значения x_i, когда число измерений стремится к бесконечности.

Главную роль в описании случайной величины, распределенной непрерывно, играет функция *y(x)*, которая называется функцией распределения вероятностей.

В математической статистике показано, что при выполнении предположений 1 и 2 функция распределения имеет вид (на рис.1 представлен график этой функции): $y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\ell^{-\frac{(x-\langle x\rangle)^2}{2\sigma^2}}$, где σ^2 – дисперсия распределения.

Распределение случайной величины такого типа называется нормальным распределением, или распределением Гаусса.

Как видно из рис. 1, дисперсия показывает, насколько широко разбросаны значения случайной величины относительно среднего значения.

Из теории математической статистики следует, что при *n* измерениях наиболее точную оценку дисперсии дает выражение

$$\Delta S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2}{n-1}} \approx \sigma .$$

Величина ΔS_x называется среднеквадратичной погрешностью отдельного измерения.

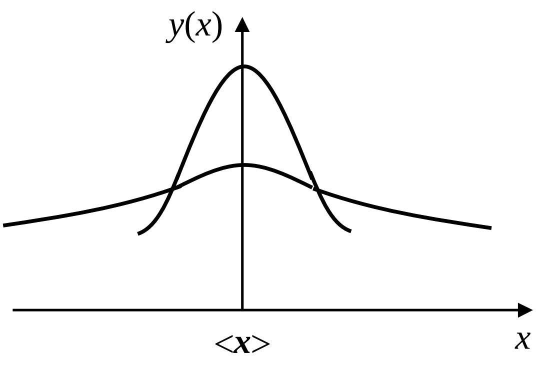


Рис. 1

Среднеквадратичная погрешность отдельного измерения характеризует разброс результатов единичных измерений около среднего значения. Но главная цель – оценить, насколько среднее значение близко к истинному. Если для этого рассмотреть серии измерений из n_1 опытов, n_2 и т.д., то в каждой серии можно определить $<x_1>$, $<x_2>$, $<x_3>$ и т.д. Эти средние значения будут отличаться друг от друга, и, более того, совокупность этих средних значений представляет собой набор случайных величин. Эти случайные величины также распределены по нормальному закону, который и будет характеризовать отличие $<x>$ от истинного, но с другой дисперсией $<\sigma^2>$. В теории математической статистики показано, что наилучшей оценкой $<\sigma>$ распределения средних значений является величина

$$\Delta S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \approx \langle \sigma \rangle .$$

Величина $\Delta S_{<x>}$ называется среднеквадратичной погрешностью среднего.

Величины σ и $<\sigma>$ связаны соотношением $<\sigma>=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, причем σ – величина постоянная, так как характеризует разброс результатов отдельных измерений. Поэтому, чем больше число измерений, тем меньше среднеквадратичная погрешность среднего $<\sigma>$ и тем меньше различие между $<x>$ и истинным значением x. При выполнении лабораторных работ число измерений обычно равно $5 \div 10$.

Характеристикой того, как сильно среднее арифметическое значение отличается от истинного, служит доверительный интервал, для которого известно, с какой вероятностью истинное значение может находиться внутри этого интервала. Величина этой вероятности выбирается экспериментатором и называется надежностью. При выполнении лабораторных работ рекомендуется надежность α, равная 0,95. Величина доверительного интервала Δx с заданной надежностью α равна

$$\Delta x = t_\alpha(n) \Delta S_{<x>} ,$$

где $t_\alpha(n)$ – коэффициент Стьюдента, который можно найти в таблице для n измерений и надежности α. Окончательный результат записывается в форме $x = <x> \pm \Delta x$ с надежностью α. При заметной величине систематической погрешности ошибки объединяют по формуле

$$\Delta x_{\text{общ}} = \sqrt{(\Delta x)^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \delta^2} ,$$

где $k_\alpha = \lim_{n \to \infty} t_\alpha(n)$; δ – систематическая погрешность прибора.

Часто для оценки погрешности используют относительную ошибку E, которая определяется выражением $E = \frac{\Delta x}{< x >}$ или в процентах: $E = \frac{\Delta x}{< x >} 100\%$.

Косвенные измерения

В математической статистике показано, что результат косвенных измерений <z> и погрешность косвенных измерений Δz (доверительный интервал), если зависимость имеет вид $z = f(x,y,\ldots)$, определяются выражениями

$$<z>= f\left(<x>,<y>,...\right),$$

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \ldots},$$

где <x>, <y>, … – результат прямых измерений; Δx, Δy, … – доверительные интервалы величин x, y, …, полученных в прямых измерениях. Результаты косвенных измерений записываются окончательно в виде z = <z> ± Δz,

$$E = \frac{\Delta z}{<z>}100\%.$$

Ниже в табл. 1 представлены выражения <z> и Δz для ряда наиболее часто встречающихся зависимостей.

Таблица 1

Вид функции	Среднее значение	Погрешность (Δz либо $\Delta z/z$)
$z = x \pm y$	$<z> = <x> \pm <y>$	$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$
$z = x \cdot y$ $z = x/y$, $z = y/x$	$<z> = <x> \cdot <y>$ $<z> = <x>/<y>$, $<z> = <y>/<x>$	$\frac{\Delta z}{<z>} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{<x>}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{<y>}\right)^2}$
$z = x^n$	$<z> = (<x>)^n$	$\frac{\Delta z}{<z>} = n \cdot \frac{\Delta x}{<x>}$
$z = \ell n\, x$	$<z> = \ell n <x>$	$\Delta z = \frac{\Delta x}{<x>}$
$z = \ell^x$	$\langle z \rangle = \ell^{\langle x \rangle}$	$\frac{\Delta z}{\langle z \rangle} = \Delta x$

Представление экспериментальных результатов

Полученные в опыте значения измеряемой величины заносятся, как правило, в таблицу либо представляются в виде графика.

В табл. 2 указываются единицы измерения физических величин и десятичный множитель.

Таблица 2

№ п/п	Материал	σ, Н/м^2	$\Delta\ell/\ell_0$	$E\cdot10^{-10}$, Н/м^2
1	Латунь			
2	Алюминий			

Представление результатов измерений в виде графиков необходимо для наглядности и определения ряда величин. Масштаб выбирается таким, чтобы, во-первых, экспериментальные точки не сливались, во-вторых, обозначался простыми числами (10, 100, 0,1 и т.д. единиц соответствовали 1 см), в-третьих, занимал размеры около страницы. По осям откладываются деления и указываются символы величин и их единицы измерения. Погрешности изображаются в виде отрезков длиной в доверительный интервал. На рис. 2 представлен график зависимости углового ускорения ε от момента внешних сил M маятника Обербека, полученный в лабораторной работе “Изучение динамики вращательного движения твердого тела”.

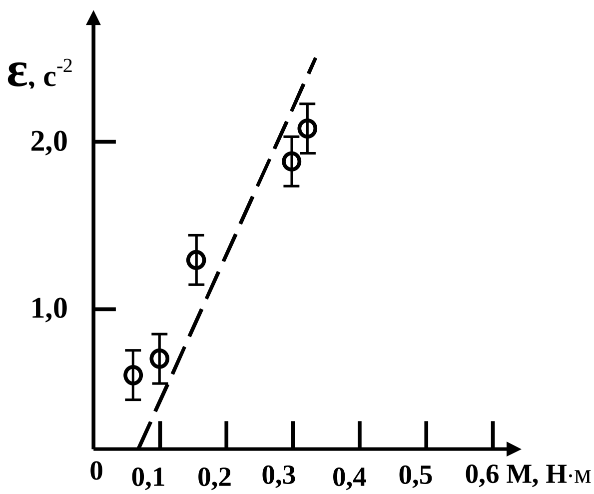


Рис. 2:
– *экспериментальные точки с указанием погрешности;*
- - - – *аппроксимирующая линия*

В физике широко распространена линейная зависимость между величинами, в том числе и между теми, которые изучаются экспериментально. В этом случае наилучший вид аппроксимирующей прямой может быть выбран методом наименьших квадратов. Рассмотрим этот метод.

Пусть в эксперименте в n измерениях получены пары значений (x_1, y_1), (x_2, y_2), … , (x_n, y_n), отвечающие зависимости $y = ax + b$, параметры a и b которой должны быть найдены. Предполагается, что с погрешностями определена лишь совокупность значений y. Тогда отклонение в каждом i-м изменении значения аппроксимирующей прямой от экспериментально полученного y_i составляет: $y_i - ax_i - b$. Наилучшие значения a и b выбираются так, чтобы сумма квадратов ошибки $S = \sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)^2$ была минимальной. Из условия минимума следует

$$\frac{dS}{da}=\sum_{i=1}^{n}\left[-2x_i\left(y_i-ax_i-b\right)\right]=0;$$

$$\frac{dS}{db}=\sum_{i=1}^{n}\left[-2\left(y_i-ax_i-b\right)\right]=0.$$

Для определения a и b получается система из двух уравнений

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{n}x_i^2+b\sum_{i=1}^{n}x_i=\sum_{i=1}^{n}x_iy_i; \\ a\sum_{i=1}^{n}x_i+b\cdot n=\sum_{i=1}^{n}y_i. \end{cases}$$

Отсюда вытекают формулы для искомых a и b

$$a=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-<x>\right)y_i}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-<x>\right)^2};\ b=<y>-a<x>.$$

Приближенные вычисления

Результат измерений представляет собой приближенное число, точность которого определяется ошибкой.

Пусть, например, в опыте с математическим маятником погрешность определения ускорения свободного падения равна 0,05 м/с^2, а g равно 9,83 м/с^2. Результат записывается в виде g = 9,83 ± 0,05 м/с^2. Очевидно, что вычислять результат опыта с точностью до тысячных долей не имеет смысла, так как ошибка составляет сотые доли, и тем более бесполезно указывать тысячные доли при записи результата.

Полученное число (результат измерений) – приближенное, последняя цифра – сомнительная, а остальные верные. Так получается при любых измерениях.

При записи окончательного результата оставляют только значащие цифры (верные и сомнительную цифры). Если приближенное число входит в расчетную формулу, в нем сохраняют одну “неверную” цифру. Далее пользуются правилами вычислений с приближенными числами и правилами округления.

Контрольные вопросы

1. Как определяется величина систематической ошибки?

2. Как определяется величина случайной ошибки прямых измерений? На что указывает величина доверительного интервала?

3. Выразить доверительный интервал величины z, полученной при косвенных измерениях, через доверительные интервалы величин x, y, t, r, u, v, h, полученных в прямых измерениях для следующих зависимостей:

а) $z = \pi r^2 \cdot h$; б) $z = r(x^2 - y^2)/t^4(u^2 - v^2)$; в) $z = x^2 \cdot \cos y$.

4. Как изобразится на графике погрешность величины, отложенной вдоль оси абсцисс?

Список рекомендуемой литературы

1. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. – М.: МГУ, 1977. – 112 с.

2. Сквайрс Дж. Практическая физика. – М.: Мир, 1971. – 248 с.

3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1967. – 352 с.

4. Лабораторный практикум по физике. Механика / Под. ред. А.А. Кулиша; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1992. – 68 с.

5. Методические указания к лабораторным работам по физике. Молекулярная физика / Под ред. А.А. Кулиша; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1992. – 40 с.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет студента по лабораторной работе составляется по следующей схеме: 1. Титульный лист. 2. Цель работы. 3. Оборудование. 4. Теоретическое введение. 5. Методика проведения эксперимента. 6. Экспериментальная часть. 7. Обработка результатов измерения. 8. Выводы.

Титульный лист оформляется на первой странице отчета. В центральной части этой страницы указываются номер лабораторной работы и ее название. Ниже (справа) фамилия исполнителя, номер группы и дата проведения измерений. В правом нижнем углу – три короткие строчки для подписи преподавателя: “к работе допущен”, “работа выполнена”, “работа защищена”. Со второй страницы следует описание остальных разделов отчета. Пункты 1 – 5 выполняются до начала выполнения лабораторной работы, пункт 6 – в лаборатории, пункты 7 – 8 после получения экспериментальных данных.

Теоретический материал, схемы, рисунки должны быть представлены в отчете в объеме, необходимом для осмысленного выполнения лабораторной работы. Рисунки и схемы выполняются с применением чертежных принадлежностей. Графики представляются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет.

По заочной форме обучения на выполнение лабораторных работ выделяется малый объем учебных аудиторных часов. Поэтому студентам-заочникам необходимо самостоятельно до начала занятий детально изучить описание лабораторной работы, используя дополнительно список рекомендуемой литературы. Качество своей подготовки студенты должны проверять, отвечая на контрольные вопросы. Домашняя самостоятельная подготовка студента-заочника “отражается” письменно в той части отчета, которая оформляется до начала выполнения лабораторной работы (пункты 1 – 5).

1. *МЕХАНИКА*

В лаборатории механики учащиеся применяют разнообразные измерительные инструменты в сочетании с действием автоматизированных установок. Лабораторные работы по механике направлены на освоение студентами методов статистической обработки данных физического эксперимента, методов исследования основных закономерностей поступательного и вращательного движения тел. Также изучаются свойства ряда важнейших механических величин.

Лабораторная работа № 1-1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: определение параметров распределения результатов измерений и получение приближенного вида функции распределения.

Оборудование: микрометр, штангенциркуль, набор цилиндров.

Введение

Набор цилиндров (100 … 200 шт.), используемый в данной лабораторной работе – это совокупность одинаковых объектов, изготовленных в одинаковых условиях. Поэтому при измерении высоты (или диаметра) цилиндров, казалось бы, должна получаться одна и та же физическая величина. Однако в силу влияния большого количества причин, действующих случайно, совокупность высот цилиндров представляет собой набор случайных величин, моделирующих разброс результатов отдельных измерений в физическом эксперименте.

Это распределение характеризуется параметрами:

1) среднее арифметическое значение высоты $< h >= \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{n} \right)$;

2) дисперсия $\sigma^2 \cong \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(h_i - < h > \right)^2}{n}$;

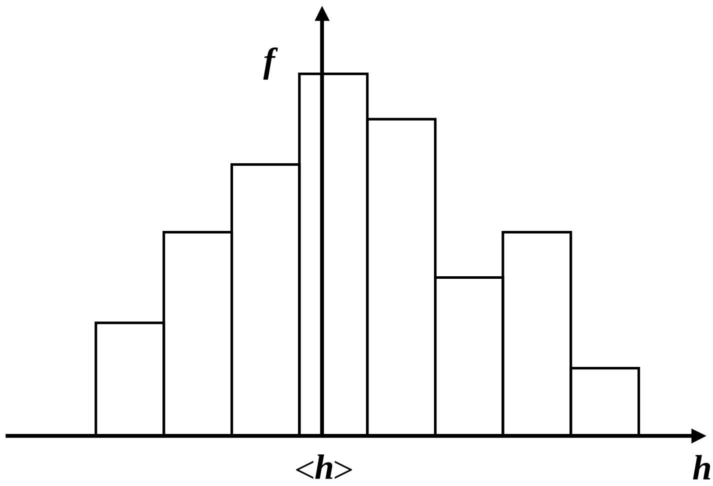
3) среднеквадратичная погрешность $\Delta S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(h_i - < h > \right)^2}{n}}$ (где n – число измерений).

Если бы число измерений было бесконечно большим, то $<h>$ совпадало бы с истинным значением высоты цилиндра, а ΔS_n с σ. График распределения отдельных значений h_i относительно $<h>$ имел бы вид, подобный рис. 1. на с. 8. Число измерений ограничено, но и в этом случае удается получить приближенный вид функции распределения результатов измерений, построив гистограмму (столбчатую диаграмму).

Для построения гистограммы необходимо отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ (где $h_{\max}$ – максимальное из измеренных значений высот цилиндра, $h_{\min}$ – минимальное из измеренных значений высот цилиндра) разбить на N равных интервалов величины Δh, подсчитать число "попаданий" n_i значений высот цилиндров в каждый интервал и относительную частоту попаданий в каждый интервал $f_i = n_i / n$.

Если значение высоты цилиндра попадает на границу интервалов, то этот цилиндр учитывается в правом интервале. Для количественного сравнения кривой Гаусса с гистограммой в последней по оси ординат необходимо отложить величину оценки плотности вероятности каждого интервала $\frac{n_i}{n \cdot \Delta h}$. Проделанные разбиения и расчеты в табличной форме имеют вид:

Число интервалов	Интервал	n_i	$f_i = \frac{n_i}{n}$	$n_i/(n \cdot \Delta h)$
1	$h_{\min} \div h_1$	n_1	f_1	$f_1/\Delta h$
2	$h_1 \div h_2$	n_2	f_2	$f_2/\Delta h$
.	………….	…	…	…
№	$h_{N\text{-}1} \div h_{\max}$	n_N	f_N	$f_N/\Delta h$



По значениям, представленным в таблице, строится гистограмма (см. рисунок). Как видно из рисунка, гистограмма – это совокупность прямоугольников, у которых одна сторона у всех равна ширине интервала Δh, а вторая – частоте попадания значений высот цилиндров в соответствующий интервал.

Порядок выполнения работы

1. Измерить высоты 100 … 200 цилиндров и результаты внести в отчет.

2. Определить по полученным значениям высот цилиндров: максимальное из измеренных значений высот цилиндров, минимальное из измеренных значений высот цилиндров, среднее значение высоты цилиндров, дисперсию распределения, среднеквадратичную погрешность распределения.

3. Разбить отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ на 6 ÷ 8 интервалов. Определить число попаданий и относительную частоту попаданий для каждого интервала. Полученные значения представить в табличной форме подобно таблице выше.

4. Построить гистограмму для распределения относительной частоты попаданий f_i на миллиметровой бумаге.

5. Построить гистограмму оценки плотности вероятности $n_i/(n \cdot \Delta h)$. Изобразить пунктиром там же Гауссову кривую по рассчитанным в п.2 значениям $\langle h \rangle$ и σ^2, воспользовавшись формулой $f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(h - \langle h \rangle)^2}{2\sigma^2}}$.

6. Сравнить Гауссову кривую с гистограммой оценки плотности вероятности и проанализировать полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Как построить гистограмму?
2. Чем определяется число интервалов, на которое разбивается отрезок $h_{\max} - h_{\min}$ при построении гистограммы?
3. Как в эксперименте добиться того, чтобы гистограмма точнее отображала функцию распределения результатов эксперимента.
4. Укажите способ определения дисперсии по известному виду кривой функции распределения.

Список рекомендуемой литературы

1. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 511 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И. Иверноновой. – М.: Наука, 1967. – 352 с.
4. Методические указания к лабораторным работам по физике с обработкой результатов экспериментов на персональном компьютере/ Сост. О.Я. Бутковский, В.Н. Кунин; Под ред. В.С. Плешивцева. Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1999. – 44 с.

Лабораторная работа № 1-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПИКНОМЕТРОМ

Цель работы: освоение методов точного взвешивания на аналитических весах, определение плотности твердых тел и типа вещества.

Оборудование: кусочки однородного твердого тела, аналитические весы типа “*W*”, пикнометр, разновес, сосуд с дистиллированной водой, фильтровальная бумага, термометр, пипетка.

Введение

Плотность ρ_T однородного вещества определяется отношением: $\rho_T = \frac{m}{V}$, где m – масса вещества, V – объем. Масса вещества может быть найдена с помощью взвешивания тела на аналитических весах, объем – с помощью пикнометра и ряда операций взвешивания на аналитических весах.

В данной работе используются аналитические весы типа “*W*”, предельная нагрузка которых составляет 200 г, а точность отсчета – 0,1 мг. Прилагается инструкция с описанием аналитических весов.

Основные правила взвешивания следующие:

1. Весы в свободном состоянии необходимо арретировать, т. е. поднять основную часть аналитических весов – коромысло. Арретирование производится медленно и плавно.

2. Грузы и разновесы помещаются и снимаются с чашек только после арретирования весов.

3. Измерения проводятся при выключенном арретире.

Пикнометр представляет собой стеклянный сосуд неизменного объема, на горлышко которого нанесена метка. Жидкость в пикнометре должна устанавливаться только на уровне метки. При выполнении лабораторной работы этого добиваются с помощью пипетки. Пикнометр используется для определения объема кусочков твердого тела. Если M – масса пикнометра с дистиллированной водой, а M' – масса с водой и кусочками тела, то величина $M + m - M'$ представляет собой массу воды, вытесненную из пикнометра этими кусочками. По известной плотности дистиллированной воды $\rho_в$ объем V кусочков твердого тела определяется выражением $V = \frac{M + m - M'}{\rho_в}$, а искомая плотность ρ_T формулой $\rho_T = \frac{m}{M + m - M'}\rho_в$.

Порядок выполнения работы

1. Набрать кусочки однородного твердого тела (кусочки проволоки) и поместить на одну из чашек аналитических весов. На другую чашку весов поместить разновесы. Взвесить кусочки твердого тела (определить величину m). Масса кусочков должна быть достаточно большой (вместе с пикнометром, наполненным водой около 200 г), чтобы разность в знаменателе выражения для ρ_T имела наименьшую ошибку.

2. Наполнить пикнометр дистиллированной водой до метки и взвешиванием определить массу *M*. Уровень воды должен доходить до метки нижним краем мениска. Воду добавлять и отбирать пипеткой. Капельки воды со стенок удалять встряхиванием пикнометра.

3. Поместить в пикнометр с водой кусочки твердого тела, отобрать воду пипеткой до метки и взвешиванием определить массу M'.

4. Вычислить плотность твердого тела, воспользовавшись формулой для ρ_T, измеренными средними значениями $<m>$, $<M>$, $<M'>$ и значениями из таблицы для плотности дистиллированной воды при температуре измерений.

5. Вывести формулу расчета погрешности косвенных измерений плотности твердого тела $\Delta\rho_T$ и вычислить ее, предварительно найдя погрешности прямых измерений m, M, M'.

Определить тип твердого тела, используя таблицы плотности твердых тел (металлов).

Дополнительное задание

Учесть влияние выталкивающей силы воздуха, действующей согласно закону Архимеда, при взвешивании тела. Оценить величину поправки, обусловленной выталкивающей силой воздуха, к массе пикнометра с водой *M*, считая, что масса 1 см^3 воздуха 0,0012 г. Плотность дистиллированной воды при различных температурах приведена в таблице.

t, °C	$\rho_в$, г/см^3	t, °C	$\rho_в$, г/см^3	t, °C	$\rho_в$, г/см^3
15	0,99913	21	0,99802	27	0,99654
16	0,99897	22	0,99780	28	0,99626
17	0,99880	23	0,99757	29	0,99597
18	0,99862	24	0,99732	30	0,99567
19	0,99843	25	0,99707	31	0,99537
20	0,99823	26	0,99681	32	0,99505

Контрольные вопросы

1. Какое предельное значение может принимать масса пикнометра с водой и кусочками твердого тела M' в данной лабораторной работе?

2. Почему масса кусочков твердого тела, плотность которого определяется, должна быть достаточно большой?

3. Как учитывается температура окружающей среды при измерении плотности твердых тел пикнометром?

4. Как учесть влияние выталкивающей силы воздуха, действующей согласно закону Архимеда, при взвешивании тела?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.

2. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высш. шк., 1980. – 326 с.

3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1967. – 352 с.

Лабораторная работа № 1-3

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: изучение законов динамики поступательного равномерного и равноускоренного движения, определение ускорения свободного падения.

Оборудование: измерительная установка.

Введение

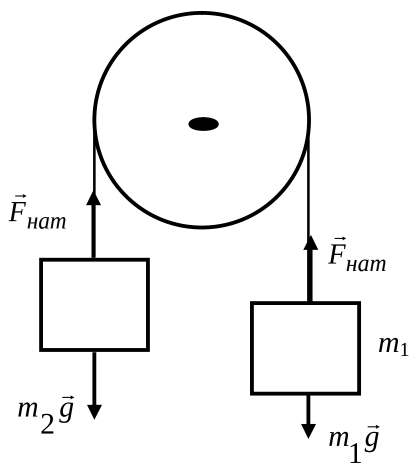


Рис. 1

Рассмотрим поступательное движение двух грузов, перекинутых через блок (рис. 1). Нить принимается нерастяжимой; массой нити, моментом инерции блока и трением в оси блока пренебрегаем.

