МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

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

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

Кафедра Физики механики и землеустройства

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

МЕХАНИКА. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В.,
Гуриненко Л.А., Портаков А.Б.
© Азово-Черноморский
инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2026

Зерноград, 2026

Об издании - *1*, *2*
Оглавление

УДК 53.08(075)

Издается по решению Методического совета
Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде.

Рецензент:
кандидат технических наук, доцент В.А. Оберемок

Лабораторный практикум по физике. Механика. Механические колебания. Молекулярная физика и термодинамика. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н.Г. Леонтьев, А.В. Белоусов, Л.А. Гуриненко, А.Б. Портаков; Под общей редакцией Н.Г. Леонтьева. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2026, - 227 с. - Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

«Лабораторный практикум по физике. Механика. Механические колебания. Молекулярная физика и термодинамика. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика. Учебное пособие Электронное издание» является учебным пособием для выполнения лабораторных работ по физике студентами 1 курса специальностей 35.03.06, 23.03.03, 13.03.01, 13.03.02, 19.03.02, 20.03.01, 21.03.02, 35.03.04, 23.05.00, 44.03.04.

Описана теория, порядок получения и обработки экспериментальных данных при выполнении лабораторных работ.

Составители:
канд. физ.-матем. наук, доцент Н.Г. Леонтьев
канд. физ.-матем. наук, доцент А.В. Белоусов
канд. техн. наук, доцент Л.А. Гуриненко
канд. техн. наук, доцент А.Б. Портаков.

Рассмотрено и одобрено на заседании
кафедры Физики механики и землеустройства.
Протокол №8 от 06.04.2026 г.

Рекомендовано к изданию
Методическим советом Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
Протокол № 8 от 20.04.2026 г.

© Леонтьев Н.Г., Белоусов А.В., Гуриненко Л.А., Портаков А.Б.
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2026

Оглавление стр

.	Введение в практикум	6
1.	Математическая обработка результатов измерений	6
1.1.	Классификация измерений и их погрешностей	6
1.2.	Обработка результатов и определение погрешностей прямых измерений	7
1.2.1.	Среднее значение и погрешность измеряемой величины	7
1.2.2.	Статистические закономерности случайных погрешностей	7
1.2.3.	Погрешность измерительного прибора и ее учет при оценке полной погрешности результата измерений	10
1.3.	Определение погрешностей косвенных измерений	11
1.4.	Последовательность расчетов при обработке результатов измерений	12
1.4.1.	Для прямых измерений	12
1.4.2.	Для косвенных измерений	13
1.5.	Округление окончательного результата измерений. Правила приближенных вычислений	13
1.6.	Лабораторная работа № 1 "Измерение объема цилиндра"	14
2.	Электроизмерительные приборы	16
2.1.	Классификация электроизмерительных приборов	16
2.2.	Системы электроизмерительных приборов	16
2.2.1.	Приборы магнитоэлектрической системы	16
2.2.2.	Приборы электромагнитной системы	17
2.2.3.	Приборы электродинамической системы	18
2.3.	Измерения силы тока, напряжения, мощности	19
2.3.1.	Амперметры	19
2.3.2.	Вольтметры	19
2.3.3.	Ваттметры	20
2.4.	Реостаты, магазины сопротивлений	21
2.5.	Погрешности и классы точности электроизмерительных приборов	21
2.6.	Многопредельные приборы	22
2.7.	Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов	23
2.8.	Условные обозначения на схемах электрических цепей	24
3.	Требования к оформлению лабораторных работ	25
4.	Правила построения графиков	25
5.	Литература	29
6	Лаб. раб. № 11. Проверка основного закона динамики вращательного движения	29
7	Лаб. раб. № 12. Определение момента инерции шкива	33
8	Лаб. раб. № 13. Проверка закона сохранения энергии	36
9	Лаб. раб. № 14. Определение модуля Юнга	39
10	Лаб. раб. № 15. Определение модуля упругости методом изгиба	42
11	Лаб. раб. № 16. Определение ускорения свободного падения	44
12	Лаб. раб. № 17. Определение момента инерции кольца	47
13	Лаб. раб. № 18. Определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника	50
14	Лаб. раб. № 18а. Определение значений коэффициентов трения покоя и скольжения методом наклонной плоскости	53
15	Лаб. раб. № 21. Определение коэффициента жесткости пружины методом колебаний	56
16	Лаб. раб. № 22. Исследование зависимости периода колебаний физического маятника в зависимости от расстояния центр инерции – точка подвеса	59