Пусть $m_1 > m_2$. Уравнения движения для этого случая выглядят следующим образом:

$$m_1 g - F_{нат} = m_1 a, \qquad (1)$$

$$F_{нат} - m_2 g = m_2 a, \qquad (2)$$

где m_1 и m_2 – массы грузов; $F_{нат}$ – сила натяжения нити; a – ускорение грузов; g – ускорение свободного падения.

Из (1) и (2) получаем

$$g = \frac{a(m_1 + m_2)}{m_1 - m_2}. \quad (3)$$

Описание установки

Экспериментальная установка (машина Атвуда) изображена на рис. 2.

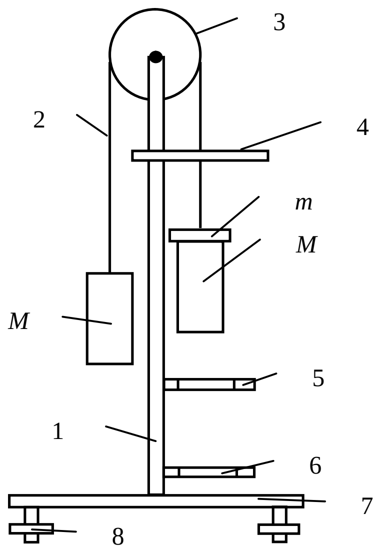


Рис. 2

На вертикальной колонке 1, закрепленной на основании 7, три кронштейна: неподвижный нижний 6 и два подвижных – средний 5 и верхний 4. Основание оснащено регулируемыми ножками 8, которые позволяют выравнивать положение прибора. Сверху на колонке закреплен ролик 3 и электромагнит (на рис. 2 не показан). Через ролик перекинута нить 2 с привязанными на ее концах одинаковыми грузами *M*. Электромагнит после подведения к нему питающего напряжения при помощи фрикционной муфты удерживает систему ролика с грузами в состоянии покоя.

Если на одну сторону блока прибавим небольшой груз массой *m*, тогда система грузов получит ускорение и, передвигаясь с этим ускорением, пройдет путь S_1. На специальном кольце, закрепленном на среднем кронштейне, дополнительный груз будет отцеплен, и грузы пройдут уже равномерно путь S_2.

На среднем и нижнем кронштейнах имеются фотоэлектрические датчики. При прохождении грузом положения датчика образуется электрический импульс, сигнализирующий о начале равномерного движения грузов и запускающий секундомер. После пересечения грузом линии фотоэлектрического датчика, закрепленного на нижнем кронштейне, соответствующий электрический импульс останавливает секундомер. Таким образом, автоматически определяется время прохождения t_2 грузами расстояния S_2.

К концу равноускоренного движения грузы имеют ускорение *a* и скорость *V*, связанные соотношением $V = at_1$, отсюда

$$a = \frac{V}{t_1}. \quad (4)$$

Время t_1 можно определить из соотношения

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}. \qquad (5)$$

Со скоростью V система грузов проходит расстояние S_2 соответственно:

$$V = \frac{S_2}{t_2}. \qquad (6)$$

Из выражений (4) – (6) несложно получить:

$$a = \frac{S_2^2}{\left(2S_1 \cdot t_2^2\right)}. \qquad (7)$$

Подставляя (7) в (3), получим результирующее расчетное соотношение для получения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{(2M + m)S_2^2}{\left(m \cdot 2S_1 t_2^2\right)}. \qquad (8)$$

Порядок выполнения работы

1. Проверить, находится ли система грузов *M* (без перегруза) в состоянии равновесия.

2. Установить верхний и средний кронштейны на заданные преподавателем положения (на кронштейнах имеются указатели положения).

3. Проверить, не задевают ли грузы *M* при движении кронштейны. Если задевают, то при помощи регулируемых ножек основания привести колонку прибора к вертикальному положению и отрегулировать положение кронштейнов.

4. Проверить визуально наличие и исправность заземления.

5. Подключить установку к сети питания. Переместить правый грузик в верхнее положение (нижний край груза на уровне риски на кронштейне). Нажать клавишу “Сеть”, при этом при ненажатых клавишах “Пуск” и “Сброс” электромагнит с помощью фрикционной муфты должен застопорить ролик 3.

Положить на правый груз дополнительный кольцевой грузик (“перегрузка”). Проверить, находится ли система в состоянии покоя (если система медленно перемещается, то можно слегка нажать на сердечник электромагнита).

6. Нажать на кнопку “Пуск” (система придет в движение). Записать измеренное значение времени движения грузика на пути S_2. Нажать клавишу “Сброс”. Поднять груз в первоначальное положение. Нажать клавишу

“Пуск” в “утопленном” положении, чтобы она перешла в нормальное (“не-утопленное”) положение; ролик застопорится, и система готова к новым измерениям.

7. Повторить измерения с одним перегрузом 4 – 5 раз. Найти среднее значение времени движения $<t_2>$.

8. Найти массу перегруза m на аналитических весах (если он не маркирован). Измерить и записать значения S_1 и S_2.

9. Рассчитать g по формуле (8).

10. Повторить измерения с другими перегрузами (по указанию преподавателя).

11. Найти среднее значение $<g>$.

12. Рассчитать погрешность определения g как погрешность косвенных измерений.

$$\Delta g = <g> \sqrt{\left(\frac{2\Delta M + \Delta m}{2M + m}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta S_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{t_2}\right)^2} .$$

Дополнительное задание

Определить величину силы трения при измерении ускорения свободного падения на машине Атвуда.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать законы Ньютона.
2. Какое движение называется равномерным, равноускоренным? Нарисовать графики зависимостей ускорения, скорости, пути от времени для равномерного и равноускоренного движения.
3. Как влияет на точность измерений величина расстояний S_1 и S_2? Величина перегрузки? Трение в блоке?
4. Почему измеренное ускорение свободного падения меньше чем 9,8 м/с^2.

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика: В 5 т. Т. 1. – М.: Наука, 1979. – 519 с.

3. Каленков С.Г., Соломахо Г.И. Практикум по физике. Механика. – М.: Высш. шк., 1990. – 112 с.

Лабораторная работа № 1-5

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

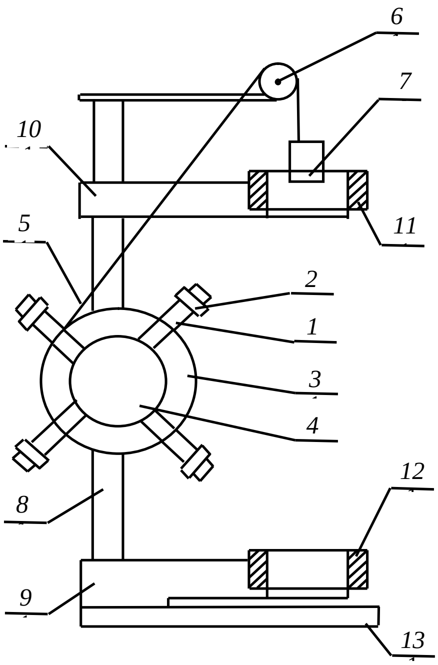
Цель работы: экспериментальное изучение уравнения динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси и ознакомление с динамическим методом определения момента инерции твердого тела.

Оборудование: лабораторные установки с маятником Обербека в двух модификациях(тип установки указывает преподаватель):

1. “Механический” маятник Обербека с грузами, штангенциркуль, секундомер, масштабная линейка, весы с разновесами.

2. “Автоматический” маятник Обербека с грузами (с автоматической регистрацией времени движения грузов и автоматической установкой маятника), штангенциркуль.

Введение



Уравнение вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси имеет вид

$$Y\varepsilon = M, \quad (1)$$

где M – сумма проекций на ось вращения всех моментов внешних сил, действующих на тело; Y – момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси вращения; ε – угловое ускорение тела.

На рисунке приведена схема маятника Обербека, с помощью которого можно исследовать уравнение (1). Четыре спицы 1 соединены с втулкой резьбой под прямым углом, образуя крестовину. На спицах находятся цилиндрические грузы 2 массой m_1 каждый. Передвигая эти грузы по спицам, можно изменить момент инерции крестовины, а также сбалансировать маятник. Втулка и два шкива 3, 4 радиусами r_1 и r_2 насажены на общую ось, которая закреплена в подшипниках так, что вся система может вращаться вокруг горизонтальной оси. К шкиву (3 или 4) прикреплена нить 5, которая перекинута через блок 6. К концу нити привязана легкая платформа 7 известной массы. На платформе размещаются грузы, которые натягивают нить и создают вращающий момент внешних сил $M = T\,r$, где T – сила натяжения нити; r – радиус шкива. Силу T можно найти из уравнения (в проекциях на вертикальную ось) движения платформы с грузом $m\,g - T = m\,a$, где a – ускорение груза, m – масса платформы с грузом, g – ускорение свободного падения. Выразив отсюда T и подставив в выражение для M, получим:

$$M = m\,(g - a)\,r. \tag{2}$$

Так как нить практически нерастяжима, то ускорение a связано с угловым ускорением ε соотношением $\varepsilon = a / r$. Ускорение груза, высота его падения h и время падения t связаны формулой для равноускоренного движения $h = a\,t^2 / 2$. Выразив отсюда a и подставив его в формулу для ε и (2), получим:

$$\varepsilon = 2\,h / r\,t^2 = 4\,h / D\,t^2; \tag{3}$$

$$M = m\,(g - 2\,h / t^2)\,D / 2, \tag{4}$$

где D – диаметр шкива. По полученным значениям M и ε, используя (1), можно вычислить момент инерции маятника.

При учете сил трения на оси маятника Обербека уравнение, описывающее вращательное движение, принимает вид:

$$Y\,\varepsilon = M - M_{\text{тр}}, \tag{5}$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент силы трения.

Описание установки

1. “Механический” маятник Обербека изготовлен в виде переносного настольного прибора, схема которого соответствует рисунку. Маятник закреплен в металлическом каркасе так, что оси шкива 3 и блок 6 расположены на одном уровне и нить 5 от шкива 3 до блока 6 идет горизонтально.

2. “Автоматический” маятник Обербека представляет собой переносной настольный прибор. С помощью двух кронштейнов: нижнего неподвижного 9 и верхнего подвижного 10 маятник закреплен на вертикальной колонке 8. Основание колонны снабжено регулируемыми ножками, обес-

печивающими горизонтальную установку прибора. Наверху колонны закреплен подшипниковый узел блока 6. На неподвижной втулке (закрытой шкивом 4) прикреплен тормозной электромагнит, который после подключения к нему напряжения питания удерживает с помощью фиксированной муфты систему крестовины вместе с грузами в состоянии покоя. Подвижный кронштейн 10 можно перемещать вдоль колонны и фиксировать его в любом положении, определяя, таким образом, длину пути падения груза h. Для отсчета длины пути на колонне нанесена миллиметровая шкала. На подвижном кронштейне размещен фотоэлектрический датчик 11, который (после нажатия клавиши "Пуск") запускает систему начала отсчета времени движения груза – схему работы миллисекундомера. На неподвижном кронштейне 9 закреплен фотоэлектрический датчик 12, вырабатывающий электроимпульс конца измерения времени движения груза и включающий тормозной электромагнит. К кронштейну 9 прикреплен кронштейн 13 с резиновым амортизатором, ограничивающим движение грузов. На основании прибора закреплен миллисекундомер, к гнездам которого подключены фотоэлектрические датчики 11, 12. На лицевой панели миллисекундомера расположены элементы управления: "СЕТЬ" – выключатель сети. Нажатие клавиши вызывает включение напряжения питания (при повторном нажатии – выключение) и автоматическое обнуление прибора (все индикаторы высвечивают цифру нуль, и светят лампочки фотоэлектрических датчиков). "СБРОС" – обнуление измерителя, при нажатии этой клавиши на табло секундомера будут высвечивать нули. "ПУСК" – управление электромагнитом. Нажатие клавиши вызывает освобождение электромагнита и генерирование импульса, разрешающего измерения.

Порядок выполнения работы

1. *Маятник Обербека*

1.1. С помощью регулируемых ножек прибора привести ось маятника в горизонтальное положение.

1.2. Провести балансировку маятника.

Для этого на двух противоположных спицах крестовины оставьте по одному грузу m_1 на выбранных расстояниях R от оси вращения. Закрепив винтом на спице один из грузов на расстоянии R и передвигая второй груз на противоположной спице, добейтесь равновесия маятника и закрепите винтом в этом положении второй груз. Затем таким же образом сбалансируйте грузы на второй паре спиц на таком же расстоянии от оси вращения, и если маятник сбалансирован, то он находится в безразличном равновесии. Внести R в протокол измерений.

1.3. Измерить диаметр шкива D и внести его в протокол измерений.

1.4. Намотать нить на шкив, поднимая платформу с грузом 7 (m) на определенную высоту h (например, до уровня стола, на котором стоит прибор). Отпустить платформу с грузом с этой высоты, запуская одновременно секундомер. После прохождения платформы расстояния h остановить секундомер и занести время движения груза t в таблицу измерений.

С одним и тем же грузом рекомендуется проводить не менее трех измерений времени падения груза. Для расчета M и ε по формулам (3) и (4) берется среднее время движения данного груза.

1.5. Измерить M и ε для 5 – 6 разных грузов, постепенно нагружая платформу.

1.6. Построить график зависимости $\varepsilon(M)$ и проанализировать его.

1.7. Провести аппроксимирующую прямую, используя метод наименьших квадратов. Определить момент инерции маятника Обербека и момент сил трения, действующих на оси, согласно уравнению (5).

2. *На "автоматическом" маятнике Обербека*

2.1. Проверить надежность заземления прибора.

2.2. С помощью регулирующих ножек основания привести колонну прибора в вертикальное положение.

2.3. Сдвинуть верхний подвижный кронштейн 10 по колонне прибора 8 на выбранную высоту h и так установить , чтобы грузы 7, падая, проходили через середину рабочего окна фотоэлектрических датчиков. Занести h в протокол измерений.

2.4. Сбалансировать маятник (см. п. 1.2). При балансировке нужно следить, чтобы при вращении маятника грузы на спицах или винты, крепящие эти грузы, не задевали за основание, на котором закреплен подшипниковый узел крестовины. По этой причине грузы на спицах нельзя сдвигать к оси вращения маятника ближе третьей (считая от оси вращения) риски на спицах.

2.5. Измерить диаметр шкива D (или получить его значение от преподавателя) и внести его в протокол измерений.

ВНИМАНИЕ! Шкивы пластмассовые, имеют тонкие ребра, между которыми двигается нить. Расстояние между ребрами такое, что в них губки штангенциркуля входят вплотную и при неосторожном измерении (при перекосе штангенциркуля) эти ребра можно сломать.

2.6. Включить сетевой шнур в сеть питания.

2.7. Нажать клавишу “СЕТЬ”, проверить, светятся ли лампочки индикаторов обоих фотоэлектрических датчиков; на табло миллисекундомера должны высвечиваться нули.

2.8. Нажать клавишу “ПУСК”. При этом освободится блокировка движения тормозных электромагнитов.

2.9. Вращая крестовину против часовой стрелки и наматывая нить, перекинутую через блок 6, на шкив 3 или 4, поднять платформу с грузом 7 в верхнее положение, установив дно платформы точно на уровне с чертой на корпусе верхнего фотоэлектрического датчика. Нажать клавишу “ПУСК” еще раз. В этом случае движение груза будет заблокировано тормозным электромагнитом, и груз должен находиться в состоянии покоя.

2.10. Нажать клавишу “ПУСК” повторно. Произойдет разблокировка движения тормозным электромагнитом, груз придет в движение и будет запущен секундомер, измеряющий время движения груза. При прохождении грузом окна нижнего фотоэлектрического датчика сработает механизм торможения груза и на табло секундомера зафиксируется время движения груза. Занести это время в таблицу измерений. С одним и тем же грузом рекомендуется проводить не менее трех измерений времени падения.

2.11. Нажать клавишу “СБРОС”. При этом произойдут сброс показаний секундомера (на табло секундомера будут высвечивать нули) и освобождение блокировки движения тормозным электромагнитом.

2.12. Выполнить пункты 2.8 – 2.11 для 5-6 разных грузов, постепенно нагружая платформу.

Дополнительное задание

Изучить зависимость момента инерции маятника Y от расстояния R до оси вращения грузов m_1 на спицах при постоянной массе груза m на платформе. Построить график $Y = f(R^2)$. По графику определить Y_0 – момент инерции маятника без грузов m_1 на спицах.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения.
2. Что такое момент инерции? Как можно изменить момент инерции маятника Обербека в данной работе?
3. Что такое момент силы? Как можно изменить момент силы, действующий на маятник Обербека, в данной работе?
4. Может ли влиять площадь платформы на общую величину момента сил трения?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.
2. Лабораторные занятия по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983. – 425 с.
3. Каленков С.Г., Соломахо Г.И. Практикум по физике. Механика. – М.: Высш. шк., 1990. – 112 с.

Лабораторная работа № 1 – 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: изучение деформации сдвига металлов.

Оборудование: крутильный маятник, электронная установка, миллиметровая линейка, технические весы, микрометр, электрический секундомер.

Введение

Деформация – это изменение формы и размеров тела под действием внешних сил. Если после прекращения действия внешних сил тело полностью восстанавливает свою первоначальную форму, то такие деформации называются абсолютно упругими. Различают два вида деформаций. Деформация растяжения (сжатия) и деформация сдвига. При деформации сдвига все плоские слои твердого тела, параллельные некоторой плоскости, смещаются параллельно друг другу, не искривляясь и не изменяясь в размерах.

Возникающие в твердом теле при деформации упругие силы подчиняются закону Гука, который в относительной форме для деформации сдвига можно сформулировать следующим образом: относительная деформация сдвига прямо пропорциональна приложенному касательному напряжению. Для небольших деформаций, которые можно считать абсолютно упругими, величина относительной деформации равна $\Delta l / L$ (рис. 1). Тогда закон Гука для деформации сдвига имеет вид

$$\Delta l/L = \Psi = P_r / G, \tag{1}$$

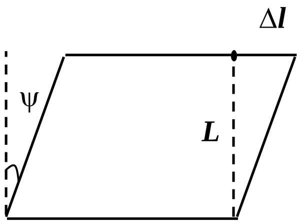


Рис. 1

где P_r – приложенное касательное напряжение; G – модуль сдвига.

Поскольку деформация при кручении есть деформация сдвига, то, изучая крутильные колебания, можно определить основную характеристику упругих свойств при сдвиге – модуль сдвига.

Описание установки

Крутильный маятник, с помощью которого изучаются крутильные колебания, состоит из твердого тела, подвешенного на вертикальной тонкой нити или стержне (рис. 2). При отклонении стержня из положения равновесия в нем будут возникать упругие силы деформации сдвига, направленные к положению равновесия. Если записать основной закон динамики вращательного движения для такой системы с учетом того, что угловое ускорение равно $d^2\Psi/dt^2$, то уравнение движения будет аналогично уравнению свободных незатухающих колебаний

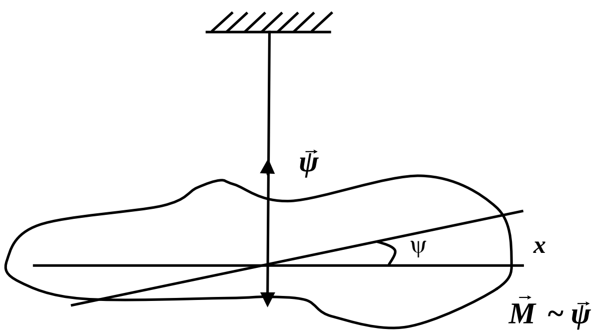


Рис. 2

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \omega_0^2\psi = 0. \tag{2}$$

где $\omega_0^2 = D/Y$, $T_0 = 2\pi\sqrt{Y/D}$;

Y – момент инерции тела, $D = \pi d^4 G/32L$;

T_0 – период собственных колебаний;

L – длина стержня;

d – диаметр проволоки.

Таким образом, измерив период колебаний и определив момент инерции тела, можно найти модуль сдвига.

Если определение периода не составляет труда, то измерение момента инерции затруднительно, поскольку практически невозможно учесть все детали установки при вычислении момента инерции.

Эту трудность можно обойти, если учесть следующее: а) момент инерции – величина аддитивная, т.е. момент инерции всей установки равен сумме моментов инерций всех ее частей; б) теорема Штейнера связывает моменты инерции тела относительно параллельных осей. Исходя из этого момент инерции всего тела можно представить как сумму

$$Y = Y_0 + \tilde{Y}\ , \qquad (3)$$

где Y_0 – момент инерции какой-то эталонной части твердого тела;
$\tilde{Y}$ – момент инерции всего остального.

Тогда, определяя периоды колебаний для двух различных эталонных тел или для двух положений эталонного тела относительно оси вращения, можно, вычитая, исключить $\tilde{Y}$.

В данной работе реализуются два способа определения модуля сдвига.

В первом способе используется « механическая » установка, в ней маятник представляет собой подвешенный на тонкой металлической проволоке диаметром d стержень, вдоль которого перемещаются два калиброванных груза массой m (рис. 3). Тогда, измеряя периоды колебаний для двух различных положений груза l_1 и l_2, находят разность моментов инерции для этих двух положений, получим выражение модуля в сдвиге в виде:

$$G = 64\pi mL \frac{(l_1 - l_2)}{d^4 (T_1^2 - T_2^2)}\ . \qquad (4)$$

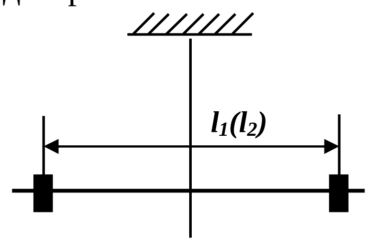


Рис. 3

Второй способ реализован с помощью электронной установки FPM-05, которая представляет собой рамку для крепления эталонных тел правильной формы, подвешенную на тонкую металлическую нить. Измеряя периоды колебаний для двух тел с известными моментами инерции или для одного тела относительно двух различных главных осей инерции, получим:

$$Y_1 = Y_0 + Y_{э1}, \qquad (5)$$
$$Y_2 = Y_0 + Y_{э2}\ .$$

Тогда $Y_{э1}\ Y_{э2} = Y_2\ Y_1 = \frac{D}{4\pi^2}\left(T_1^2 - T_2^2\right)$, а выражение для вычисления модуля сдвига будет иметь вид

$$G = \frac{128\pi}{d^4}\left(\frac{Y_1 - Y_2}{T_1^2 - T_2^2}\right). \qquad (6)$$

Из (4) видно, что для определения модуля сдвига необходимо измерить длину проволоки L, ее диаметр d, массу одного груза m, расстояния l_1 и l_2 между центрами грузов и соответствующие периоды T_1 и T_2. Для второго способа (формула (6)) вычисляются по формулам моменты инерции, например, двух различных осей инерции и измеряются соответствующие периоды T_1 и T_2.

Порядок выполнения работы

Задание 1 (по первому способу)

1. Измерить длину L и диаметр проволоки d с помощью микрометра или штангенциркуля.
2. Измерить массу одного груза.
3. Установить грузы на расстоянии l_1 между центрами так, чтобы они были симметричны относительно проволоки.
4. Измерить период колебаний T_1. Для этого измерить время, в течение которого произойдет n полных колебаний, и разделить на n. Повторить измерения 5 – 7 раз.
5. Таким же образом измерить период T_2.
6. Результаты измерений занести в таблицу.
7. Вычислить погрешности измерения периодов как результаты прямых измерений.
8. По формуле (4) определить модуль сдвига.
9. Найти погрешности измерений ΔG как результат косвенных измерений и занести в таблицу.

№ п/п	$l_1 =$			$l_2 =$			Примечание
	$T_{1i}=\frac{t_1}{n}$	ΔT_{1i}	$(\Delta T_{1i})^2$	$T_{2i}=\frac{t_2}{n}$	ΔT_{2i}	$(\Delta T_{2i})^2$	
1 2 …							

Окончание таблицы

№ п/п	l_1 =			l_2 =			Примечание
	$T_{1i}=\frac{t_1}{n}$	ΔT_{1i}	$(\Delta T_{1i})^2$	$T_{2i}=\frac{t_2}{n}$	ΔT_{2i}	$(\Delta T_{2i})^2$	
Среднее			$\frac{\sum(\Delta T_{1i})^2}{N}$			$\frac{\sum(\Delta T_{2i})^2}{N}$	

Задание 2 (по второму способу)

1. Измерить длину L и диаметр проволоки d с помощью микрометра или штангенциркуля.

2. Измерить массу предложенного эталонного тела.

3. Вычислить момент инерции тела относительно двух главных осей инерции, измерив для этого необходимые величины.

4. Определить погрешность в определении момента инерции.

5. Измерить периоды T_1 и T_2 для соответствующих моментов инерции, как и в задании 1 п. 4. Правила работы с установкой РРМ-05 смотрите в работе 1-7 или в описании установки.

6. Результаты измерения занести в таблицу.

7. Найти погрешность измерений T_1 и T_2.

8. По формуле (6) определить модуль сдвига.

9. Найти погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Можно ли в качестве эталонного тела использовать: а) шар, б) куб?

2. Используя основные законы динамики вращательного движения и закон Гука, получить формулы (2), (4), (6).

3. Как будет зависеть погрешность измерений от массы грузов (качественно)?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.

2. Стрелков С.П. Механика. – М.: Наука, 1975. – 560 с.

3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Механика / Под ред. Н.Г. Конопасова; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 45 с.

Лабораторная работа № 1-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА МЕТОДОМ РАСТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

Цель работы: исследование зависимости деформации металлов от приложенного напряжения в области других деформаций.

Оборудование: лабораторная установка для растяжения образцов, масштабная линейка, штангенциркуль или микрометр, технические весы и разновесы.

Введение

Под действием приложенных сил тела деформируются, т.е. изменяют свою форму или объем. Деформации делятся, главным образом, на упругие и пластические. Упругими называются такие деформации, которые исчезают полностью после прекращения действия на твердое тело сил. Если тело остается деформированным и при отсутствии сил, то такие деформации называются пластическими, или остаточными. Степень деформации характеризуется величиной ε – относительной деформацией. Для однородного стержня, прямолинейного отрезка проволоки и т.д. относительную деформацию можно определить как отношение удлинения стержня Δl к величине первоначальной длины l_0 : $\varepsilon = \Delta l / l_0$. В этом случае напряжение определяется как отношение величины растягивающей силы F_n, приложенной перпендикулярно к поперечному сечению стержня, к площади поперечного сечения стержня S_n : $\sigma = F_n / S_n$. При упругих деформациях существует однозначная зависимость между напряжением и относительной деформацией. При пластических деформациях такая однозначная связь отсутствует.

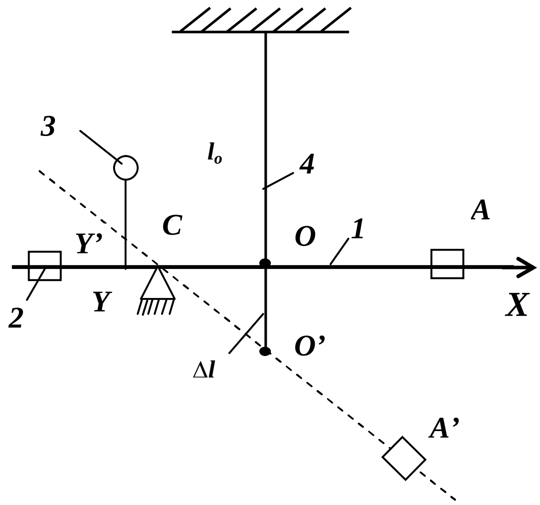
При малых упругих деформациях, которые встречаются наиболее часто, связь между напряжением и деформацией описывается законом Гука

$$\sigma = E\,\varepsilon, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга, важнейшая постоянная, характеризующая упругие свойства вещества. Модуль Юнга зависит от типа твердого тела и его физического состояния (например температуры). В данной лабораторной работе и определяется модуль Юнга различных металлов.

Описание установки

Для определения модуля Юнга используется установка, схема которой представлена на рисунке. Установка состоит из рычага 1, закрепленного в шарнире в точке *C*, неподвижного груза 2, регулирующего первоначальную нагрузку, подвижного груза *A*, задающего величину напряжения в данной установке, и измерительного инструмента 3, в точке *Y* соприкасающегося с рычагом. Проволочный образец 4 одним концом жестко закрепляется в неподвижной стойке (на рисунке не показано), а другим, к которому прикладывается растягивающая сила, в точке *O* прикрепляется к рычагу 1. На рисунке сплошным отрезком *YA* показано положение рычага, когда образец не растянут и показание индикатора *N* (в миллиметрах) равно нулю. Пунктирным отрезком *Y'A'* показано положение рычага, когда из-за смещения *A* напряжение отлично от нуля и образец 4 растягивается на величину Δl. Из подобия треугольников *COO'* и *CYY'* следует



$$\Delta l = \frac{OC}{YC} YY' = \frac{OC}{YC} N \ .$$

Отсюда для относительной деформации имеем

$$\varepsilon = \frac{OC}{YC} \frac{N}{l_0} \,.$$

Величина растягивающей силы F_n определяется разностью приложенных сил к проволочному образцу в точке *O* для двух положений подвижного груза *A* и *A'* , т.е. $F_n = F' - F$.

По правилу рычага в равновесии имеем

$$F = mg\left(1 + \frac{OA}{OC}\right) - F_0 \ ; \quad F' = mg\left(1 + \frac{O'A'}{OC}\right) - F_0 ,$$

где *m* – масса подвижного груза *A*, F_0 – добавка, обусловленная влиянием неподвижного груза 2. Окончательно для силы растягивания $F_n = mg\left(\frac{O'A' - OA}{OC}\right)$, а для напряжения

$$\sigma = \frac{mg}{S_n}\left(\frac{O'A' - OA}{OC}\right).$$

Из приведенной формулы следует, что на данной установке возможно изменение величины σ простым способом: изменением величины разности $O'A' - OA$, что и используется в лабораторной работе. Для удобства расчетов вводится ось OX вдоль рычага, как показано на рисунке. Тогда, обозначив OA через X_0, а $O'A'$ через X, получим:

$$O'A' - OA = \Delta X = X - X_0, \quad \sigma = \frac{mg}{S_n} \cdot \frac{\Delta X}{OC}.$$

Порядок выполнения работы

1. Настроить установку. Для этого груз A располагают так, чтобы OA (X_0) равнялось 5 – 6 см. Конец O проволочного металлического образца вставляют в пазы рычага и стойки. Устанавливая груз 2, добиваются того, чтобы показание индикатора 3 равнялось нулю.

2. Измерить параметры установки: величины отрезков OC, YC и массу груза A.

3. Измерить параметры образца: l_0 (первоначальная длина) и d (диаметр).

4. Изучить зависимость ε от σ. Для этого перемещать груз A от начального положения X_0 до конца рычага 1 (нагрузка) и обратно (разгрузка) к первоначальному положению ступенчато через 2 см, занося результаты измерений в таблицу. В таблицу также рекомендуется заносить и результаты расчетов Δl, F_n, ε, σ.

№ п/п	Положение груза $\Delta \boldsymbol{X}$, см	Показание индикатора $\boldsymbol{N}$, деления	Удлинение $\Delta \boldsymbol{l}$, м	Растягивающая сила $\boldsymbol{F_n}$, Н	$\boldsymbol{\varepsilon = \Delta l / l_0}$	$\sigma = \boldsymbol{F_n / S_n}$, Н/м^2
1 2 . .						

5. Построить график зависимости ε от σ. Проанализировать полученную зависимость.

6. Выделить на графике прямолинейный участок, и для экспериментальных точек, составляющих этот участок, методом наименьших квадратов (см. “Элементарная обработка результатов физического эксперимента”) найти модуль Юнга металлического образца.

7. Вставить новый проволочный образец из другого металла. Выполнить пп. 3 – 6.

8. Сравнить и проанализировать полученные значения модуля Юнга, ход зависимости ε от σ для разных металлов.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется область деформаций, соответствующих закону Гука?
2. Почему начальное положение X_0 груза A выбирается отличным от нуля?
3. Почему на графике зависимости $\varepsilon(\sigma)$ часть экспериментальных точек не ложится на прямолинейный участок?
4. От чего зависит величина модуля Юнга твердого тела?

Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 5 т. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1979. § 73. – 519 с.

2. Стрелков С.П. Механика. – М.: Наука, 1965. § 81. – 560 с.

3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Механика / Под ред. Н.Г. Конопасова. Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 45 с.

2. *МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА*

В лабораторных работах данного раздела физики учащиеся знакомятся с особенностями процессов, протекающих в молекулярных системах, и осваивают методы определения важнейших параметров, характеризующих жидкое и газообразное состояния вещества. Студентам рекомендуется четко разделять при действии установок стационарные процессы, неравновесные процессы и равновесные состояния.

Лабораторная работа № 2-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА МЕТОДОМ ПАДАЮЩЕГО В ЖИДКОСТИ ШАРИКА

Цель работы: исследование характера движения тела в вязкой жидкости.

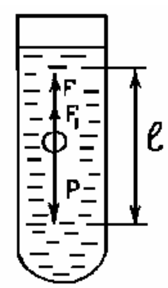
Оборудование: длинный цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью и с двумя кольцевыми метками, набор шариков, микрометр, секундомер, линейка, термометр.

Введение

Силы, действующие на движущееся в жидкости тело, в значительной степени зависят от свойств жидкости. При безотрывном плавном обтекании тела идеальной жидкостью сила лобового сопротивления равна нулю ("парадокс" Даламбера). Обтекание тела вязкой жидкостью приводит к возникновению пограничного слоя, в котором влияние сил вязкости заметно, отрыву потока за телом и колебаниям потока из–за вихреобразования. В общем случае сила лобового сопротивления такого обтекания обусловлена: 1) касательными силами вязкости к поверхности тела; 2) перепадом давлений из–за отрыва потока; 3) колебаниями давления вследствие вихреобразования за телом. Какая из составляющих дает наибольший вклад в величину силы лобового сопротивления, в первую очередь, определяется значением критерия подобия числом Рейнольдса $R_e = \rho \cdot \ell \cdot \upsilon / \eta$, где ρ – плотность жидкости; υ – характерная скорость потока; ℓ – характерный размер; η – коэффициент вязкости жидкости. При малых скоростях потока жидкости, а следовательно, при малых числах Рейнольдса, главную роль играют силы вязкого трения. Стокс показал, что при движении тела в форме шара в вязкой жидкости вдали от стенок сосуда и поверхностей других тел сила лобового сопротивления F_c имеет вид

$$F_c = 6\pi\eta\upsilon r\,, \tag{1}$$

где r – радиус шара. Формула Стокса (1) применима при условии $R_e \ll 1$.



Как видно из выражения (1), медленное движение тела в вязкой жидкости может быть использовано для определения величины коэффициента вязкости жидкости. Это осуществляется в установке, представленной на рисунке.

В широкий вертикально расположенный сосуд налита исследуемая жидкость. На сосуде сделаны по объему жидкости две горизонтальные метки, расстояние между которыми l. Метки достаточно далеко отстоят от дна и верхней кромки жидкости. В сосуд опускают металлический шарик массой m и плотностью $\rho_М$ с начальной скоростью, равной нулю. Как видно из рисунка, на шарик действуют три силы: сила тяжести, сила лобового сопротивления вязкой жидкости F_1 и выталкивающая сила Архимеда F. На начальном участке движение шарика ускоренное. Но так как с увеличением скорости растет сила лобового сопротивления, вскоре сумма всех сил, действующих на шарик, будет равна нулю, и шарик будет падать с постоянной скоростью. Метками и выделяется участок длины l, на котором шарик движется равномерно. Проекция суммы всех сил на вертикальную ось дает выражение

$$mg - F - F_1 = 0,$$

где $mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_М g$, $F = 6\pi\eta u_o r$, $F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_Ж g$;

u_o – скорость равномерного перемещения шарика; $\rho_Ж$ – плотность жидкости.

Таким образом,

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_М g - 6\pi\eta u_o r - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_Ж g = 0 .$$

Отсюда получается выражение для коэффициента вязкости жидкости

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho_М - \rho_Ж) g r^2}{u_o}.$$

Если учесть, что $u_o = l/\tau$, где τ – время равномерного перемещения шарика между метками, то окончательное выражение для вязкости

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho_М - \rho_Ж) g r^2 \tau}{L}.$$

Условие применимости формулы (2) – R_e<<1 (см. выше). Это накладывает ограничения на размеры падающего шарика

$$r \ll \left(\frac{2}{9}\frac{\eta^2}{\rho_М \rho_Ж g}\right)^{1/3}, \qquad (3)$$

если пренебречь архимедовой силой.

Порядок выполнения работы

1. Выбрать из наборов шаров известной плотности один и измерить его диаметр несколько раз (плотность стали – $7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3, плотность свинца – $11{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3).

2. Установить метки на стеклянном сосуде достаточно далеко от края жидкости и дна. Измерить расстояние между метками.

3. Опустить шарик в жидкость известной плотности. При пролете шарика мимо верхней метки включить секундомер. При пролете шарика мимо нижней метки выключить секундомер. По разности показаний секундомера вычислить время τ. (Плотность касторового масла – $9{,}7\cdot10^2$кг/м^3, плотность глицерина – $1{,}26\cdot10^3$ кг/м^3).

4. Выполнить пп. 1 – 3 несколько раз.

5. Рассчитать по полученным данным среднее значение вязкости жидкости и числа Рейнольдса, вычислить погрешность измерений.

6. Сопоставить полученные результаты и неравенство (3), проверить справедливость применения формулы (2).

Дополнительное задание

Исследовать зависимость скорости движения шарика в жидкости от его диаметра. Предположив степенную зависимость $\upsilon \sim r^n$, определить показатель степени n.

Контрольные вопросы

1. Вывести неравенство (3) из условия, что $R_e << 1$ и архимедова сила пренебрежимо мала.

2. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкость?

3. Чем обусловлено возникновение силы лобового сопротивления в вязкой жидкости: а) при малых скоростях движения шарика; б) высоких скоростях движения шарика?

4. Почему падение шарика в жидкость сначала ускоренное, затем становится равномерным?

5. Почему верхняя метка должна быть ниже уровня жидкости, а нижняя выше дна?

Список рекомендуемой литературы

1. Стрелков С.П. Механика. – М.: Наука, 1965. § 112. – 528 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 5 т. – Т. 1. Механика. – М.: Наука, 1979. §§ 100, 101. – 519 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. – Т. 1, – М.: Наука, 1977. § 78. – 352 с.

Лабораторная работа № 2-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: исследование упругих и тепловых свойств воздуха.

Оборудование: труба с подвижной стенкой на одном из концов, звуковой генератор, электронный осциллограф, термометр.

Введение

Скорость распространения звуковых волн в среде определяется, в первую очередь, упругими свойствами этой среды. Газы обладают только объемной упругостью. Поэтому в них могут распространяться только продольные волны, в которых чередуются области сгущения и разрежения газа. Скорость звука υ в общем случае определяется выражением

$$\upsilon = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}, \tag{1}$$

где P – давление в газе; ρ – плотность газа.

Лаплас установил, что в звуковой волне в газе колебания происходят настолько быстро, что теплообмен между областями разрежения и сгущения не имеет места. Распространение звука в газе – адиабатический процесс. Уравнение Пуассона для адиабатического процесса:

$$PV^{\gamma} = \text{const}, \tag{2}$$

где $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; C_v – теплоемкость при постоянном объеме; V – объем. Если учесть, что плотность ρ пропорциональна $1/V$, то для дифференциала левой части (2) получается

$$\gamma P d\rho - \rho dP = 0. \tag{3}$$

Отсюда скорость звука в газе

$$\upsilon = \sqrt{\gamma P/\rho}. \tag{4}$$

Из уравнения состояния идеального газа в форме

$$P = \frac{\rho RT}{M}, \tag{5}$$

(где M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура) и соотношения (4) следует формула для показателя адиабаты

$$\gamma = M\upsilon^2 / RT \; . \qquad (6)$$

Формула (6) используется в данной лабораторной работе для определения показателя адиабаты воздуха.

Скорость звука определяется методом стоячей волны. Стоячая волна образуется, например, при положении двух плоских гармонических волн, бегущих в противоположных направлениях по оси X:

$$h_1 = A_0 \cos(wt - kx) \text{ и } h_2 = A_0 \cos(wt - kx), \qquad (7)$$

где h_1, h_2 – смещение частиц среды в первой волне и во второй волне соответственно; A_0 – амплитуда колебаний; w – циклическая частота; k – волновое число. Результирующая волна имеет вид

$$h = h_1 + h_2 = 2A_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos wt \; , \qquad (8)$$

где λ – длина звуковой волны.

Это стоячая волна, которая характеризуется, как следует из формулы (8), чередующимися пучностями и узлами. В местах расположения пучностей амплитуда стоячей волны максимальна, в местах расположения узлов амплитуда стоячей волны равна нулю. Расстояние Δx между соседними узлами и между соседними пучностями одинаково и равно

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} \, . \qquad (9)$$

Таким образом, длина звуковой волны может быть найдена по измеренным значениям Δx. Скорость звука υ, в свою очередь, можно рассчитать по формуле

$$\upsilon = \lambda\nu, \qquad (10)$$

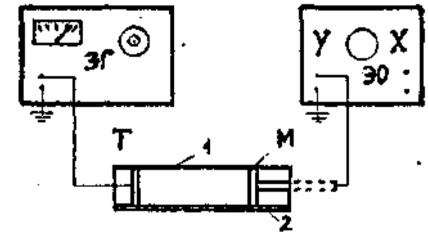
где ν – частота звуковой волны. Окончательно для скорости звуковой волны получается выражение

$$\upsilon = 2\Delta x\nu, \qquad (11)$$

которое и используется в данной лабораторной работе для определения скорости звука в воздухе.

Описание установки

Схема установки представлена на рисунке. Звуковая волна создается в длинной стеклянной трубке 1 с одной подвижной стенкой М. Вдоль трубы расположена линейка 2. В неподвижной стенке трубы укреплен телефон Т, соединенный со звуковым генератором ЗГ. В подвижной стенке трубы укреплен регистрирующий микрофон, соединенный с входом электронного осциллографа ЭО. В стеклянной трубке происходит наложение бегущей волны от телефона Т и отраженной волны от подвижной стенки М. Результирующая волна – стоячая.



Порядок выполнения работы

1. Включить звуковой генератор и осциллограф.

2. После прогрева приборов установить на звуковом генераторе частоту волны и необходимую амплитуду сигнала (по указаниям преподавателя).

3. Установить для удобства регистрации необходимую частоту развертки осциллографа. Перемещая подвижную стенку М, убедиться, что на экране осциллографа отчетливо видны максимальный по величине сигнал (пучность) и минимальный сигнал (узел).

4. Измерить координаты всех узлов и пучностей вдоль стеклянной трубки. Измерить температуру воздуха.

5. Вычислить среднее значение $<\Delta x>$ расстояния между узлами и пучностями.

6. Вычислить среднее значение скорости звука и среднее значение показателя адиабаты воздуха, используя формулы (6) и (11). Рассчитать погрешности измерения υ и γ.

7. Провести измерения υ и γ на других частотах (по указанию преподавателя), повторяя пп. 3 – 6.

8. Проанализировать полученные результаты.

Дополнительное задание

Исследовать зависимость скорости звука в воздухе от частоты.

Контрольные вопросы

1. Вывести выражение для скорости звука в газе.
2. Почему процесс распространения звуковой волны адиабатический?
3. Как, используя стоячие волны, можно определить скорость звука?
4. Как в данной установке определяются положения узлов и пучностей?
5. Чему равно теоретическое значение показателя адиабаты воздуха, вытекающее из классической теории идеального газа?

Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика: В 5 т. Т. 1. Механика. – М.: Наука, 1979. § 85. – 519 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. § 82. – 592 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1977. § 97. – 352 с.

4. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука, 1978. Т. 2. § 99. – 480 с.

Лабораторная работа № 2-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДЫ

Цель работы: ознакомиться с понятием поверхностного натяжения жидкостей и двумя методами измерения коэффициента поверхностного натяжения.

Оборудование: а) торсионные весы, кольцо на подвеске, делительная воронка, стаканчик; б) мерная бюретка с воронкой, сосуд с жидкостью, микроскоп, термометр.

Введение

Широкое распространение в мире наряду с силами тяготения, упругости, трения получили силы поверхностного натяжения. В природе известно три агрегатных состояния: твердое, жидкое, газообразное. Жидкость занимает промежуточное положение между твердым и газообразным состоянием. По мере развития представления о строении вещества было выяснено, что между молекулами вещества одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания. На рис. 1, *а* приведена качественная характеристика межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами. Силы отталкивания – положительны, а силы взаимного притяжения – отрицательны.

Существует такое расстояние между молекулами r_0, на котором силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга. Таким образом, расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами, на котором бы они находились в отсутствии теплового движения. При $r > r_0$ преобладают силы притяжения (F<0), а при $r < r_0$ – силы отталкивания (F>0). На расстояниях $r > 10^{-9}$м межмолекулярные силы практически отсутствуют. Элементарная работа δA силы при изменении расстояния между молекулами на dr совершается за счет взаимной потенциальной энергии молекул

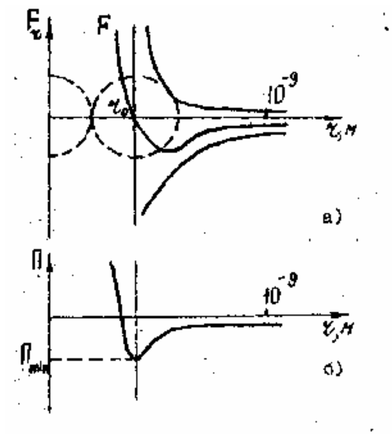


Рис. 1

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r} = -d\Pi .$$

На рис. 1, *б* приведена качественная зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними. Из данной кривой следует, что при $r = r_0$ взаимодействующие молекулы обладают минимальной потенциальной энергией.

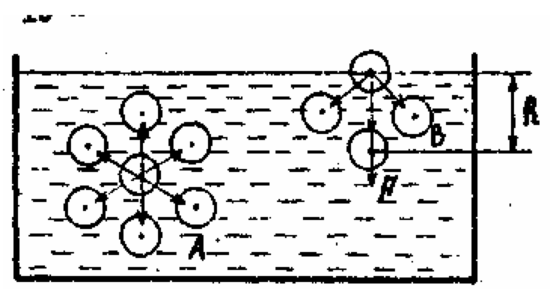


Рис. 2

Поверхностное натяжение жидкости обусловлено действием молекулярных сил притяжения, быстро убывающих с расстоянием, которое (порядка 10^{-9} м) называется радиусом молекулярного действия *R*, а сфера радиуса *R* – сферой молекулярного действия.

Рассмотрим выделенную внутри жидкости молекулу *А* (рис. 2). На расстоянии *R* на молекулу действуют соседние молекулы, входящие в сферу молекулярного действия. Силы, с которыми эти молекулы действуют на молекулу *A*, направлены в разные стороны, поэтому результирующая сила внутри жидкости равна нулю. Однако в поверхностном слое – молекула *B* – равновесие нарушается, так как сфера молекулярного действия лишь частично расположена внутри жидкости. На молекулу действует сила притяжения со стороны жидкости и пара. Равнодействующая сила $\vec{F}$ не равна нулю и направлена внутрь жидкости, потому что концентрация молекул в газе мала по сравнению с концентрацией в жидкости. Этим объясняется происхождение внутреннего давления поверхностного слоя на жидкость и стремление поверхности жидкости уменьшить свою площадь.