17	Лаб. раб. № 23. Определение момента инерции тела методом колебаний	63
18	Лаб. раб. № 24. Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника	66
19	Лаб. раб. № 25. Изучение затухающих механических колебаний	69
20	Лаб. раб. № 28. Определение момента инерции твердого тела методом крутильных колебаний	72
21	Лаб. раб. № 31. Определение отношения молярных теплоемкостей идеального газа методом Клемана и Дезорма	76
22	Лаб. раб. № 32. Определение изменения энтропии в замкнутой системе	80
23	Лаб. раб. № 33. Определение вязкости воздуха и длины свободного пробега его молекул	83
24	Лаб. раб. № 34. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	87
25	Лаб. раб. № 35. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом Стокса	90
26	Лаб. раб. № 36. Определение коэффициента линейного расширения твердого тела	93
27	Лаб. раб. № 37. Проверка закона Бойля – Мариотта.	96
28	Лаб. раб № 42. ИЗмерение электроемкости конденсаторов баллистическим гальванометром	99
29	Лаб. раб № 42а. Определение емкости конденсатора и батареи конденсаторов	101
30	Лаб. раб № 43. Изучение правил Кирхгофа	104
31	Лаб. раб № 44. Определение удельного сопротивления проводника	107
32	Лаб. раб № 45. Изучение зависимости электрического сопротивления металлов от температуры	109
33	Лаб. раб № 46. Исследование характеристик вакуумного диода	111
34	Лаб. раб № 47. Изучение электропроводности контакта полупроводников р- и n- типа	113
35	Лаб. раб № 48. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника	115
36	Лаб. раб № 49. Исследование передачи мощности и КПД в цепи постоянного	
37	тока	119
38	Лаб. раб № 49а. Исследование вольт – амперной характеристики и	
39	зависимости мощности от напряжения лампы накаливания	121
40	Лаб. раб № 51. Определение горизонтальной состовляющей напряженности магнитного поля Земли	123
41	Лаб. раб № 52. Изучение эффекта Холла	125
42	Лаб. раб № 53. Исследование магнитных свойств ферромагнетика с помощью электронного осциллографа	129
43	Лаб. раб №54. Определение коэффициента самоиндукции катушки	133
44	Лаб. раб №55. Релаксационный генератор на неоновай лампе	137
45	Лаб. раб № 56. Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре и определение его добротности	140
46	Лаб. раб № 57. Изучение затухающих колебаний с помощью осциллографа	145
47	Лаб. раб № 58. Изучение стоячих электромагнитнгых волн	148
48	Лаб. раб № 61. Определение фокусного расстояния тонкой линзы	152
49	Лаб. раб № 62. Измерение показателя преломления материала линзы	155
50	Лаб. раб № 63. Определение радиуса кривизны сферической поверхности	159
51	Лаб. раб № 64. Определение угла между гранями бипризмы Френеля	162
52	Лаб. раб № 65. Определение показателя преломления стекла с помощью плоскопараллельной пластины	165
53	Лаб. раб № 66. Дифракция на одной щели	167
54	Лаб. раб № 67. Проверка закона малюса	169
55	Лаб. раб № 68. Дифракционная решетка	171