Переход молекул из глубины жидкости в ее поверхностный слой возможен только при совершении работы против молекулярных сил. Эта работа совершается за счет кинетической энергии молекул жидкости и приводит к увеличению потенциальной энергии молекул поверхностного слоя. Поэтому молекулы, находящиеся в поверхностном слое, обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Эта дополнительная энергия *E*, которой обладают молекулы в поверхностном слое жидкости, называется поверхностной энергией и пропорциональна площади слоя *S*

$$E = \sigma S. \qquad (1)$$

Коэффициент пропорциональности σ между поверхностной энергией и площадью поверхности называется коэффициентом поверхностного натяжения. Величина его зависит от рода обеих сред, образующих поверхность, и от температуры.

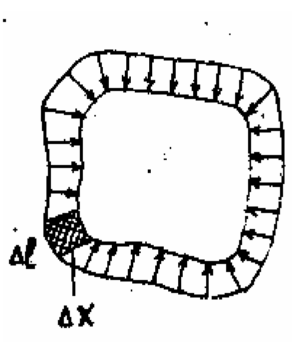


Рис. 3

Равновесное состояние жидкости ($r = r_0$) характеризуется минимумом потенциальной энергии, складывающейся из поверхностной и потенциальной энергий в поле тяжести. В связи с этим жидкость при отсутствии внешних сил будет стремиться при заданном объеме сократить свою поверхность до минимума и принимать шарообразную форму. Выделим часть поверхности жидкости, ограниченную замкнутым контуром (рис. 3). Под действием сил поверхностного натяжения поверхность жидкости сокращается, и рассматриваемый контур переместится в новое положение. Эти силы направлены по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно к участкам контура, на котором они действуют. При перемещении выделенного участка $\Delta\ell$ на расстояние Δx под действием силы F поверхностного натяжения совершается работа $F \cdot \Delta x$ за счет уменьшения поверхностной энергии ΔE

$$F\Delta x = -\Delta E,$$

отсюда следует, что сила поверхностного натяжения

$$F = -\Delta E/\Delta x,$$

так как по формуле (1) $\Delta E = \sigma\Delta S = \sigma\Delta\ell\Delta x$, то

$$F = -\sigma\Delta\ell, \qquad (2)$$

где знак «минус» указывает на то, что сила направлена в сторону, противоположную смещению Δx. Анализируя полученные формулы (1) и (2), установили, что коэффициент поверхностного натяжения σ представляет собой и энергетическую, и силовую характеристику поверхностного натяжения жидкостей: он является поверхностной энергией, которой обладает единичная площадь поверхности, и в то же время является силой поверхностного натяжения, которая действует на контур единичной длины.

А. Метод отрыва кольца

Сущность метода состоит в том, что измеряют силу, которую необходимо приложить, чтобы оторвать от поверхности жидкости смачиваемое тонкое металлическое кольцо. Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения σ представляет собой торсионные весы *T* (рис. 4), у которых вместо чашечки на крючок коромысла подвешено тонкое металлическое кольцо *O*. С помощью кронштейна к стойке весов крепится делительная воронка *A* с краном *K*, заполненная исследуемой жидкостью (водой). Если подвести уровень воды под кольцо так, чтобы оно нижним основанием коснулось поверхности воды, то в результате взаимодействия молекул воды и кольца вода начнет подниматься по стенкам смачиваемого кольца, а само кольцо немного втянется внутрь жидкости. При медленном опускании поверхности воды между кольцом *O* и поверхностью образуется цилиндрическая пленка П (рис.4, *б*). Увеличивающая поверхность жидкости

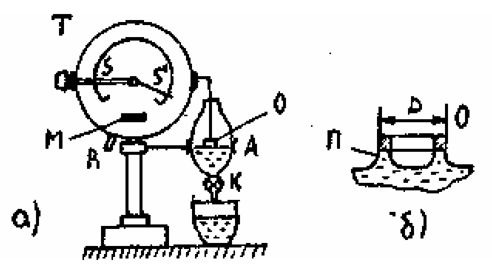


Рис. 4

стремится сократиться. Сила поверхностного натяжения, действующая на внешнюю и внутреннюю поверхности пленки, тянет кольцо вниз, закручивая пружину торсионных весов. Сила упругости пружины возрастает с закручиванием пружины по мере понижения уровня воды, и в момент отрыва кольца от поверхности воды будет равна силе F поверхностного натяжения. Разрыв поверхности жидкости происходит по внешней и внутренней окружностям кольца, общая длина которых для тонкого кольца близка к величине $\ell = 2\pi D$, где D – диаметр кольца. Коэффициент поверхностного натяжения найдем по формуле (2)

$$\sigma = F/\ell .$$

Уровень воды в делительной воронке опускают и поднимают с помощью резиновой груши (рис. 4) при открытом кране *K*.

Порядок выполнения работы

1. При арретированной весовой системе (рычаг *R* арретира отведен влево) установить весы по уровню с помощью винтов так, чтобы пузырек уровня находился в центре кружка.

2. Привести весы к нулевому положению. Для этого повесить на крючок добавочный грузик 100 мг, указательную стрелку поставить на нулевую отметку шкалы, освободить арретир, совместить нулевой штрих подвижной шкалы с положением контрольной стрелки.

3. Отведя рычаг *R* влево, арретировать весовую систему, снять добавочный грузик в 100 мг.

4. Отведя рычаг вправо, освободить весовую систему, открыть кран *K* и, слегка нажимая на резиновую грушу, медленно подвести уровень воды под нижнее основание кольца. Контрольная стрелка *M* должна быть немного правее нулевого штриха подвижной шкалы.

5. Для измерения силы поверхностного натяжения открыть кран настолько, чтобы вода очень медленно убывала из делительной воронки, и когда контрольная стрелка *M* совместится с нулевым штрихом подвижной шкалы, удерживать ее в этом положении, закручивая рычагом *S* пружину весов. Зафиксировать положение указательной стрелки S' (показание весов F'), при котором кольцо отрывается от поверхности воды. Измерение повторить не менее 10 раз и вычислить среднее значение.

6. Так как оторвавшееся от поверхности воды кольцо остается покрытым пленкой воды, оно будет несколько тяжелее сухого, вес которого соответствовал нулевому положению весов. Поэтому среднее значение силы поверхностного натяжения

$$< F >=< F' > - < f >,$$

где $< f >$ – средний вес мокрого кольца. Поскольку вес мокрого кольца мало изменяется при отдельных измерениях, его можно определить один раз в конце измерений. Для этого арретировать весы, повесить на крючок добавочный грузик в 100 мг, освободить весовую систему и зафиксировать показание весов *f*.

Кольцо из делительной воронки не вынимать!

7. Вычислить среднее значение коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{< F' > - < f >}{\ell}.$$

Удвоенная длина окружности кольца $\ell = (26{,}0 \pm 0{,}4)10^{-3}$ м.

8. Вычислить абсолютную погрешность среднего значения коэффициента поверхностного натяжения.

9. Записать окончательный результат

$$\sigma = < \sigma > \pm \Delta\sigma.$$

Б. Метод отрыва капель

Второй метод определения коэффициента поверхностного натяжения заключается в следующем. При истечении жидкости из узкой трубки при малом расходе образующиеся капли непосредственно перед отрывом висят на шейке (рис. 5), при этом сила тяжести *P*, действующая на каплю, уравновешивается силами поверхностного натяжения, действующими по контуру $\ell = \pi D$, ограничивающему поперечное сечение шейки и ее узкой части (*D* – диаметр шейки в этом месте). Равнодействующую *F* сил поверхностного натяжения, действующих по контуру ℓ, можно представить в виде произведения коэффициента поверхностного натяжения σ на длину контура ℓ, т.е.

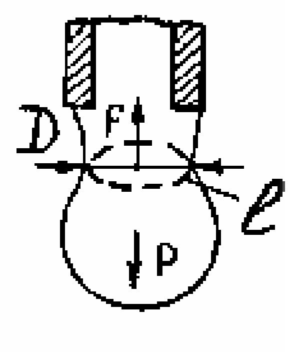


Рис.5

$$F = \sigma\pi D.$$

Непосредственно перед отрывом капли выполняется соотношение

$$P = F \quad \text{или} \quad mg = \sigma\pi D,$$

где m – масса капли. Пользуясь этим соотношением, можно определить коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = mg / \pi D. \qquad (3)$$

Массу одной капли определяют по общей массе n капель. Для этого используют трубку с делениями, имеющую сужение на конце, и кран (бюретку). Бюретка наполняется жидкостью. Если объем жидкости при вытекании из бюретки изменился на величину V и при этом сосчитано число капель n, то масса m одной капли равна массе вытекшей жидкости ρV (где ρ – плотность), деленной на число капель,

$$m = \rho V / n.$$

Подставляя значение m в формулу (3), получим формулу для вычисления коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = \rho V g / \pi D n. \qquad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Из бюретки каплями выпустить намеченный объем жидкости (3 – 4 см^3), считая число капель в этом объеме. Кран следует повернуть так, чтобы капли вытекали достаточно медленно и их можно было точно сосчитать. Опыт повторить 5 – 6 раз (при неизменном объеме V вытекающей жидкости).

2. Плотность ρ жидкости в зависимости от температуры найти по таблице справочника.

3. Диаметр D шейки капли перед моментом отрыва определить несколько раз с помощью микроскопа и вычислить среднее значение. Определить погрешность диаметра.

4. Пользуясь средними значениями числа капель n (при взятом объеме V) и диаметра D шейки капли перед отрывом, вычислить среднее значение коэффициента σ поверхностного натяжения по формуле (4) и абсолютную погрешность $\Delta\sigma$.

5. Окончательный результат записать в виде $\sigma = \langle\sigma\rangle \pm \Delta\sigma$.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит коэффициент поверхностного натяжения и почему $\sigma \to 0$ при температуре, приближающейся к критическому состоянию?

2. Получите расчетные формулы для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца и методом отрыва капель.

3. Получите формулу абсолютной погрешности определения коэффициента поверхностного натяжения σ.

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1987. – 352 с.

2. Методические указания к лабораторным работам по физике: Молекулярная физика/ Под ред. Н.Г. Конопасова; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1983. – 52 с.

Лабораторная работа № 2-7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА - ДЕЗОРМА

Цель работы: ознакомление с методом измерения показателя адиабаты для воздуха при адиабатическом процессе расширения и последующем изохорическом нагревании.

Оборудование: установка, состоящая из стеклянного баллона с кранами, манометра и осушительного фильтра с порошком хлористого кальция, насоса и секундомера.

Введение

Адиабатическим называется такой процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой. Быстропротекающие процессы можно считать адиабатическими, если за время протекания процесса теплообменом рабочего объема с окружающей средой можно пренебречь.

Адиабатический процесс в газе описывается уравнением Пуассона

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma},$$

где P_1,V_1 – первоначальные давление и объем газа;

P_2,V_2 – давление и объем газа после адиабатического процесса;

γ – показатель адиабаты.

Адиабатический процесс на диаграмме *P*–*V* изображается кривой $PV^{\gamma} = \text{const}$, называемой адиабатой. Показатель адиабаты равен отношению теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}.$$

Теплоемкостью тела называется отношение элементарного количества тепла δQ, полученного телом, к соответствующему приращению dT его температуры

$$C = \delta Q / dT .$$

Если масса тела равна единице массы, то теплоемкость называют удельной. Теплоемкость одного моля вещества называют молярной. Для газов теплоемкость (как удельная, так и молярная) при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме $C_P > C_V$, так как при нагревании газа при постоянном давлении (изобарический процесс) подведенное к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии (а следовательно, и температуры) и на совершение газом работы расширения для поддержания постоянного давления. Например, если газ заключен в сосуд с подвижным поршнем, обеспечивающим постоянное давление, то, нагреваясь, он расширяется и поднимает поршень, совершая, таким образом, работу против внешних сил. При нагревании при постоянном объеме (изохорический процесс) все тепло, подведенное к газу, идет на увеличение только его внутренней энергии.

Описание установки

Экспериментальная установка изображена на рис. 1. В стеклянный тонкостенный сосуд *A* накачивается воздух до некоторого давления P_1, превышающего атмосферное $P_1 = P_0 + h_1$, где P_0 – атмосферное давление; h_1, – избыток давления сверх атмосферного (измеряется водяным манометром *M*).

Когда воздух в баллоне примет температуру окружающего воздуха T_1 , быстро (≤ 1с) открывается клапан *K* и воздух выпускается наружу до тех пор, пока давление в баллоне не станет равным атмосферному (P_2=P_0).

Выход воздуха происходит быстро, и, пренебрегая в первом приближении передачей тепла через стенки баллона, процесс расширения воздуха в баллоне можно считать адиабатическим. При этом расширяющийся воздух совершает работу против внешних сил – внешнего атмосферного давления.

Следовательно, температура воздуха в баллоне понижена (до температуры T_2).

После закрытия клапана K давление внутри сосуда начнет возрастать, так как охладившийся при расширении воздух снова нагревается, получая тепло из окружающей среды. Возрастание давления прекратится, когда температура воздуха сравняется с внешней температурой T_1. Окончательное давление

$$P_3 = P_0 + h_2,$$

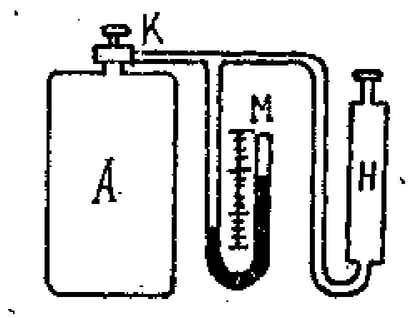


Рис. 1

где h_2 – разность уровней манометра. Происходящие в сосуде процессы представлены на PV – диаграмме на рис. 2. Температура воздуха в состояниях 1 и 3 одинакова. Согласно закону Бойля – Мариотта

$$V_1(P_0 + h_1) = V_2(P_0 + h_2)$$

или

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_0 + h_2}{P_0 + h_1}. \qquad (1)$$

В процессе 1-2 произошло адиабатическое расширение газа. Согласно уравнению Пуассона, получим

$$(P_0 + h_1)V_1^{\gamma} = P_0 V_2^{\gamma};$$

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = \frac{P_0}{P_0 + h_1}. \qquad (2)$$

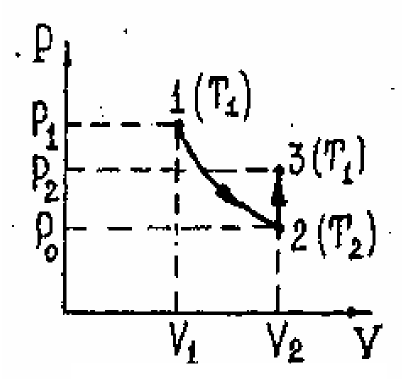


Рис. 2

Из (1) и (2) следует

$$\frac{P_0}{P_0 + h_1} = \left[\frac{P_0 + h_2}{P_0 + h_1}\right]^{\gamma}.$$

Логарифмирование дает

$$\gamma = \frac{\lg P_0 - \lg(P_0 + h_1)}{\lg(P_0 + h_2) - \lg(P_0 + h_1)}.$$

Так как давления P_0; P_0+h_1 и P_0+h_2 незначительно отличаются друг от друга, то в первом приближении логарифмы величин можно заменить их величинами, т.е. искомое значение

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \qquad (3)$$

Для вычисления γ по формуле (3) нужно измерить добавочные (относительно атмосферного) давления воздуха в баллоне в 1-м и 3-м состояниях.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы убедиться в герметичности кранов и мест соединения трубок. Для этого накачайте в сосуд воздух и перекройте кран *K*.

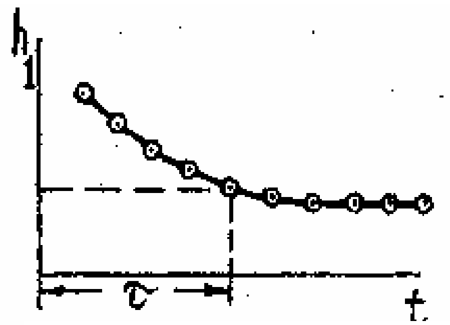


Рис. 3

По манометру проследите за изменением давления h_1 в сосуде с течением времени *t* и постройте график $h_1=f(t)$. Если установка достаточно герметична, то по истечении некоторого времени τ, необходимого для установления термодинамического равновесия, давление в баллоне перестанет снижаться. В противном случае необходимо найти и устранить течь. Из графика рис. 3 определите время установления термодинамического равновесия τ.

2. Накачайте воздух в сосуд. Выждав время τ, измерьте избыточное давление h_1 воздуха в сосуде перед адиабатическим расширением. Затем на короткое время (только до момента выравнивания давлений) откройте кран *K* (см. рис. 1). Давление в сосуде и температура понизятся (давление до атмосферного, а температура станет ниже комнатной). Температура воздуха в сосуде сравняется с комнатной через время τ, после этого измерьте избыточное давление h_2,. Измерения повторяют 5 – 10 раз.

Величину γ подсчитать по формуле (3) для каждой пары значений h_1 и h_2. Результаты отдельных экспериментов будут заметно отличаться друг от друга. Разброс связан с временем открывания крана *K*: если кран закроем раньше, чем давление упадет до атмосферного, получим завышенные значения h_2 и γ; если кран закроем с опозданием, получим заниженные значения h_2 и γ. Так как разброс отдельных результатов случаен, вероятным результатом измерения считаем среднее значение.

3. Результаты измерений h_1 и h_2 записать в таблицу. Подсчитать среднее значение γ. Оценить погрешность γ двумя способами: как случайную и как погрешность косвенных измерений. Сравнить их. Окончательный результат представить в виде

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma \ .$$

Дополнительное задание

Исследовать влияние времени открывания крана *K* на получаемый результат. Определить оптимальное время открывания крана *K* и проанализировать полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется адиабатическим, и при каких условиях он протекает?
2. Приведите уравнение Пуассона. Чему равен показатель адиабаты? Что такое теплоемкость?
3. Опишите процессы, протекающие в сосуде при измерениях величин h_1 и h_2?
4. Как повлияло бы на результат наличие в сосуде паров воды?

Список рекомендуемой литературы

1. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высш. шк., I960. – 360 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1. – М.: Наука, 1989. – 352 с.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ
4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

В цикле лабораторных работ по данной тематике исследователь знакомится с характеристиками электрического и магнитного полей и методами исследования этих полей, учится собирать электрические цепи, приобретает навыки работы с электроизмерительными приборами. В работах используются основные законы электромагнетизма.

Порядок оформления отчета о выполнении лабораторной работы в лаборатории электрических и магнитных измерений

Отчет должен содержать задание, спецификацию приборов, таблицу измерений, пример расчета. При обработке результатов делаются все необходимые расчеты искомой величины и погрешностей измерений в соответствии с заданием. Окончательный результат записывается с учетом погрешности. В конце отчета приводится краткое обсуждение полученного результата.

Спецификация приборов составляется, если в работе используются стрелочные приборы или имеются паспорта этих приборов, и записывается в виде табл. 1:

Таблица 1

№ п/п	Наименование измерительного прибора	Заводской номер	Система прибора	Пределы измерений	Цена деления	Класс точности прибора	Абсолютная погрешность

Сведения о свойствах стрелочного прибора содержатся на его панели.

Наименование прибора написано либо словом, либо символом, например V – вольтметр, мА – миллиамперметр.

Система прибора задается значком (табл. 2):

Таблица 2

Система	Знак
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Электродинамическая с магнитным экраном	
Индукционная	
Электростатическая	

Пределы измерений задаются на панели прибора:

а) если несколько клемм подключения прибора – то цифрой, обозначенной рядом с клеммой;

б) если две клеммы подключения и переключатель пределов – то цифрой, обозначенной на переключателе.

Цена деления определяется отношением предела измерения к числу делений шкалы.

Класс точности обозначен на панели прибора в виде цифры, которая может иметь следующие значения: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле $\Delta A = \dfrac{k \cdot A_n}{100}$, где k – класс точности, A_n – номинальное значение измеряемой величины (предел измерений).

Лабораторная работа № 3-1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: ознакомиться с методом моделирования электрического поля, построить эквипотенциальные поверхности (линии) электростатического поля, силовые линии поля.

Оборудование: ванна, заполненная малопроводящей жидкостью; набор электродов; нуль-индикатор, в качестве которого может использоваться головной телефон, осциллограф или вольтметр для измерения в цепи переменного тока; источник переменного тока малого напряжения, в качестве которого можно использовать звуковой генератор.

Введение

Электрическим полем называется особая форма материи в пространстве около электрических зарядов, в котором действуют электрические силы. Если заряды неподвижны и неизменны, их поле называется электростатическим. Электростатическое поле в каждой его точке характеризуется вектором напряженности электрического поля $\vec{E}$ (силовая характеристика); потенциалом этой точки φ (энергетическая характеристика поля в данной точке).

Напряженность поля, силовые линии. Напряженность электрического поля $\vec{E}$ – векторная характеристика электрического поля, численно равна силе, действующей в данной точке поля на единичный положительный электрический заряд; вектор напряженности по направлению совпадает с направлением этой силы:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \qquad (1)$$

Если электрическое поле вызвано одним точечным зарядом q, то величина напряженности поля определяется как $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$.

Для графического изображения поля проводят линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности поля. Такие линии называются *силовыми линиями поля*.

Потенциал, эквипотенциальные линии. Потенциал данной точки электростатического поля определяется как физическая величина, численно равная работе, совершаемой электрическими силами при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность, или как физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q} = \frac{W}{q}.$$

Работа сил потенциального поля по замкнутому контуру равна нулю. Потенциал поля точечного заряда определяется как $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$.

Эквипотенциальная поверхность – геометрическое место точек, потенциалы которых равны (в случае двух измерений говорят об эквипотенциальной линии). Согласно формуле для потенциала электростатического поля точечного заряда эквипотенциальные поверхности являются сферическими. Силовые линии и эквипотенциальные линии взаимно ортогональны (т.е. касательные, проведенные в точках их пересечения, взаимно перпендикулярны). На рис. 1 сплошными линиями изображены эквипотенциальные, а пунктирными – силовые линии электрического поля двух одноименных точечных зарядов.

Значение модуля вектора напряженности можно определить, измеряя разность потенциалов в двух близко расположенных точках, лежащих на силовой линии, построенной по координатной сетке.

Известно, что

$$\vec{E} = -grad\,\varphi \text{ или } \vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi,. \qquad (2)$$

где

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{e}_x + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{e}_y + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{e}_z \qquad (3)$$

градиент потенциала φ – вектор, указывающий направление быстрейшего увеличения величины φ.

Метод моделирования электростатического поля. Для экспериментального изучения электростатического поля используется полная аналогия, существующая между распределением потенциала в электростатическом поле и в проводящей среде, по которой течет стационарный (постоянный во времени) электрический ток. Такая среда условно обозначается "поле тока".

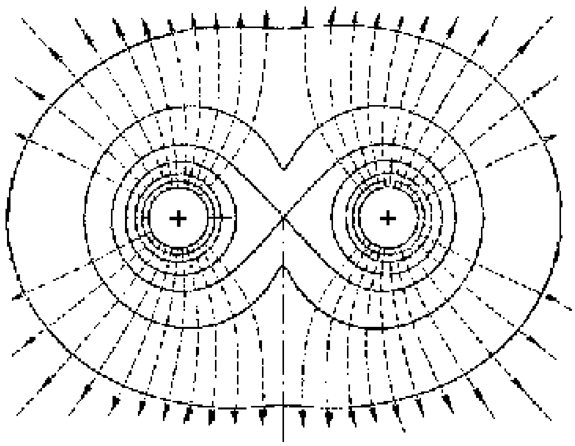


Рис. 1

Аналогия дает возможность заменять изучение электростатического поля между заряженными телами излучением поля стационарного тока между электродами при условии, что их потенциалы поддерживают постоянными и проводящая среда имеет значительно большее удельное сопротивление, чем материал электродов. Такой метод называется моделированием электростатического поля.

Для изучения поля в проводящую среду вводятся два подвижных зонда и два неподвижных электрода; каждый зонд принимает потенциал той точки, в которую он введен.

Отсутствие разности потенциалов между зондами свидетельствует о том, что они находятся на одной эквипотенциальной поверхности. Координаты точек с одинаковыми потенциалами регистрируются в процессе исследования электрического поля; по ним строятся эквипотенциальные линии и силовые линии.

Электролитическая ванна

Электрическое поле моделируется при помощи электролитической ванны. Электролитическая ванна представляет собой сосуд (желательно с плоским дном), в котором находится слабопроводящая среда. В качестве проводящей среды пользуются сильно разбавленным электролитом, который наливается в сосуд тонким слоем. На дно сосуда нанесена координатная сетка; в сосуд помещаются электроды, которые представляют исследуемую систему заряженных тел. Чтобы поддерживать потенциалы электродов постоянными, они присоединяются к источнику питания. Необходимо использовать источник переменного тока, поскольку на постоянном токе у поверхности электродов образуется двойной электрический слой, который не позволяет осуществить физическое моделирование.

Следует строго соблюдать горизонтальное положение ванны, чтобы слой электролита имел повсюду одинаковую толщину. Для предотвращения нагрева электролита рекомендуется работать с малой плотностью тока, поэтому электроды присоединяются к источнику небольшого напряжения (~10В).

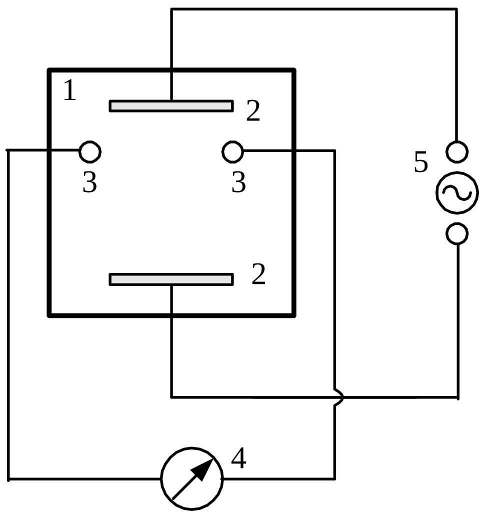


Рис. 2

На рис. 2 изображена схема установки, где: 1 – электролитическая ванна, 2 – электроды, 3 – зонды, 4 – индикатор, 5 – источник тока.

Чтобы предотвратить искажения поля, сопротивление индикатора должно быть значительно больше сопротивления участка среды между зондами, поэтому удобно в качестве индикатора использовать электронный осциллограф. В качестве зондов используются металлические тела малого размера.

Порядок выполнения работы

1. Расположить электроды в электролитической ванне по рекомендации преподавателя (рис. 3). Записать их координаты. Подключить электроды к источнику переменного тока.

2. Соединительными проводами подключить зонды к нуль-индикатору (осциллографу или вольтметру).

3. Зафиксировать один из зондов (неподвижный) в произвольной точке ванны, записать координаты этой точки. Перемещая второй зонд (подвижный), определить положение другой точки, для которой сигнал на индикаторе становится равным нулю. В этом случае зонды находятся в точках

поля с одинаковым значением потенциала. При использовании осциллографа в качестве индикатора сигнал должен быть минимальным по амплитуде. Записать координаты найденной точки.

Рис. 3

4. Не меняя положение неподвижного зонда и используя методику п. 3, определить координаты еще 7-10 точек поля.

5. Результаты этой серии исследований занести в таблицу:

Координаты зонда	*X*, мм	*Y*, мм
Неподвижного		
Подвижного		

6. Провести другую серию экспериментов. Для этого зафиксировать неподвижный зонд в иной точке ванны и вновь проделать измерения по методике, изложенной выше. Результаты занести в таблицу.

7. Опыты проделать для 5 – 7 серий.

8. Построить графики. Для этого на листе миллиметровой бумаги в выбранном масштабе указать конфигурацию электродов и обозначить точки равного потенциала из одной серии экспериментов. Изобразить эквипотенциальную линию, соединяя точки равного потенциала плавной линией. Изобразить эквипотенциальные линии для каждой серии экспериментов.

9. Результаты построений использовать для изображения на графике нескольких силовых линий (5 – 7 линий).

Правила работы с генератором звуковых частот

1. Установить ручку регулятора выхода в среднее положение (ручку вращать без приложения усилий).

2. При помощи ручек "множитель" и "частота" установить частоту колебаний в интервале 1000 – 1400 Гц.

3. Включить генератор.

4. Переключатели "ослабление" или "аттенюатор" поставить в положение, при котором уровень выходного сигнала соответствует нормальной работе нуль-индикатора.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряженности и потенциала электростатического поля.
2. Запишите формулы напряженности и потенциала поля точечного заряда.
3. Чему равна потенциальная энергия положительного единичного заряда в поле, создаваемом точечным зарядом?
4. Покажите, что силовые линии напряженности электростатического поля ортогональны эквипотенциальным поверхностям.
5. Как математически связаны потенциал и напряженность поля?
6. Какое поле называется потенциальным?
7. Какие поверхности (линии) называются эквипотенциальными?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1982. – 496 с.
2. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1968. Задача 65.
3. Яворский Б.М. Курс физики: В 3 т. Т. 2. – М.:Наука, 1966. §21, 22, 23.

Лабораторная работа № 3-3

МОСТОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: ознакомление с классическим методом измерения сопротивления при помощи мостовой схемы.

Оборудование: измеряемые сопротивления, магазины сопротивлений, гальванометр или микроамперметр, источник постоянного тока, мост постоянного тока Р-333.

Введение

Мостовой метод измерений – метод измерения электрических сопротивлений по постоянному или по переменному току при помощи измерительных мостов нашел широкое применение в измерениях физических величин, функционально связанных с электрическим сопротивлением. На изменении параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.) под влиянием различных физических факторов основано применение мостового метода для измерения неэлектрических величин (давления, температуры, влажности и т.д.).

Мостовой метод измерения электрических величин, как и компенсационный метод, при использовании эталонов электрических величин позволяет получить результат измерения с точностью, превышающей точность современных методов прямых измерений с цифровой индикацией результата.

Измерение сопротивлений. Метод и описание установки

Мостовая схема (мост Уитстона) состоит из четырех сопротивлений, соединенных последовательно; начало первого сопротивления соединено с концом четвертого; в диагонали образовавшегося замкнутого четырехугольника включены источник тока и индикатор (рис. 1). В одно плечо моста включается измеряемое сопротивление R_x, в другое – образцовое сопротивление R_3; два остальных вспомогательных образуют так называемые плечи отношения. В качестве индикатора обычно применяется гальванометр магнитоэлектрической системы с нулем в середине шкалы.

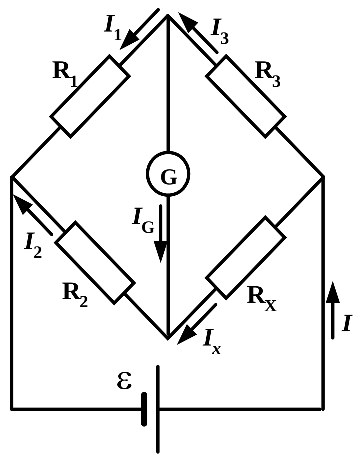


Рис. 1

При изменении сопротивления одного из плеч моста, например R_1, будет изменяться сила тока в цепях моста (I_1, I_2, I_3, I_x).

Существует определенное соотношение между сопротивлениями, составляющими схему R_x, R_1, R_2, R_3, при котором сила тока, идущего через гальванометр, обращается в нуль. Такое состояние схемы соответствует уравновешенному мосту. Решая систему уравнений Кирхгофа:

а) $\sum I_i = 0$ – для узла,

б) $\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i$ – для замкнутого контура

для уравновешенного моста можно получить соотношение:

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1},$$

откуда $R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}$.

Приведенное может служить для отыскания любого из четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, если известны три других сопротивления.

ЭДС батареи, питающей мост, сопротивление батареи и гальванометра существенной роли для определения искомого сопротивления не играют. Однако точность определения неизвестного сопротивления будет выше, когда отношение R_2/R_1 или R_3/R_1 близко к единице.

Мост постоянного тока типа Р-333 – пример технического оформления прибора промышленного изготовления для измерения сопротивления.

Схема моста. Измерительная часть схемы моста – четырехплечий мост, в сравнительном плече которого включен четырехдекадный плавнорегулируемый магазин сопротивлений на 9999 Ом ступенями через 1 Ом. Схема позволяет получать в каждой декаде девять номинальных значений сопротивлений. При помощи переключателя плеч включаются различные комбинации сопротивлений R_1, R_2, R_3. Общий вид установки показан на рис. 2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 1. В качестве сопротивлений R_1, R_2, R_3 использовать магазины сопротивлений.

2. После проверки схемы преподавателем схему подключить к источнику тока.

3. Сопротивлениями R_1 и R_2 установить отношения R_2/R_1: 1:1, 1:2, 2:1, 3:2 и т.д. (рекомендуется преподавателем).

4. Подобрать сопротивление R_3 таким образом, чтобы стрелка гальванометра была на нуле.

5. Вычислить неизвестное сопротивление по приведенной ранее формуле.

6. Полученные данные занести в таблицу.

№ п/п	R_1, Ом	R_2, Ом	$n = R_2/R_1$	R_3, Ом	R_x, Ом

7. Повторить аналогичные измерения для отношения R_3/R_1: 1:1, 1:2, 2:1, 3:2 и т.д. (рекомендуется преподавателем).

8. Рассчитать погрешность R_x.

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Изменится ли условие равновесия моста, если гальванометр и источник тока поменять местами?
3. Как формулируются законы Кирхгофа?
4. Выведите условие равновесия моста, используя законы Кирхгофа.
5. Запишите формулу для определения сопротивления участка цепи, содержащего последовательно или параллельно соединенные резисторы.

Список рекомендуемой литературы

1. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. – §57, 58, 59, 60.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1978. – §31, 34, 36.
3. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1968. Задача 69.

Лабораторная работа № 3-8

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА

Цель работы: освоить методы измерения электрического сопротивления металла, определить удельное сопротивление.

Оборудование: прибор FPM-0I для измерения удельного сопротивления, содержащий источник регулируемого постоянного напряжения, миллиамперметр с внутренним сопротивлением R_A = 0,15 Ом, вольтметр с внутренним сопротивлением R_V = 2500 Ом. Прибор оснащен стойкой, к неподвижным и непроводящим кронштейнам которой крепится резистивный провод из хромоникелевого сплава (78 % Ni, 22 % Cr). Между кронштейнами расположено подвижное электрическое контактное устройство, с помощью которого можно изменять сопротивление *R*, изменяя длину рабочего (нижнего от скользящего контакта) участка провода. Для измерения диаметра провода применяется микрометр.

Введение

Электропроводность металлов обусловлена тем, что в них содержится огромное количество свободных носителей заряда – электронов проводимости, образовавшихся из валентных электронов атомов металла. Электроны проводимости являются коллективизированными (обобществленными) электронами.

В классической электронной теории электропроводности металлов эти электроны рассматриваются как электронный газ, который может рассматриваться как идеальный. При этом пренебрегают взаимодействием электронов между собой, считая, что они соударяются лишь с ионами, образующими кристаллическую решетку. В промежутках между соударениями электроны движутся свободно, пробегая в среднем путь $\langle\lambda\rangle$. Средняя скорость электронов определяется по формуле

$$\langle\upsilon\rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

где *m* – масса электрона, T – температура, $k = 1{,}38\cdot10^{-23}\,\text{Дж}/\text{К}$ (постоянная Больцмана).

Число электронов проводимости в единице объема одновалентного металла может быть определено по формуле

$$n = \delta\frac{N_A}{M},$$

где δ – плотность металла; $N_A = 6{,}02\cdot10^{23}\text{моль}^{-1}$ (постоянная Авогадро); M – молекулярная масса металла.

Электрический ток возникает при наличии электрического поля внутри металла, которое вызывает упорядоченное движение электронов с некоторой скоростью $\langle\vec{u}\rangle$. Ток можно охарактеризовать с помощью вектора плотности тока $\vec{j}$, который численно равен электрическому заряду, проходящему за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению упорядоченного движения заряженных частиц

$$j = \frac{1}{dS}\frac{dq}{dt} = \frac{dI}{dS}.$$

При равномерном распределении плотности электрического тока j по сечению S проводника

$$j = \frac{I}{S}.$$

Плотность тока связана с концентрацией электронов n, зарядом электрона e и скоростью направленного движения $\langle\vec{u}\rangle$ соотношением

$$\vec{j} = en\langle\vec{u}\rangle. \qquad (1)$$

На основании классической электронной теории электропроводности металлов формула (1) может быть преобразована в

$$\vec{j} = \frac{e^2 n\langle\lambda\rangle}{2m\langle\upsilon\rangle}\vec{E}. \qquad (2)$$

Из (2) видно, что плотность тока $\vec{j}$ пропорциональна напряженности электрического поля $\vec{E}$. Соотношение (2) выражает закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}, \qquad (3)$$

где σ – удельная электропроводность металла, определяемая выражением:

$$\sigma = \frac{e^2 n\langle\lambda\rangle}{2m\langle\upsilon\rangle}.$$

Величина

$$\rho = 1/\sigma$$

называется удельным сопротивлением материала. Тогда формулу (3) можно записать в виде

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho}\vec{E}.$$

Если бы электроны не сталкивались с ионами решетки, длина свободного побега $\langle\lambda\rangle$ и, следовательно, проводимость σ были бы очень большими, а удельное сопротивление ρ – пренебрежимо малым. Таким образом, согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки. Несмотря на весьма приближенные допущения, классическая электронная теория металлов качественно объясняет многие законы постоянного тока. Экспериментально удельное сопротивление ρ металла может быть получено при измерении сопротивления R образцов исследуемого материала

$$R = \rho \frac{l}{S}, \qquad (4)$$

где l – длина; S – площадь поперечного сечения образца металла.

Методы измерения сопротивления

1. Метод с использованием амперметра и вольтметра, когда искомое сопротивление рассчитывают по закону Ома для участка цепи (рис. 1) $R = U/I$, где I – ток в сопротивлении; U – напряжение на нем; R – сопротивление одного из участков резистивной проволоки.

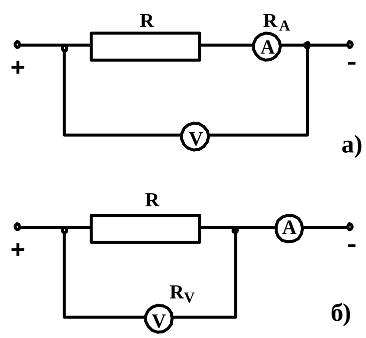


Рис. 1

Применение этой формулы предполагает, что внутреннее сопротивление амперметра $R_A = 0$, а внутреннее сопротивление вольтметра $R_V = \infty$. В реальных условиях приходится вводить поправки на внутреннее сопротивление измерительных приборов. Когда измерения происходят по схеме 1, *а*, амперметр измеряет силу тока в исследуемом сопротивлении, а вольтметр измеряет падение напряжения на сопротивлениях R и R_A. Такая схема включения трактуется как «точное измерение силы тока». В этом случае искомое сопротивление найдется по формуле

$$R = \frac{U}{I}\left(1 - R_A \frac{I}{U}\right), \qquad (5)$$

где I, U – измеряются, R_A берется из паспортных данных.

Когда измерения происходят по схеме 1, *б*, амперметр измеряет силу тока в параллельной цепи сопротивления R и вольтметра, а вольтметр измеряет падение напряжения только на исследуемом сопротивлении. Такая схема включения трактуется как «точное измерение напряжения». В этом случае искомое сопротивление найдется по формуле

$$R = \frac{R_V U}{I R_V - U}, \qquad (6)$$

где I, U – измеряются, R_V берется из паспортных данных.

2. Мостовой метод измерения сопротивления основан на балансе 4-плечного моста (см. описание к лаб. работе 3-3), в одно плечо которого введен измеряемый участок резистивного провода, или при использовании моста постоянного тока Р-333 с подключенным измеряемым сопротивлением.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерить неизвестное сопротивление методом амперметра и вольтметра.

1. Включить прибор (рис. 2) в сеть.

2. Установить метод измерения сопротивления. В нажатом положении переключателя реализуется метод амперметра и вольтметра.

3. Подвижный электрический контакт фиксируют на разных точках резистивного провода. Для каждой точки измеряют длину l исследуемого участка провода, а также несколько раз силу тока I и напряжение U в электрической цепи по каждой измерительной схеме: а) «точное измерение напряжения»; б) «точное измерение силы тока».

Для каждого опыта рассчитывают величину сопротивления R с учетом поправок на внутреннее сопротивление измерительных приборов:

- для схемы п. 3а по формуле (6);
- для схемы п. 3б по формуле (5).

Задание 2. Определение удельного сопротивления металла.

1. Измерить диаметр провода d и площадь сечения S.

2. Из формулы (4) рассчитать удельное сопротивление ρ. Результаты занести в таблицу.

3. Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерений.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные положения классической электронной теории металлов?
2. Запишите формулу для определения плотности тока.
3. Запишите закон Ома в дифференциальной форме.
4. Выведите закон Ома из электронных представлений.

5. В чем сущность электросопротивления металлов?
6. От каких параметров зависит сопротивление проводников?
7. Вывести расчетные формулы (5) и (6).

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т.2. – М.: Наука, 1982. §34, 77, 78. 496 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. §145 – 147.

Лабораторная работа № 4-2
ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ ПО ЕЁ РЕАКТИВНОМУ И АКТИВНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЯМ

Цель работы: ознакомиться с явлением самоиндукции, изучить один из методов определения индуктивности катушки.

Оборудование: исследуемая катушка, ферромагнитный сердечник, вольтметр, амперметр, реостат, трансформатор, мост переменного тока *Р*-577, мост постоянного тока Р-333.

Введение

В трёхтомном труде Майкла Фарадея (1791 – 1867) "Экспериментальные исследования по электричеству" содержится глава об индуктивном влиянии электрического тока на самого себя и об индуктивном действии электрических токов вообще. В этой главе Фарадей описал явление самоиндукции, которое заключается в том, что если в проводящем контуре изменяется сила тока, то в нём возникает ЭДС самоиндукции ε_{si}, пропорциональная скорости изменения тока:

$$\varepsilon_{si} = -L(dI/dt).$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью проводящего контура.

Явление электромагнитной индукции было независимо открыто также американским физиком Джозефом Генри (1797 – 1878). Современная физика увековечила научный вклад Генри, присвоив единице индуктивности L название "генри" (Гн). 1Гн=1(В·с)/А.

Индуктивность проводящего контура зависит от его формы и размеров, а также от магнитной проницаемости μ окружающей среды.

В качестве проводящего контура, индуктивность которого будем определять, используем катушку (соленоид). Соленоиды широко используются в технических устройствах и в лабораторной практике, так как с их помощью легко создавать однородное магнитное поле известной напряжённости $\vec{H}$ или магнитной индукции $\vec{B}$. Эти характеристики поля связаны соотношением $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Катушки индуктивности также применяются для накопления энергии.

Индуктивность L длинного соленоида вычисляется по формуле

$$L = \mu\mu_0 N^2 S / l = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где μ – магнитная проницаемость вещества внутри соленоида; μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; l – его длина; S – площадь поперечного сечения; $n = N/l$ – число витков на единицу длины; V – объём соленоида.

Для экспериментального определения индуктивности катушки пользуются законом Ома для переменного тока $I = U/Z$, где I и U – эффективные значения силы тока и напряжения на участке цепи, показываемые приборами, предназначенными для переменного тока; Z – общее сопротивление участка цепи переменному току.

Общее сопротивление участка цепи с последовательным соединением R, L и C по переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2},$$

где ω – циклическая частота переменного тока; C – электроёмкость; L – индуктивность; R – омическое (активное) сопротивление участка цепи. Если в исследуемой электрической цепи содержатся R, L и нет электроемкости C, то общее сопротивление такой цепи вычисляется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Из данной формулы индуктивность катушки

$$L = \sqrt{(Z^2 - R^2)} / \omega,$$

где $\omega = 2\pi\pi$; $\nu = 50$ Гц.

Описание установки

Экспериментальная установка собирается по схеме (рис. 1). Реостат подключается к источнику тока по схеме потенциометра, чем обеспечивается регулирование напряжения на исследуемой катушке индуктивности L. При подключении индуктивности L к источнику постоянного тока, а это необходимо для определения активного сопротивления катушки, в измерительной части схемы используется вольтметр с малым предельным значением измеряемого напряжения. Мост постоянного тока Р-333 предназначен для прямого измерения сопротивления катушки R, а мост переменного тока Р-577 – для прямого измерения сопротивления R катушки или её индуктивности L (без сердечника). Общий вид установки показан на рис. 2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь экспериментальной установки по схеме рис. 2.

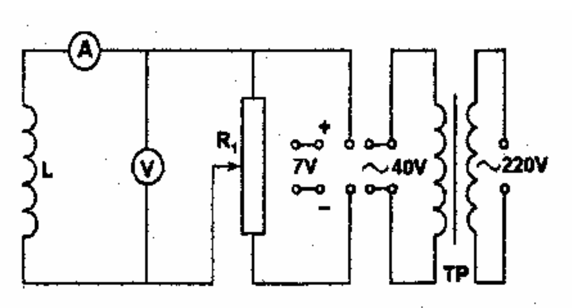


Рис. 1

2. Присоединить электрическую цепь к выходным клеммам разделительного трансформатора ТР. После проверки схемы преподавателем разделительный трансформатор включают в сеть $U = 220В$, $\nu = 50Гц$.

3. Меняя положение движка реостата, наблюдать изменение силы тока I и напряжения U, а затем измерить ряд значений силы тока и соот-

ветствующие им значения напряжения. Результаты эксперимента внести в таблицу измерений I и U.

4. Ввести в катушку индуктивности ферромагнитный сердечник. Измерить ряд значений силы тока I и соответствующие им значения напряжения U. Результаты измерений занести в таблицу.

5. Выключить трансформатор. Отсоединить электрическую схему от трансформатора и подключить её к клеммам источника постоянного тока. Заменить вольтметр на другой с малым пределом измерения U.

6. Включить источник постоянного тока. Измерить ряд значений силы тока I и напряжений U. Результаты измерений занести в таблицу.

7. Используя закон Ома, вычислить полное Z и активное R сопротивления катушки.

8. Вычислить индуктивность катушки с сердечником и без сердечника. Оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит явление самоиндукции? Как вычисляется ЭДС самоиндукции?
2. Как вычисляется индуктивность длинного соленоида?
3. Что такое полное сопротивление проводящего контура и от каких параметров оно зависит?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В. 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1988. §64, 92.
2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. § 93. – 220 с.

Лабораторная работа № 4-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: изучить устройство, работу электронного осциллографа и генератора звуковой частоты и их применение к исследованию электрических колебаний звуковой частоты.

Оборудование: электронный осциллограф, звуковые генераторы известной и неизвестной частот, соединительные провода.

Введение

Электронный осциллограф – электроизмерительный прибор, предназначен для наблюдения и исследования электрических процессов. С помощью осциллографа можно исследовать форму кривых, описывающих процесс, сравнивать амплитуду и частоту различных сигналов и т.д. Применяя специальные преобразователи, с помощью осциллографа можно также исследовать быстрые неэлектрические процессы, например механические колебания.

В настоящей работе с помощью осциллографа исследуются процессы сложения колебаний одного направления и сложения взаимно перпендикулярных колебаний. В качестве источников колебаний применяют стандартный генератор звуковой частоты (ГЗ), с помощью которого можно получить колебания в широком диапазоне частот, и генератор Гх, частота которого постоянна.

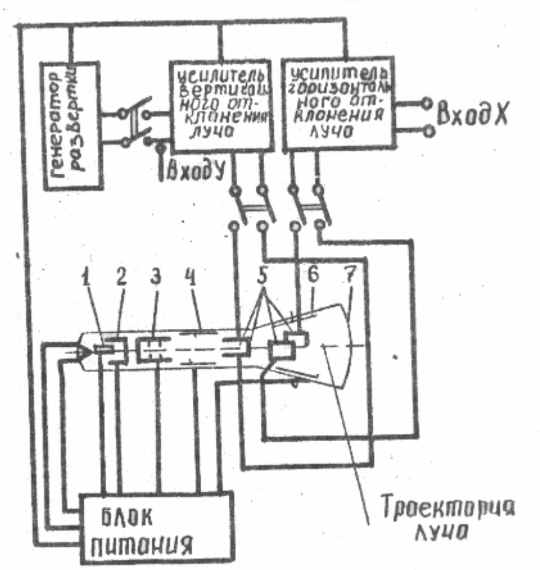


Рис. 1

Электронно-лучевая трубка – основной элемент электронного осциллографа (рис. 1). Основные части: 1 – оксидный катод; 2 – электрод, управляющий яркостью изображения, наложением больших или меньших отрицательных напряжений по отношению к катоду; 3 – фокусирующий катод (первый анод), выделяющий узкий электронный пучок; 4 –ускоряющий анод (второй анод), от потенциала которого зависит чувствительность трубки; 5 – две пары вертикально и горизонтально отклоняющих, пластин; 6 – ускоритель (третий анод) усиливает яркость изображения и представляет собой проводящий слой на боковой поверхности экрана; 7 – экран с флюоресцирующим слоем. Попадая на этот слой, электроны вызывают свечение в точке удара.

Генератор развертки. Для получения на экране трубки картины электрического процесса в координатах "напряжение – время" к одной паре пластин подводится линейно меняющееся со временем (пилообразное) напряжение (рис. 2). Электронный луч под действием пилообразного напряжения прочерчивает горизонтальную линию, пробегая за равные отрезки времени равные расстояния. В течение некоторого времени луч возвращается в исходное положение (обратный ход).

Наклон пилообразного напряжения и, следовательно, скорость движения луча можно изменять. При этом будет меняться временной масштаб развертки.

Определение частоты сигналов методом фигур Лиссажу. Если подключить к горизонтальному входу осциллографа источник переменного (синусоидального) тока, то светящаяся точка будет совершать гармоническое колебание вдоль оси *X*: $x = a\sin\omega_x t$. При подключении к вертикальному входу осциллографа источника синусоидального колебания светящаяся точка совершает колебание вдоль оси *Y*: $y = b\cos(\omega_y t + \alpha)$, где a и b – амплитуды соответствующих смещений, ω_x и ω_y – циклические частоты колебаний вдоль осей *X* и *Y*, α – разность фаз колебаний. Траектория движения точки – результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний. Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний неодинаковы, то траектории результирующего движения имеют вид довольно сложных кривых.

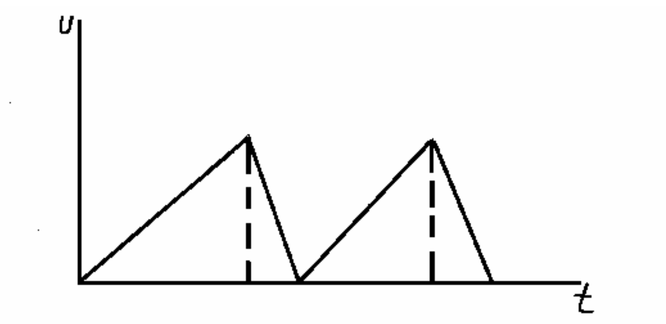


Рис. 2

Если отношение частот ω_x/ω_y выражается рациональной дробью, то результирующее движение имеет форму кривой, называемой фигурой Лиссажу. Их вид зависит от соотношения амплитуд, частот и фазы α складываемых взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу вписываются в прямоугольник, центр которого совпадает с нулевым положением луча, а стороны параллельны осям *X* и *Y*. В качестве примера для нескольких значений ω_x/ω_y и разности фаз α фигуры Лиссажу приведены на рис. 3. Чем ближе к единице рациональная дробь, выражающая отношение частот колебаний, тем сложнее фигура Лиссажу.

Порядок выполнения работы

1. Специальным кабелем или соединительными проводами подключить осциллограф к генератору.

2. Включив осциллограф и звуковой генератор, получить устойчивую картину сигнала.

3. Изменяя частоту сигнала звукового генератора получить и зарисовать фигуры Лиссажу для соотношения частот 3:2; 2:1; 1:2; 2:3; 3:1.

4. Определить для каждого случая частоту колебаний неизвестного генератора, используя формулу $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{n_y}{n_x}$, где n_x и n_y – число точек касания фигуры соответственно с горизонтальной и вертикальной линиями.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение осциллографа?
2. Из каких основных блоков состоит осциллограф? Каково их назначение?
3. Как устроена электронно-лучевая трубка? Каким образом формируется в ней электронный луч?
4. Что получается в результате сложения двух колебаний одинакового направления и при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний?

5. Как с помощью осциллографа определяется истинное значение амплитуды измеряемого сигнала?

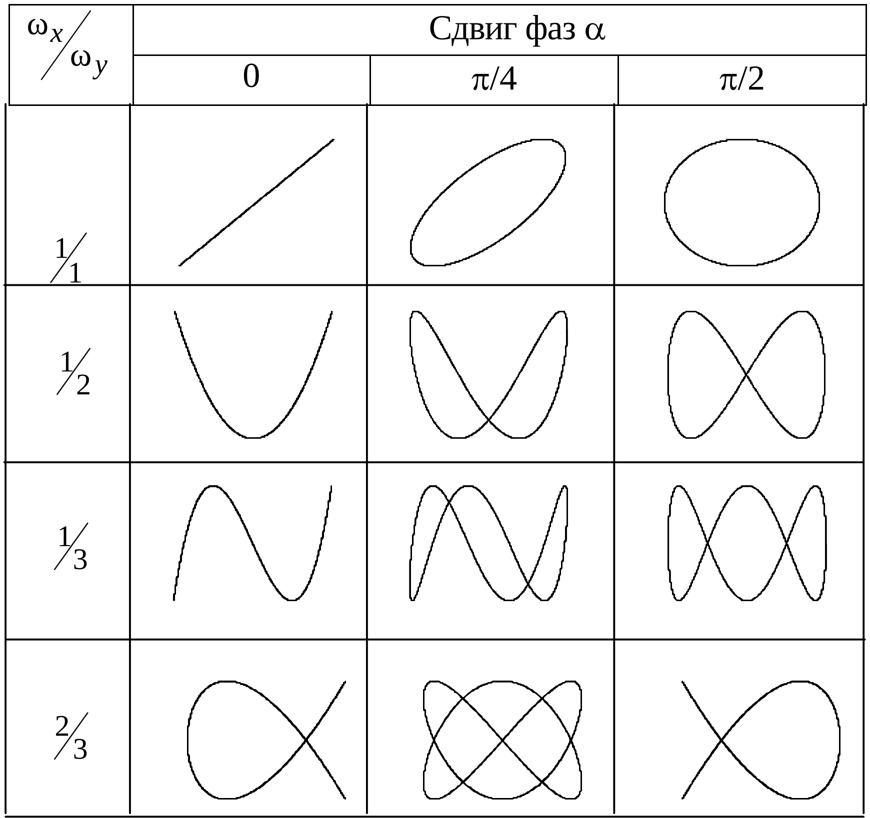


Рис. 3

Рекомендательный библиографический список

1. Бутковский О.Я, Бухарова О.Д., Кузнецов А.А. Лабораторный практикум по физике. Электростатика и постоянный ток / Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1993. – 44 с.
2. Лабораторный практикум. Колебания и волны: Учеб. пособие /Под ред. В.А. Шилова. – М: МИФИ, 1989. – 56 с.

Лабораторная работа № 4-7

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Цель работы: получение стоячих электромагнитных волн, определение длины электромагнитной волны и скорости распространения.

Оборудование: ламповый генератор незатухающих электрических колебаний, источник питания, двухпроводная измерительная линия с индуктивной связью, два мостика с индикаторами.

Введение

При прохождении электрического тока через контур, обладающий омическим сопротивлением *R*, часть энергии тока непрерывно переходит в тепло. Поэтому электрические колебания в контуре сравнительно быстро затухают. Для получения незатухающих электрических колебаний электрическую энергию контура необходимо непрерывно пополнять.

Современные ламповые генераторы позволяют получить электрические колебания как очень низких (с периодом в 10 – 10 с), так и очень высоких частот (с периодом в миллиардные доли секунды).

Электрические волны вдоль проводов. Двухпроводная линия состоит из двух длинных параллельных проводов, натянутых на некотором расстоянии друг от друга. В дальнейшем будем пренебрегать сопротивлением проводов, а также будем считать, что расстояние между проводами значительно меньше, а длина проводов значительно больше длины электромагнитной волны. При этих условиях электромагнитное поле сосредоточено в основном между проводами, поэтому система практически не излучает электромагнитные волны в окружающее пространство, выполняя роль канала для передачи высокочастотной энергии от генератора к приемнику. Поместим вблизи катушки *L* лампового генератора незатухающих электрических колебаний катушку L_3, концы которой присоединим к длинным параллельным проводникам АВ и БГ (рис. 1). При прохождении через контур электрических колебаний в катушке L_3 возникает переменная ЭДС индукции и точки А и Б заряжаются периодически то положительно, то отрицательно, причём если точка А заряжается положительно, то точка Б отрицательно и наоборот. В соответствии с колебательным характером изменения ЭДС в катушке L_3 величина потенциала в точках А и Б меняется колебательным образом. Области с максимальным значением

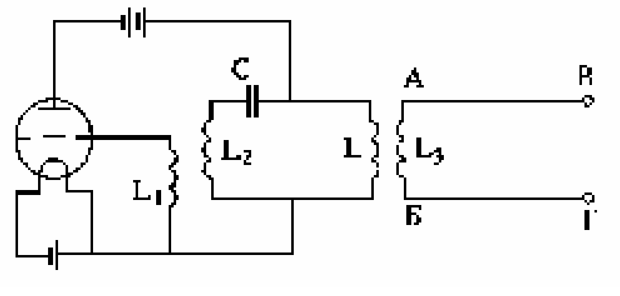


Рис. 1

потенциала не остаются локализованными в точках А и Б, а распространяются с некоторой скоростью С, подобно тому, как механические колебания, возбуждённые на конце струны, распространяются вдоль этой струны.

Если заснять мгновенную картину распределения потенциала на проводниках АВ и БГ, то окажется, что распределение потенциала проводника меняется по тому же гармоническому закону, по которому совершаются электрические колебания в контуре генератора (рис. 2).

Колебания генератора вызывают в проводниках АВ и БГ волнообразное распространение максимумов потенциала. На рис. 2 показаны электрическое и магнитное поля в двухпроводной линии. Силовые линии электрического поля "перекинуты" от положительно заряженных участков одного проводника к отрицательно заряженным участкам другого. Магнитные силовые линии охватывают проводники и расположены перпендикулярно электрическим линиям и скорости распространения волны.

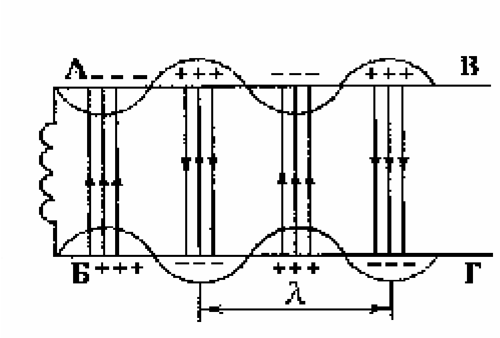


Рис. 2

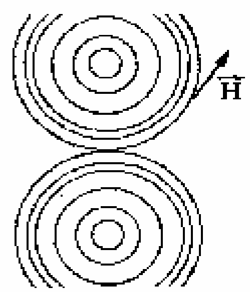


Рис. 3

Электромагнитные волны, распространяясь вдоль проводников АВ и БГ, отражаются от их концов подобно тому, как отражается от точки крепления волна, бегущая вдоль струны. Отражённая волна, идущая по направлению к генератору, складываясь с прямой волной, идущей от генератора, даёт стоячую электромагнитную волну.

Если посредством мостика лампочку накаливания Л перемещать вдоль проводников АВ и БГ (рис. 4), то накал лампочки будет меняться от нуля до некоторого максимального значения. Точки, в которых лампочка загорается до максимального накала, соответствуют максимальному значению силы тока и максимальному значению напряженности магнитного поля. Эти точки являются пучностями магнитного поля. Точки, в которых сила тока равна нулю (лампочка не горит), являются узлами тока и электромагнитной волной. Если перемещать вдоль проводников мостик с неоновой лампочкой, реагирующей на электрическое поле, то можно выявить пучности и узлы электрического поля стоячей волны. С пучностями магнитного поля совпадают узлы электрического и, наоборот, с узлами магнитного поля совпадают пучности электрического поля.

Расстояние между двумя соседними пучностями, или узлами магнитного (электрического) поля, равно половине длины волны, распространяющейся вдоль проводников. Если это расстояние обозначить через l, то будем иметь

$$\lambda = 2l, \qquad (1)$$

длину волны λ можно выразить

$$\lambda = cT = c/\nu, \qquad (2)$$

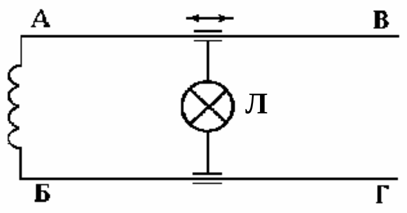


Рис.4

где c – скорость распространения волны; T – период колебаний; ν – частота колебаний.

Из формул (1) и (2) получаем

$$c = \nu\lambda = 2l\nu. \qquad (3)$$

Зная частоту колебаний генератора и измерив длину волны, определим скорость распространения электромагнитных волн.

Порядок выполнения работы

1. Соединить генератор электрических колебаний с длинными параллельными проводниками и возбудить в них стоячую электромагнитную волну.
2. Перемещением вдоль проводников мостика, имеющего лампочку накаливания, выявить пучности и узлы магнитного поля стоячей волны. Измерить расстояние между первой и второй, первой и третьей, первой и четвёртой пучностями магнитного поля.
3. Перемещать вдоль проводников мостик, имеющий неоновую лампочку, и выявить пучности и узлы электрического поля стоячей волны. Убедиться, что пучности электрического поля совпадают с узлами магнитного поля и наоборот. Измерить расстояние между первой и второй, первой и третьей, первой и четвёртой пучностями электрического поля.
4. Пользуясь формулой (3), вычислить скорость распространения электромагнитных волн и оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о явлениях, наблюдающихся в закрытом колебательном контуре.
2. Каков механизм образования стоячих волн в двухпроводной линии?

Рекомендательный библиографический список

1. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 231 с., §231.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука; 1988. §105, 106.

5. ОПТИКА

В разделе «Оптика» студенты осваивают основные понятия, явления и задачи волновой оптики, знакомятся с методами измерения оптических характеристик (длина волны, показатель преломления и т.п.), а также с применением оптических измерений в прикладных целях (определение концентрации раствора сахара). Необходимо отметить, что оптические приборы являются точными и дорогими инструментами и выполнять работы с их помощью следует особенно тщательно и аккуратно.

Лабораторная работа № 5-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы: ознакомление с интерференцией, условием образования колец Ньютона и принципом их использования для практических целей.

Оборудование: микроскоп МИМ-7, выпуклая линза, плоскопараллельная стеклянная пластинка, светофильтр, сферометр ИЗС-7.

Введение

Согласно волновой теории свет представляет собой электромагнитную волну, в которой колеблются два взаимно перпендикулярных вектора – $\vec{E}$ напряженности электрического и $\vec{H}$ напряженности магнитного поля. Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями вектора $\vec{E}$. В соответствии с этим обычно говорят о световом векторе, подразумевая под ним вектор $\vec{E}$.

Итак, плоскую световую волну, распространяющуюся, например, вдоль оси Z можно представить в виде

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz - \alpha), \qquad (1)$$

где $\vec{E}_0$ = const – амплитуда колебания, $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота, T – период, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, α – начальная фаза волны. Длины волн видимого света заключены в пределах $4\cdot10^{-7}$ м $\le \lambda \le 7.6\cdot10^{-7}$ м.

Волны одинаковой частоты, разность начальных фаз которых постоянна во времени, называются когерентными волнами, а источники когерентных волн называются когерентными источниками.

Рассмотрим наложение двух когерентных волн, линии колебаний которых совпадают. Пусть эти волны исходят из источников S_1 и S_2 (рис. 1).

Для простоты расчета допустим, что $E_{01} = \quad = E_{02} = E_0$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$. Тогда согласно (1)

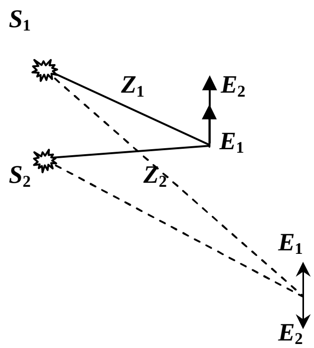


Рис. 1

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t - kz_1),\ E_2 = E_0 \cos(\omega t - kz_2).$$

С помощью формулы суммы тригонометрических функций $\cos\alpha+\cos\beta = = 2\cos[(\alpha+\beta)/2]\cos[(\alpha - \beta)/2]$ легко получить для результирующей волны

$$E = E_1 - E_2 = 2E_0\cos[k(z_2 - z_1)/2]\cos[\omega t - k(z_1+z_2)/2]. \qquad (2)$$

Из (2) следует, что в точках, где $\cos[k(z_2 - z_1)/2] = 0$, суммарная амплитуда волны в любой момент времени равна 0 и волны взаимно гасятся. Координаты этих точек определяются условием $k(z_2 - z_1)/2 = \pm(2m+1)\pi/2$ или с учетом $k = 2\pi/\lambda$

$$\Delta = z_2 - z_1 = \pm(2m+1)\lambda/2 \quad (m = 0,1,2,3\ldots\ldots). \qquad (3)$$

В точках, где $\cos[k(z_2 - z_1)/2] = \pm 1$, суммарная амплитуда волны в любой момент времени принимает максимальное значение. Координаты этих точек определяются условием $k(z_2 - z_1)/2 = \pm m\pi$ или

$$\Delta = z_2 - z_1 = \pm\, 2m\lambda/2 \quad (m = 0,1,2,3\ldots\ldots). \qquad (4)$$

Полученные результаты (3) и (4) показывают, что при наложении двух когерентных световых волн, имеющих одинаковые направления колебаний, в одних точках волнового поля амплитуда результирующих колебаний резко уменьшается, а в других – возрастает. При этом интенсивность результирующей световой волны либо больше, либо меньше суммы интенсивностей падающих волн. Явление это называется *интерференцией световых волн*.

В данной работе используется интерференция в тонком слое, известная под названием колец Ньютона. Этот случай наблюдается, когда выпуклая поверхность линзы соприкасается в некоторой точке с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки, так что остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения к краям (рис. 2).

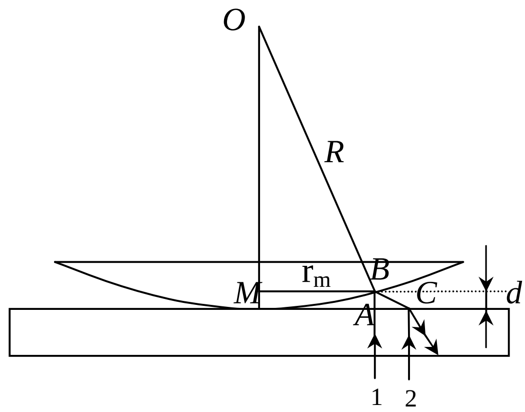


Рис. 2

Если на систему приблизительно нормально к плоской поверхности пластинки падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от нижней и верхних границ этой воздушной прослойки, будут интерферировать между собой, так как здесь наблюдаются все необходимые для света условия. При этом в точке соприкосновения получается темное пятно, и оно окружено рядом концентрических светлых и темных колец убывающей толщины. Нетрудно рассчитать размеры и положение колец Ньютона, предполагая, что свет падает нормально к поверхности пластинки. Показатель преломления воздуха $n \approx 1$ и меньше показателя преломления стекла. Поэтому при отражении идущего снизу светового луча от границы воздух – линза теряется половина длины волны $\lambda/2$. Эта потеря равносильна увеличению оптической длины пути на $\lambda/2$ и должна учитываться при вычислении оптической разности хода Δ. Тогда оптическая разность хода лучей 1 и 2 (рис. 2) $\Delta = (AB + BC) + \lambda/2$. Ввиду того, что толщина воздушной прослойки d очень мала, $AB \approx BC \approx d$, поэтому

$$\Delta = 2d + \lambda/2: \qquad (5)$$

Для подсчета кольца Ньютона рассмотрим треугольник *OBM*, где $OB = R$ – радиус кривизны линзы, $MB = r_m$ – радиус кольца Ньютона. Из рис. 2 следует

$$R^2 = (R - d)^2 + r^2_m = R^2 - 2Rd + d^2 + r^2_m.$$

Так как d мало, то величиной d^2 можно пренебречь, и тогда $d = r_m^2/2R$. Подставляя это значение в (5), получим

$$\Delta = (r_m^2/R) + \lambda/2. \tag{5*}$$

Для темного кольца, подставляя (5^*) в соотношение (3), легко получить

$$r_m^2/R = m\lambda\ . \tag{6}$$

Из (6) можно определить λ (или R), но так как вследствие упругой деформации стекла невозможно добиться соприкосновения сферической линзы и плоской пластинки строго в одной точке, то более правильный результат получится, если вычислять λ (или R) по разности радиусов двух колец r_m и r_n. Тогда окончательная формула будет иметь вид $(r_m^2 - r_n^2) = (m - n)\lambda$. Для расчетов это

$$\lambda = \frac{(r_m - r_n)\cdot(r_m + r_n)}{(m-n)R}\ (m>n). \tag{7}$$

Отсюда, зная радиус кривизны линзы R и экспериментально определяя величины r_m и r_n, можно вычислить длину световой волны λ. Таким образом, для определения длины волны необходимо предварительно с достаточной точностью измерить радиус кривизны используемой линзы. Для этой цели в данной работе применяется специальный прибор сферометр ПЗС-7 (см. описание в лаборатории оптики).

Радиусы интерференционных колец измеряются при помощи микроскопа МИМ-7 (рис. 3). Нить накала лампы 1 коллиматором 2 и зеркалом 3 проектируется в плоскости апертурной диафрагмы 5. При этом свет проходит через светофильтр 4. Системой, состоящей из линз 6, призмы 7 и отражательной пластинки 8, апертурная диафрагма изображается в плоскости опорного торца для объективов. Отражательная пластинка 8 направляет в объектив 9 лучи, которые, отразившись от объекта 10, вновь проходят через объектив, выходят из него параллельным пучком, проходят отражательную пластинку и попадают на ахроматическую линзу 11.

Объектив 9 служит не только для получения изображения, но и является частью осветительной системы. Выходящие из объектива параллельные лучи при помощи линзы 11 изображают объект в фокальной плоскости окуляра 13. При визуальном наблюдении в ход лучей вводится зеркало 12, которое отклоняет лучи в сторону окуляра. Общий вид микроскопа дан на рис. 4, *а*, *б* 5. На предметном столике 7 лежит стеклянная пластинка, на которой при помощи специальных зажимов укреплена выпуклая линза. Свет от источника попадает на выпуклую поверхность линзы снизу через объектив. При этом интерферируют луч, отраженный от верхней поверхности пластинки, и луч, отраженный от выпуклой поверхности линзы. Для получения качественной интерференционной картины необходимо, чтобы радиус кривизны линзы был достаточно большим.

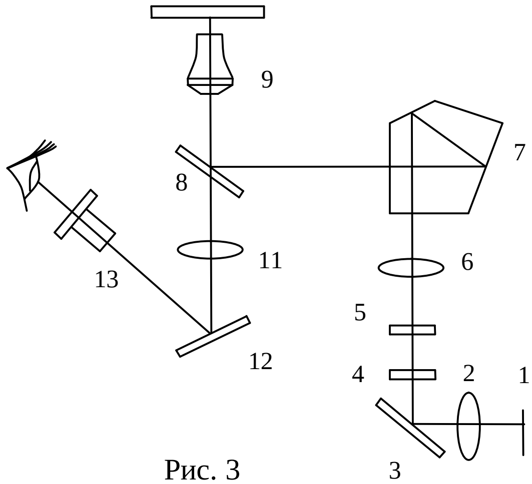


Рис. 3

Порядок выполнения работы

1. При помощи сферометра определить радиус кривизны линзы.

2. Включить лампу осветителя микроскопа МИМ-7 (см. рис. 4, *а*, *б*), поместив на оправе 6 осветительной линзы светофильтр, выделяющий световую волну, длина которой измеряется. При помощи диска 5 ввести дополнительно соответствующий светофильтр.

3. Сняв линзу, освободив стопорную рукоятку 8, фокусировать микроскоп при помощи рукоятки грубой подачи столика 4 на верхнюю поверхность стеклянной пластинки, положив на нее какой-нибудь объект наблюдения (например кусок миллиметровой бумаги или металлическую монету). Закрепив рукоятку 8, поставив затем линзу в прежнее положение, с помощью рукояток 3 установить стеклянную пластинку так, чтобы точка соприкосновения линзы и пластинки попала точно в центр поля зрения окуляра микроскопа 2. Образующиеся на границе воздушного слоя и стеклянной пластинки кольца Ньютона должны быть отлично видны. В противном случае исправить фокусировку микроскопа вращением барашка микрометриче-

ской подачи объектива 1. Если в точке соприкосновения вместо темного пятна получится светлое, необходимо протереть стекло и линзу от пыли.

4. При помощи рукояток 3 добиться, чтобы линия окулярной шкалы проходила через центр ньютоновских колец. Измерить в делениях окулярной шкалы диаметры D темных колец, фиксируя положение их левых (m_1) и правых (m_2) границ. При этом определить расстояние от середины до середины ширины линии кольца. Диаметры измерить три раза, поворачивая каждый раз окуляр со шкалой вокруг оптической оси микроскопа приблизительно на 60° и вычисляют среднее значение каждого диаметра.

5. Вычислить радиусы r_k по формуле

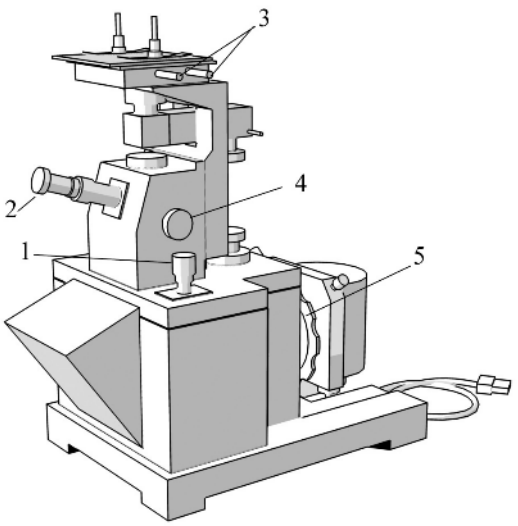


Рис. 4

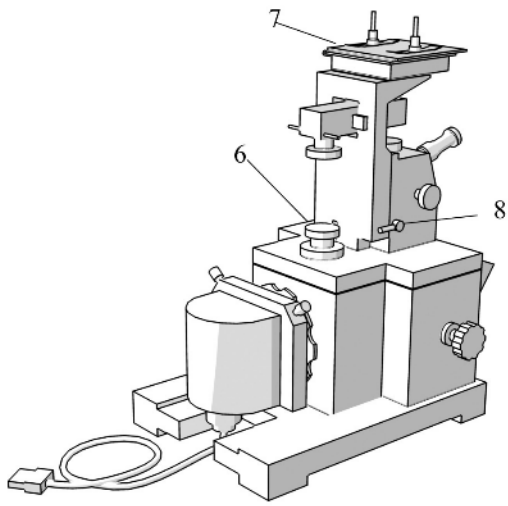


Рис. 5

$$r_k = D_k/2 = (m_2 - m_1)1{,}2\cdot 10^{-3}\text{см}/2 = (m_2 - m_1)6{,}0\cdot 10^{-4}\text{см},$$

где $1{,}2\cdot 10^{-3}$см – цена наименьшего деления шкалы. Заносят их в таблицу.

6. Комбинируя попарно радиусы колец, по формуле (7) определить длину световой волны. В целях повышения точности результата рекомендуется комбинировать радиус кольца номера k с радиусом кольца номера $k - 2$, кольца $k - 1$ с $(k - 2) - 1$ и т.д. Из полученных значений λ вычислить среднее значение длины световой волны.

Контрольные вопросы

1. Почему радиус кривизны линзы, применяемой в данной работе, должен быть достаточно большим?
2. В чем состоит явление интерференции волн?

3. Почему интерференционная картина в данной работе имеет характер колец?

4. Как изменяется интерференционная картина в проходящем свете по сравнению с той же картиной в отраженном свете? Почему?

5. Почему в центре ньютоновских колец получается темное пятно?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-4

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС РАВНОГО НАКЛОНА С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции на примере полос равного наклона и определение показателя преломления стекла.

Оборудование: газовый лазер, микроскопический объектив, экран с круглым отверстием, плоскопараллельная стеклянная пластина.

Введение

При падении расходящегося пучка монохроматического света на плоскопараллельную прозрачную пластину будут наблюдаться так называемые полосы равного наклона, представляющие собой интерференционные максимумы и минимумы. Они имеют вид концентрических светлых и темных колец, толщина которых уменьшается от центра и периферии. Согласно теории интерференции в параллельных пластинах темные кольца удовлетворяют условию (рис. 1).

$$2hn\cos\beta_m = m\lambda, \qquad (1)$$

где h – толщина пластины, n – показатель преломления пластины, β_m – угол преломления, λ – длина падающей световой волны, m = 0, 1, 2, ... (порядок интерференции), S – источник света.

При малых углах падения α_m, и преломления β_m можно положить

$$\cos\beta_m \approx 1 - \beta^2_m/2; \qquad (2)$$

$$n = \sin\alpha_m/\sin\beta_m \approx \alpha_m/\beta_m; \qquad (3)$$

$$\alpha_m \approx \mathrm{tg}\,\alpha_m = r_m/(2l). \qquad (4)$$

где r_m – радиус m-го темного кольца, l – расстояние от плоскости экрана до поверхности пластины. С учетом (2) – (4) из (1) легко установить

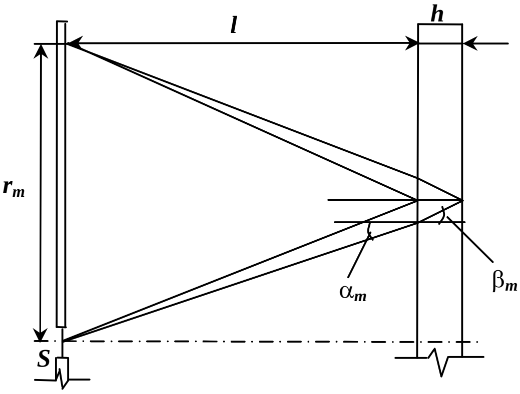


Рис. 1

$$r^2_m/l^2 = 8n^2 - 4n\lambda m/h. \qquad (5)$$

Из этой формулы видно, что величина r^2_m/l^2 линейно зависит от порядка, интерференции m (рис. 2). Очевидно, что $r^2_m/l^2 = 0$ при $4n\lambda m/h = 8n^2$. Отсюда можно определить максимальный порядок интерференции

$$m_{\max} = 2nh/\lambda. \qquad (6)$$

При уменьшении порядка интерференции радиус кольца увеличивается, а при $m = 0$ имеет место $r_0 = \sqrt{8}\,nl = r_{\max}$.

Порядок интерференции m совпадает с порядковым номером интерференционного кольца. Но определить порядковый номер кольца практически невозможно (см. работу № 5-3): большие кольца с малыми порядковыми номерами настолько близко располагаются друг к другу, что их трудно различить и нет возможности фиксировать начало отсчета. Это, в свою очередь, делает невозможным определить показатель преломления пластины с помощью формулы (5), измеряя величины h, l и r_m.

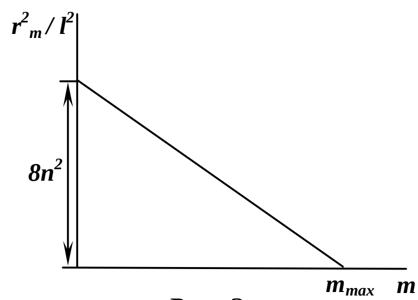


Рис. 2

Чтобы обойти эту трудность, необходимо измерить еще одно интерференционное кольцо, отстоящее от первого, например на N порядков. Тогда

$$r^2_{m-N}/l^2 = 8n^2 - 4n\lambda(m - N)/h. \qquad (7)$$

Вычитая соотношение (7) из соотношения (5), получим

$$(r^2_{m-N} - r^2_m) / l^2 = 4n\lambda N/h.$$

Отсюда

$$n = h(r^2_{m-N} - r^2_m) / 4\lambda l^2 N. \qquad (8)$$

Полученная формула дает возможность вычислить показатель преломления пластины, не зная порядкового номера измеряемых интерференционных колец.

Работа проводится на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 3. Здесь 1 – газовый лазер, 2 – микроскопический объектив, 3 – экран с круглым отверстием, 4 – плоскопараллельная стеклянная пластина. Рейтеры, на которых стоят все принадлежности, позволяют осуществлять необходимую юстировку всей оптической системы. Длина волны лазерного излучения λ = 632,8 нм, толщина стеклянной пластины h = 20,0 мм.

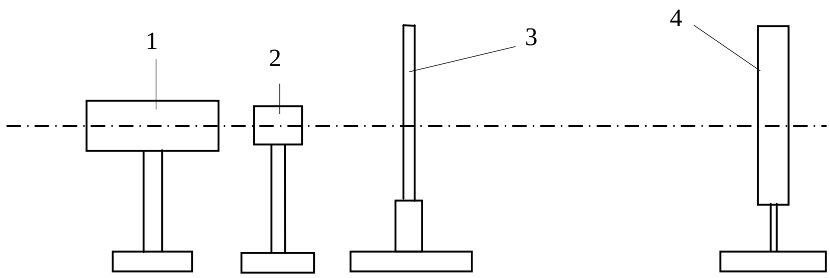


Рис. 3

Порядок выполнения работы

Ознакомившись с элементами и работой всех узлов установки, включить лазер (включение лазера осуществляется только преподавателем или лаборантом).

Обращаем внимание на то, что попадание в глаза прямого лазерного пучка ОПАСНО для зрения. При работе с лазером его свет можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей.

Вывести из хода луча объектив 2 и экран 3 (см. рис. 3). Ориентируют пластину 4 перпендикулярно к направлению пучка света так, чтобы отраженный от нее пучок падал в центр выходного отверстия лазера. Затем вводят в ход пучка и тщательно центрируют микроскопический объектив с круглым отверстием экрана. На экране при этом должна появиться система концентрических светлых и темных колец.

Задание 1***. Определение показателя преломления плоскопараллельной стеклянной пластинки.***

1. Пронумеровать темные кольца, радиусы которых подлежат измерению. Целесообразно нумеровать их, начиная с кольца с минимальным ра-

диусом, которому можно присвоить, например номер m. Приписывают пяти последующим кольцам номера m, $m - 1$, $m - 2$, ..., $m - 5$.

2. Измерить шесть выделенных колец m, $m - 1$, $m - 2$, ..., $m - 5$ с помощью линейки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (для каждого кольца – два значения радиуса).

3. Найти среднее значение радиуса каждого темного кольца r_{m-N} и его квадрат r^2_{m-N}.

4. Построить график зависимости r^2_{m-n} от номера кольца $m - N$. Линия, проводимая по полученным экспериментальным точкам, должна быть прямой. Масштабы по обеим осям координат следует выбрать так, чтобы получившаяся прямая составляла приблизительно угол в 45° с осями координат (так обычно делают при графическом изображении функциональных зависимостей).

5. Из наклона прямой вычислить отношение $(r^2_{m-n} - r^2_m)/N$.

6. Измерить расстояние l от плоскости экрана 3 до поверхности пластины 4 (см. рис. 3).

7. Вычислить по формуле (8) показатель преломления n и определить погрешность.

Задание 2. ***Определение максимального порядка интерференции.***

Вычислить $m_{\max}$ по формуле (6). Для $m_{\max}$ может получиться не целое число, т.е. в центре интерференционной картины, где $r_m = 0$, не обязательно будет темное пятно.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой полосы равного наклона?
2. Что такое порядок интерференции?
3. Почему наблюдаемая в данной работе интерференционная картина имеет вид концентрических окружностей?
4. Почему интерференционные кольца в периферии располагаются гуще, чем в центральной области?
5. Какие условия необходимы для интерференции света?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучение явления дифракции света и ознакомление с одним из методов определения длины световой волны при помощи дифракционной решетки.

Оборудование: источник света, дифракционная решетка, экран с миллиметровым масштабом, измерительная линейка, набор светофильтров.

Введение

Огибание световой волной границ непрозрачных тел за счет интерференционного перераспределения энергии по различным направлениям называется *дифракцией световой волны*. Рассмотрим сначала дифракцию на одной щели.

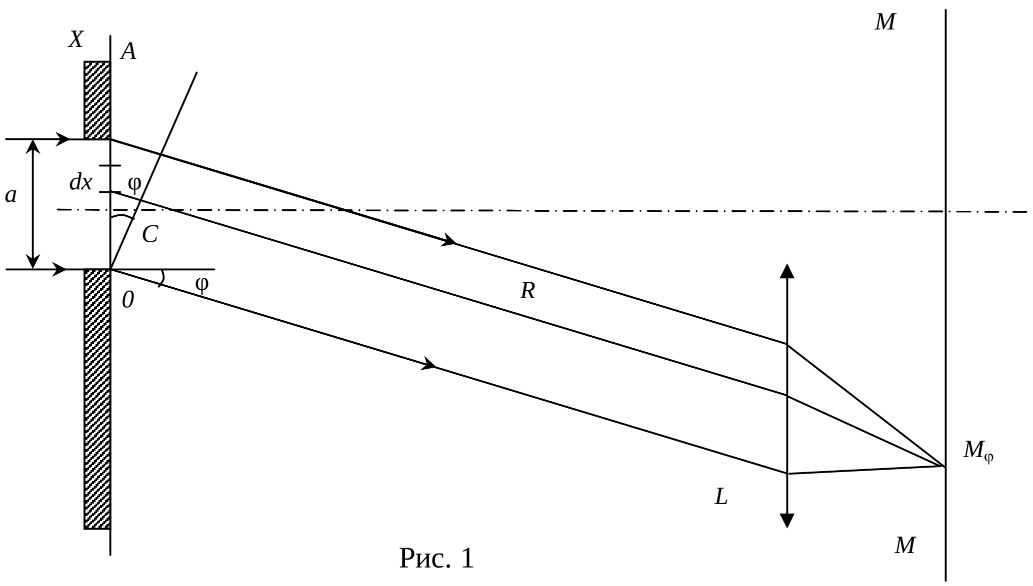


Рис. 1

Если на щель шириной a перпендикулярно ей падает параллельный пучок света (рис. 1), то напряженность E_φ, которую будут иметь дифрагированные электромагнитные волны длиной λ, собираемые линзой в точке M_φ на экране MM, можно рассчитать следующим образом:

$$E_\varphi = \int_0^a \frac{E_0}{a} \cos(\omega t - kx\sin\varphi - kR)dx, \qquad (1)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля в направлении $\varphi=0$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $R = CM\varphi$. Здесь учтено, что линза L не вносит дополнительной разности фаз (таутохронизм). После интегрирования из (1) получим:

$$E_\varphi = E_0 \frac{\sin(\frac{ka}{2}\sin\varphi)}{\frac{ka}{2}\sin\varphi}\cos(\omega t - \alpha_0), \qquad (2)$$

где $\alpha_0 = \frac{ka}{2}\sin\varphi + kR$. Амплитуда колебания (2)

$$E_{\varphi 0} = E_0 \frac{\sin(\frac{ka}{2}\sin\varphi)}{\frac{ka}{2}\sin\varphi} = E_0 \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi)}{\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi}. \qquad (3)$$

Минимум колебаний в результате интерференции дифрагированных лучей в направлении φ определяется согласно (3) условием

$$a\sin\varphi = \pm m\lambda \quad (m=1,2,\ldots). \qquad (4)$$

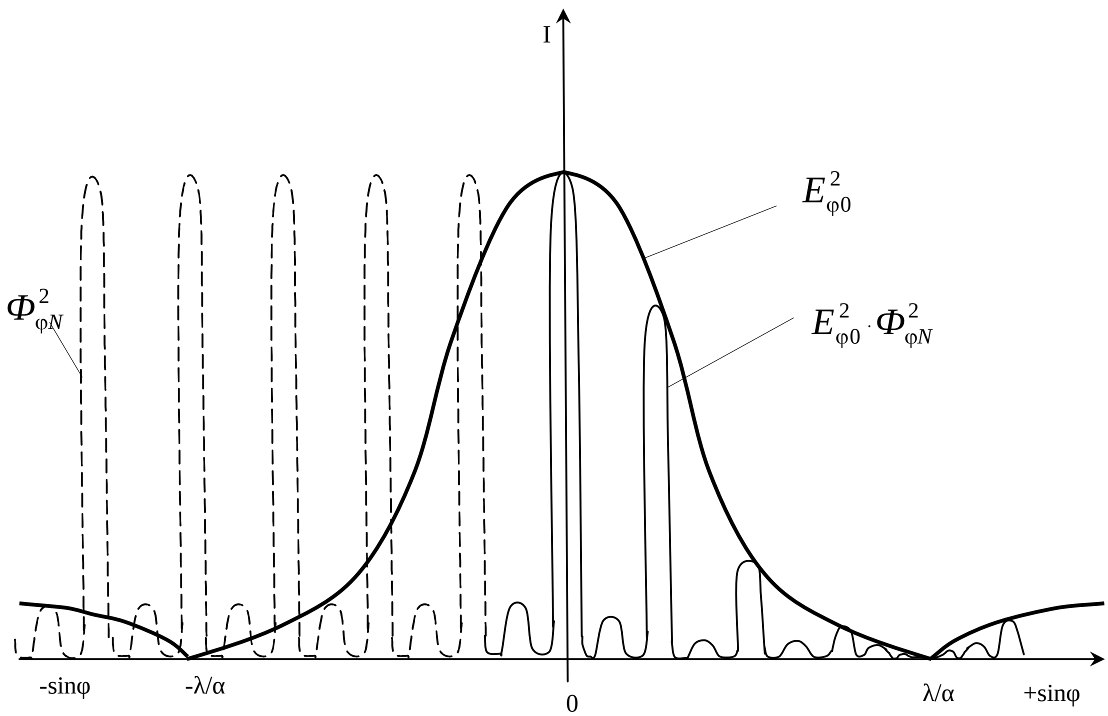


Рис. 2

В направлении φ = 0 наблюдается максимум колебаний, для которого согласно уравнению (3) $E_{\varphi 0} = E_0$. График распределения интенсивности $E^2_{\varphi_0}$ представлен на рис. 2 жирной линией.

Теперь рассмотрим дифракцию параллельного пучка лучей, которые падают нормально к плоскости дифракционной решетки. Простейшая дифракционная решетка представляет собой прозрачную пластинку, на которой нанесены параллельные друг другу царапины и оставлены узкие неповрежденные полоски. Процарапанные места непрозрачны для света, и неповрежденные полоски образуют систему параллельных щелей.

Принято называть *периодом решетки* или *постоянной решетки* сумму размеров прозрачной a и непрозрачной b полос: $d = a + b$ (рис. 3). В силу таутохронизма линзы фазы колебаний соответствующих лучей, например 1 и 2 (рис. 3), проходящих через ближайшие щели, в точке M_φ на экране MM будут отличаться друг от друга только на величину

$$\alpha = (2\pi/\lambda)\, d \sin\varphi \,. \qquad (5)$$

Общую напряженность в точке M_φ на экране MM, которая создается волнами, идущими в направлении φ, можно вычислить через напряженность отдельных волн $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_N$, проходящих сквозь щели

$$\vec{E}_{\varphi N} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_N \,, \qquad (6)$$

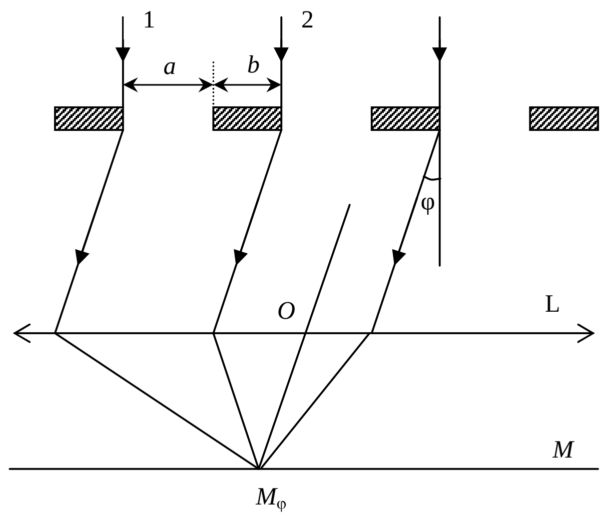


Рис. 3

где N – число щелей. Величины $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_N$ могут быть определены из выражения (2). Поскольку направления колебаний векторов $\vec{E}$ одинаковы, то векторную сумму (6) можно заменить арифметической. Учитывая, что для одинаковых щелей амплитуды векторов напряженности $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_N$ будут равны одной и той же величине $\vec{E}_{\varphi 0}$, вместо (6) можно написать:

$$E_{\varphi N} = E_{\varphi 0}\{\cos(\omega t - \alpha_0) + \cos(\omega t - \alpha_0 - \alpha) + \cos(\omega t - \alpha_0 - 2\alpha) + \ldots + \cos[\omega t - \alpha_0 - (N-1)\alpha]\}. \quad (7)$$

Удобно найти сумму, входящую в выражение (7), графическим методом, основанным на возможности представления гармонического колебания с помощью вращающегося вектора амплитуды. Для этого расположим модули векторов $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_N$, как показано на рис. 4. Направления ближайших отрезков отличаются друг от друга на угол α, определяемый соотношением (5). Этим учитывается различие в начальных фазах колебаний.

Из рис. 4 легко видеть, что амплитуда результирующего колебания будет определяться отрезком $AN = 2R\sin(N\alpha/2)$, а $E_{\varphi 0} = E_i = 2R\sin(\alpha/2)$. Поэтому

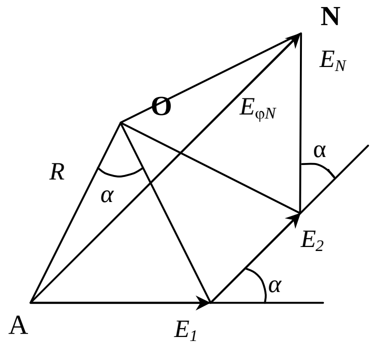


Рис. 4

$$AN = E_{\varphi 0}\frac{\sin(N\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}. \qquad (8)$$

С учетом соотношений (3) и (5) из (8) получим выражение для амплитуды напряженности электрического поля световой волны, которая после дифракции на решетке распространяется в направлении φ,

$$(E_{\varphi N})_0 = E_0\frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi)\cdot\sin(N\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi)}{\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi\cdot\sin(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi)}. \qquad (9)$$

Из полученного результата (9) можно сделать выводы:

1. Распределение интенсивности светового потока при дифракции на решетке определяется произведением двух функций

$$E_{\varphi 0}^2 = E_0^2\frac{\sin^2(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi)}{(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi)^2}. \quad \text{и} \quad \Phi_{\varphi N}^2 = \frac{\sin^2(N\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi)}{\sin^2(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi)}.$$

2. Главные минимумы определяются из условия

$$\sin(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\varphi) = 0, \text{ т.е. } a\sin\varphi = \pm m\lambda \quad (m = 1,2,\ldots),$$

которое справедливо для любого количества щелей.

3. Главные максимумы определяются из условия

$$\sin(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi) = 0, \text{ т.е. } d\sin\varphi = \pm m\lambda \quad (m = 0,1,2,\ldots). \qquad (10)$$

4. Дополнительные минимумы найдем из условия

$$\sin(N\frac{\pi d}{\lambda}\sin\varphi) = 0, \text{ т.е. } d\sin\varphi = \pm m\frac{\lambda}{N} \quad (m = 1,2,\ldots, m \neq N).$$

Легко видеть, что световой поток в результате дифракции перераспределяется в основном вблизи направлений, соответствующих главным максимумам. Распределение интенсивности света $I = E_{\varphi 0}^2\cdot\Phi_{\varphi N}^2$ приведено на рис. 2. Как уже было отмечено, функция $E_{\varphi 0}^2$ была изображена жирной линией, функция $\Phi_{\varphi N}^2$ показана штриховой линией.

Если источник света испускает волны различных длин, то в результате дифракции на экране появятся освещенные полосы, окрашенные в различные цвета (максимумы света), так как согласно (10) направление главного максимума зависит от длины волны. Другими словами, дифракционная решетка представляет собой спектральный прибор.

Соотношение (10) является основной расчетной формулой для вычисления длин световых волн при помощи дифракционной решетки и называется формулой дифракционной решетки. При известной длине световой волны эта формула дает возможность определить постоянную дифракционной решетки d. Целое число m в формуле (10) называется порядком спектра и представляет собой номер спектра по отношению к центральной нулевой полосе.

Метод, применяемый в данной работе, заключается в том, что дифракционный спектр рассматривается без помощи линзы непосредственно на экране, находящемся на большом расстоянии от решетки (рис. 5).

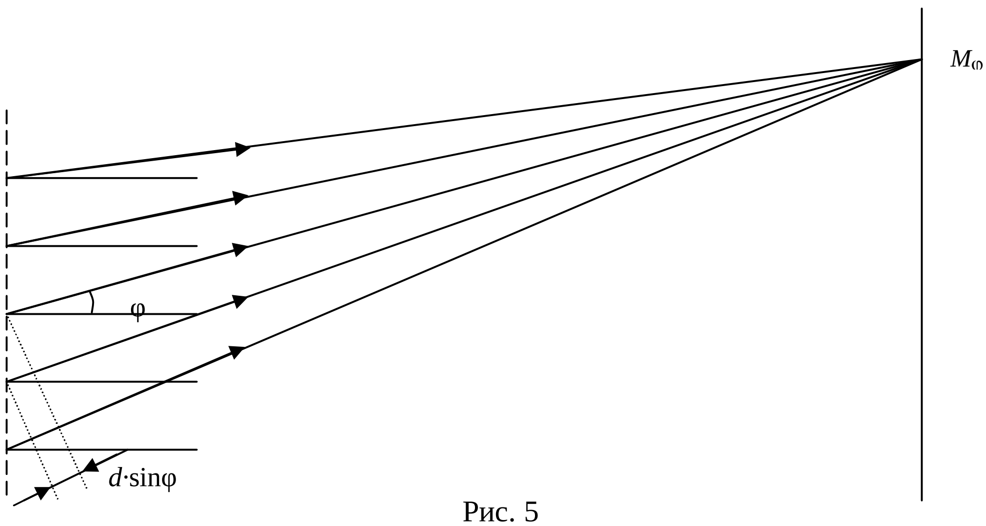


Рис. 5

При большом расстоянии между решеткой и экраном лучи, приходящие в точку M_{φ} из разных участков решетки, становятся почти параллельными, и поэтому условия дифракционных максимумов и минимумов могут реализоваться на экране без помощи собирающей линзы.

Схема установки приведена на рис. 6. RR – дифракционная решетка, на которую падает параллельный пучок лучей из осветительной системы S; l – расстояние от дифракционной решетки до экрана MM, x_m – расстояние между средними точками полос одного и того же цвета для спектров 1-го, 2-го и т.д. порядков.

Для определения длины волны λ или постоянной решетки d в формуле (10) необходимо знать $\sin \varphi$. Так как $x_m << l$, то $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = x_m / 2l$ (см. рис. 6). Представляя значения $\sin \varphi$ в (10), получим:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{x_m}{2ml}. \qquad (11)$$

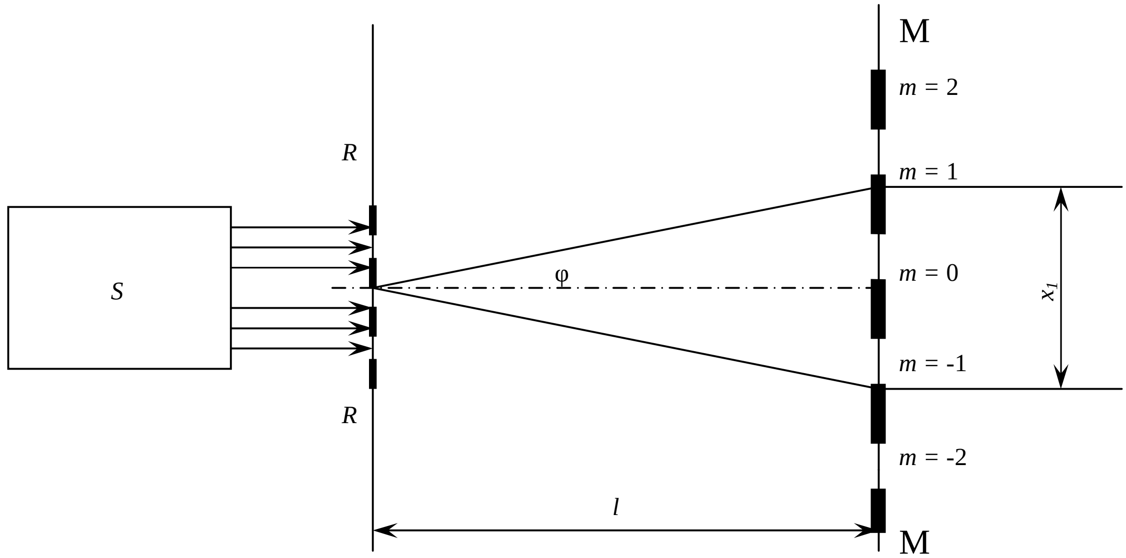


Рис. 6

Порядок выполнения работы

1. Включить осветительную систему. Если в качестве источника используется лазер, то его включает преподаватель.
2. Установить экран так, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной полосы и спектров 1-го и 2-го порядков.
3. Измерить расстояние от экрана до дифракционной решетки.
4. Измерить на экране расстояние между серединами освещенных полос определенного цвета (по указанию преподавателя) x_1 спектра 1-го порядка.
5. Аналогично определить расстояние x_2 в спектре 2-го порядка.
6. Полученные значения l и x_m подставить в формулу (11) и вычислить длину световой волны или постоянную дифракционной решетки по указанию преподавателя.
7. Вычислить погрешность.

Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света?

2. Как происходит дифракция на одной щели?

3. Как перераспределяется поток световых волн на дифракционной решетке?

4. Как изменяется дифракционная картина от многих щелей по сравнению с дифракцией от одной щели?

5. Каким образом можно определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.

Лабораторная работа № 5-7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯРИМЕТРА

Цель работы: ознакомление с вращением плоскости колебаний света в оптически активных веществах и практическим применением данного явления для определения концентрации растворов.

Оборудование: поляриметр СМ, трубки с раствором сахара, линейка.

Введение

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые вещества плоскость колебаний поворачивается, что обусловлено особым строением молекул – отсутствием в них зеркальной симметрии. Такие вещества называются *оптически активными*. Примером оптически активной среды является, например, водный раствор сахара. Оптической активностью обладают и некоторые кристаллы, например кварц. Его активность связана с асимметрией строения кристаллической решетки.

Угол φ, на который поворачивается плоскость колебаний в оптически активных растворах, прямо пропорционален толщине слоя раствора и концентрации вещества

$$\varphi = \alpha_0 LC, \qquad (1)$$

где L – толщина слоя, дм; C – концентрация, г/см^3; α_0 – коэффициент, называемый удельным вращением растворённого вещества (постоянная вращения), град·см^3/(дм·г). Постоянная вращения зависит от длины волны падающего света и температуры раствора. У сахарных растворов при T = = 20°C для желтых лучей λ = 0,589 нм, α_0 = 66,46 град·см^3/(дм·г).

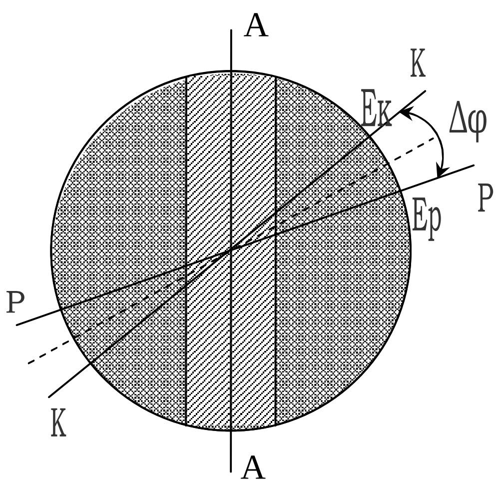
В общем случае величину α_0 надо определить экспериментально, зная величины C и L и измеряя угол поворота φ:

$$\alpha_0 = \frac{\varphi}{LC}. \qquad (2)$$

Зная величины α_0 и L, измеряя угол поворота φ для раствора с неизвестной концентрацией, можно вычислить:

$$C = \frac{\varphi}{L\alpha_0}. \qquad (3)$$

Приборы, служащие для количественного исследования вращения плоскости колебаний, называются поляриметрами. В данной работе пользуются одним из наиболее точных приборов – полутеневым поляриметром типа СМ. Световой пучок в этом приборе, пройдя поляризатор, своей средней частью проходит через кварцевую пластину и анализатор, а двумя крайними частями – только через анализатор. Кварцевая пластина поворачивает плоскость колебаний на небольшой угол $\Delta\varphi$ = 5 – 7° от плоскости пропускания поляризатора PP до плоскости KK (см. рисунок).



Интенсивности света (и, следовательно, освещённости соответствующих частей поля зрения прибора) пропорциональны квадратам проекций $E_р$ – амплитуды светового вектора, прошедшего только через поляризатор, $E_к$ – то же для светового вектора, прошедшего через кварц (средняя часть поля зрения) на плоскость пропускания анализатора AA.

Нетрудно увидеть, что здесь возможны лишь два положения анализатора, при которых проекции амплитуд векторов $E_р$ и $E_к$ равны и освещённости частей поля зрения одинаковы: 1) когда плоскость пропускания анализатора AA совпадает с биссектрисой угла $\Delta\varphi$ (все три части поля зрения одинаково ярко освещены); 2) когда плоскость анализатора *АА* перпендикулярна биссектрисе угла $\Delta\varphi$ (все три части поля зрения одинаково затемнены). Второе положение может быть зафиксировано точнее, так как чувствительность глаза намного выше при меньшей освещённости. Поэтому поляриметр следует настраивать на равное затемнение, что соответствует почти полному скрещиванию поляризатора и анализатора ($86 – 87^0$). Это положение анализатора называется нулевой точкой.

Трубка с исследуемым раствором помещается между поляризатором с кварцевой пластиной и анализатором. Если исследуемое вещество оптически активно, то оно поворачивает плоскость колебаний всех лучей, идущих и через кварц, и мимо него, на определенный угол φ. Интенсивности частей поля зрения становятся различными. Но можно снова добиться одинакового затемнения тройного поля зрения поворотом анализатора на тот же угол φ, который измеряется по шкале анализатора.

Головка анализатора состоит из неподвижного лимба, двух вращающихся с помощью фракциона нониусов и зрительной трубы (окуляра). На лимбе нанесено 360 делений. Нониусы имеют 20 делений (цена деления нониуса $0{,}05^0$). Для учета эксцентриситета круга при больших углах вращения необходимо пользоваться двумя нониусами и результатом измерения считать среднее значение показаний двух нониусов. Окуляр фокусируется перемещением муфты вдоль оси прибора. В раковинах окуляра находятся две лупы, которые дают увеличенные изображения нониусов.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что трубка с раствором сахара вынута из поляриметра. Включить осветитель в сеть переменного тока.

2. Закрыть шторку поляриметра, фокусировать зрительную трубку и вращением анализатора добиться равномерного затемнения тройного поля зрения.

3. Записать показания одного определенного нониуса. Если нуль нониуса оказался смещенным относительно нуля лимба по часовой стрелке, то поправке приписывают знак плюс, если против – минус. Если показания другого нониуса отличны от записанных, то надо снять показания обоих нониусов, а при расчете пользоваться их средним арифметическим.

4. Сделав отсчет на лимбе, повернуть анализатор в сторону и повторить пп. 2 и 3 не менее пяти раз, после чего найти среднее положение нулевой точки анализатора на лимбе.

5. Поместить в прибор трубку с раствором известной концентрации и закрыть шторку.

6. Фокусировать трубку (если фокусировка нарушена), установить равномерную затемненность поля зрения и записать показания лимба и нониуса (или двух, см. п. 3).

7. Повторить п. 6 не менее пяти раз, каждый раз отводя анализатор в сторону и приводя его обратно в положение, при котором поле зрения поляриметра будет равномерно затемнено. Взяв среднее из приведенных отсчетов, найти угол φ, на который была повернута плоскость колебаний светового вектора.

8. Из полученных результатов по формуле (2) вычислить удельное вращение сахара.

9. Выполнить пп. 5 – 7 для трубки с раствором неизвестной концентрации.

10. Из полученных результатов по формуле (3) вычислить процентное содержание сахара в растворе с неизвестной концентрацией.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется вращение плоскости колебаний светового вектора в оптически активных веществах?

2. Почему в используемом поляриметре наблюдается тройное поле зрения?

3. Какой способ уравнивания световых полей применяется в поляриметре СМ?

4. От чего зависит угол поворота плоскости колебаний светового вектора?

5. Почему не используется в данном методе установка на одинаково яркую освещенность тройного поля зрения?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 948 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990. – 478 с.

Лабораторная работа № 5-8

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: изучение явления поляризации света, проверка закона Малюса.

Оборудование: полупроводниковый лазер, блок питания, поляроид с лимбом, фотодиод, микроамперметр.

Введение

Свет представляет собой электромагнитные волны, в которых напряженность электрического поля $\vec{E}$, напряженность магнитного поля $\vec{H}$ и скорость распространения $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему (рис. 1).

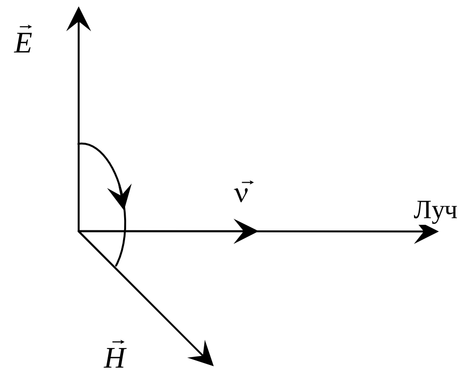


Рис. 1

Вместе с тем световые волны, излучаемые обычными источниками, не обнаруживают асимметрии относительно направления распространения. Это связано с тем, что свет слагается из множества цугов волн, испускаемых отдельными атомами. Направление колебаний векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ для каждого цуга случайное, и потому в результирующей волне колебания различных направлений представлены с равной вероятностью. Таким образом, естественный свет – есть совокупность электромагнитных волн со всеми возможными направлениями колебаний, существующими одновременно или быстро и беспорядочно сменяющими друг друга; совокупность эта статистически симметрична относительно луча, т.е. характеризуется неупорядоченностью направлений колебаний (рис. 2).

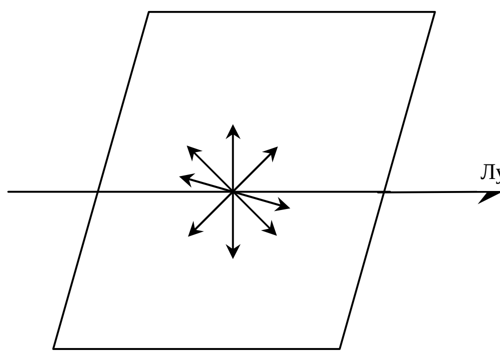


Рис. 2

Свет, в котором колебания вектора $\vec{E}$, а следовательно, и вектора $\vec{H}$ проходят только в одной неподвижной плоскости, называют плоско- (линейно) поляризованным. Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, называется *плоскостью поляризации*.

Устройство для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения называется *поляризатором.* Поляризатор свободно пропускает колебания, параллельные плоскости, называемой *плоскостью поляризатора*, и задерживает колебания, перпендикулярные этой плоскости.

Если плоскополяризованный свет с амплитудой электрического вектора $\vec{E}_0$ падает на анализатор (это поляризатор, используемый для анализа поляризованного света), то анализатор пропустит только составляющую $E_\parallel = E_0 \cos \varphi$ (рис. 3), параллельную плоскости поляризатора. Отношение интенсивности прошедшего J к интенсивности падающего J_0 света

$$\frac{J}{J_0} = \frac{E_{\text{II}}^2}{E_0^2}.$$

Напомним, что интенсивность света в данной точке пространства равна среднему по времени потоку энергии через единицу площади перпендикулярно направлению распространения волны и пропорционально квадрату амплитуды вектора E, т.е. $J \sim |\vec{E}|^2$. Учитывая, что $E_\parallel = E_0 \cos \varphi$, получаем $J = J_0 \cos^2 \varphi$.

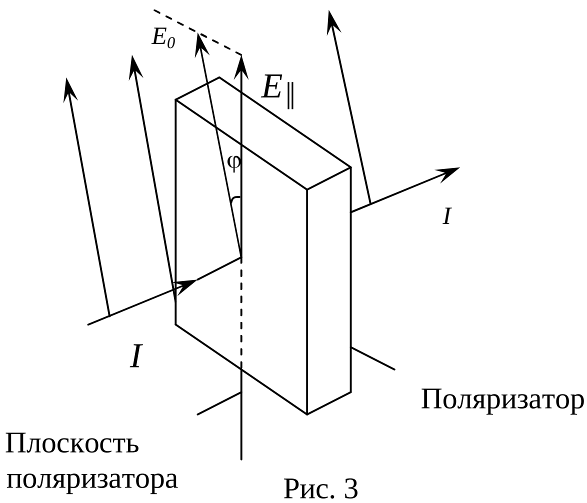


Рис. 3

Это соотношение называется *законом Малюса* (Э.Л. Малюс, французский физик). *Физический смысл этого закона состоит в том, что интенсивность прошедшего через поляризатор поляризованного света пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостями поляризации и поляризатора.*

Описание установки

Схема установки показана на рис. 4. Излучение полупроводникового лазера 3 (с блоком питания 1) проходит через поляроид 2, который может вращаться относительно лазерного луча вместе с лимбом 5, где имеется угловая шкала в градусах (примечание: поляроид, поляризационный прибор, пропускающий световые волны, поляризованные в определенной плоскости – плоскости поляризатора). Далее световой луч попадает на фотодиод 6, преобразующий световое излучение в электрический ток, измеряемый микроамперметром 7. Считая зависимость ЭДС фотодиода от интенсивности падающего на него излучения (и соответственно тока) близкой к линейной, можно считать ток микроамперметра пропорциональным интенсивности излучения $I = kJ$. В этом случае зависимость силы тока I от квадрата косинуса угла между плоскостью поляризации излучения и плоскостью поляризатора описывается зависимостью, соответствующей закону Малюса.

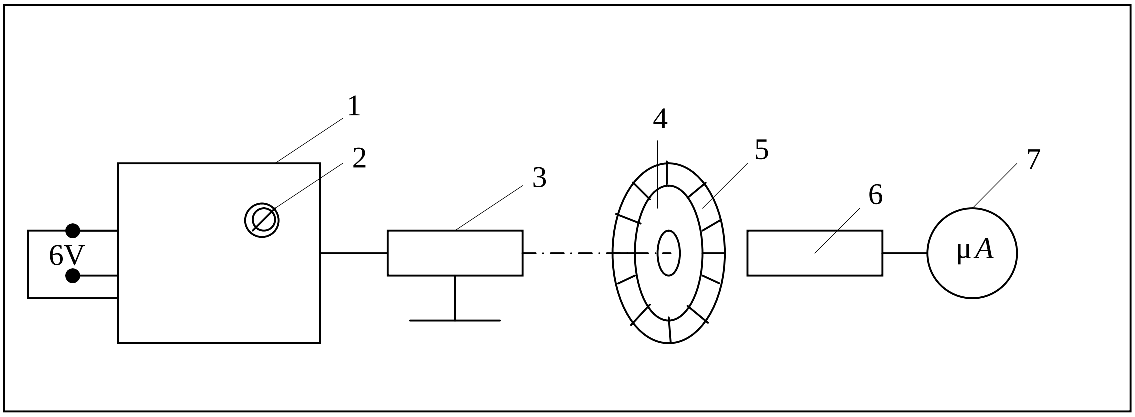


Рис. 4

Порядок выполнения работы

1. Подключить блок питания БП 1 специальной вилкой к напряжению 6В.

2. Включить БП тумблером (2).

3. Направить луч лазера (3) точно в центр лимба с поляроидом на вход фотодиода.

4. Снять показания микроамперметра в зависимости от положения флажка лимба поляроида I (φ). Для этого вращением лимба добиться максимального значения тока и считать соответствующее показание φ_0 началом отсчета углового перемещения ($\varphi_0 = 0$). Вращать лимб, и через каждое деление лимба измерять силу тока до его минимального значения 0. Занести в таблицу измеренные значения.

№ п/п	φ, град	$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$	$\cos^2 \Delta\varphi$	I, мкА	I/I_{max}
1					
2					
3					
4					

5. Построить график I ($\cos^2\Delta\varphi$) на миллиметровой бумаге. (Убедиться что при $\Delta\varphi = 90°$, $I \to \min$).

6. Найти отношение I/I_{max}, занести в таблицу и сравнить с соответствующими значениями строчки $\cos^2 \Delta\varphi$.

7. Сделать соответствующие выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
2. Что такое плоскость поляризации?
3. Какое устройство называется поляризатором?
4. Что называется плоскостью поляризатора?
5. В чем смысл закона Малюса?

Список рекомендуемой литературы

1. Трофимова Т.И. Оптика и атомная физика: законы, проблемы, задачи. – М.: Высш. шк., 1999. – 288 с.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. – М.; СПб: Физматлит, 2001. – 253 с.
3. Методические указания к лабораторным работам по физике. Геометрическая, волновая и молекулярная оптика / Под ред. А.Ф. Галкина: Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1994. – 84 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКА

Методические указания к комплексу лабораторных работ по физике для студентов-заочников (механика, молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика)

Составители
ГАЛКИН Аркадий Федорович
ДМИТРИЕВА Елена Валерьевна
КУЛИШ Александр Алексеевич и др.

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.Н. Кунин

Редактор А.П. Володина
Корректор Е.В. Афанасьева
Компьютерная верстка А.Ю. Сергеева

ЛР № 020275. Подписано в печать 14.05.04.
Формат 60х84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 6,52. Тираж 400 экз.
Заказ
Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.