56	Лаб. раб № 69. Измерение концентрации раствора поляриметром	173
57	Лаб. раб № 71. Проверка закона обратных квадратов и определение силы света источника	176
58	Лаб. раб № 72. Определение световой отдачи лампы накаливания	179
59	Лаб. раб № 73. Измерение температуры нити накала электрической лампы с помощью оптического пирометра	182
60	Лаб. раб № 74. Изучение вольт-амперных характеристик вакуумного и газонаполненного фотоэлементов	186
61	Лаб. раб № 75. Изучение вольт-амперных характеристик солнечной батареи	190
62	Лаб. раб № 76. Градуировка спектроскопа	194
63	Лаб. раб № 77. Определение постоянной Ридберга	197
64	Лаб. раб № 78. Изучение ослабления потока β-частиц веществом	200
65	Лаб. раб № 79. Определение коэффициента поглощения прозрачных тел	203
66	Приложение. Таблицы физических величин	205
67	Приложение. Формулы для студентов	218

ВВЕДЕНИЕ В ПРАКТИКУМ

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

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

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

Измерения разделяются на прямые и косвенные.

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

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

При измерениях любой физической величины обычно приходится выполнять четыре последовательных операции:

1) проверку и установку приборов;
2) отсчет показаний приборов;
3) определение искомой величины из результатов измерений;
4) оценку погрешностей измерений.

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

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

Погрешности, в зависимости от причин, которыми они вызваны, подразделяются на СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ и СЛУЧАЙНЫЕ. Существуют еще погрешности, вызванные неисправностью прибора или небрежностью экспериментатора - ПРОМАХИ. Как правило, промахи – это большие погрешности; они легко обнаруживаются и устраняются путем повторения опытов или исключением из рассмотрения результатов, содержащих промахи.

Величина и знак СИСТЕМАТИЧЕСКИХ погрешностей не изменяются при повторении измерений в неизменных условиях.

Эти погрешности связаны с несовершенством методов измерения или неправильной установкой прибора (например, положение нуля термометра не соответствует нулевой температуре; стрелка электроизмерительного прибора при отсутствии тока не установлена на ноль и т.п.). Эти погрешности появляются также, если пренебречь воздействием некоторых постоянно действующих внешних факторов во время измерений (например, если при измерении массы не учитывать выталкивающей силы воздуха на взвешиваемое тело и разновесы; при измерениях объема жидкости или газа при отличной от нуля температуре не учитывать расширения сосуда). Систематическую погрешность мы допускаем также, округляя численное значение известной константы или табличной величины до какого-либо приближенного значения (например, полагая π=3,14 вместо π = 3,14159.).

Так как причины, вызывающие систематические погрешности, в большинстве случаев известны, то эти погрешности могут быть исключены в процессе измерения путем введения поправок.

Знак и величина СЛУЧАЙНЫХ погрешностей изменяются случайным образом при повторении измерений в неизменных условиях. Появление того или иного результата измерений искомой величины и, следовательно, соответствующей погрешности в процессе измерений является случайным событием. Они вызываются большим числом случайных факторов, действие которых при каждом измерении различно и не может быть учтено заранее. Исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно. Однако с помощью математической теории случайных явлений можно оценить значение этих погрешностей, и, увеличивая число измерений, уменьшить величину погрешностей до приемлемых значений.

1.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.2.1 СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ И ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Пусть произведено n прямых измерений некоторой физической величины, истинное значение которой обозначим через a. Обозначим результаты отдельных измерений через a_1, a_2,...a_n.

Истинное значение измеряемой величины остается неизвестным. По результатам измерений можно определить лишь ее наиболее вероятное значение, которое, как вытекает из теории вероятностей, при неограниченно большом числе измерений равно среднему арифметическому результату всех измеренных значений. В связи с этим в качестве наилучшей оценки ИСТИННОГО значения физической величины мы в дальнейшем принимаем ее СРЕДНЕЕ значение, определяемое из формулы

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

Нам необходимо определить величину разности между a_i и a_{cp}, которая характеризует абсолютную погрешность результата измерений.

АБСОЛЮТНАЯ погрешность отдельного измерения - это разность между истинным значением искомой величины и значением, полученным в результате данного измерения $\Delta a_1 = a_1 - a_{cp}$, $\Delta a_2 = a_2 - a_{cp} \ldots \Delta a_n = a_n - a_{cp}$. Абсолютные погрешности Δa_1, Δa_2, ... Δa_n могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Поэтому при достаточно большом числе измерений ($n \to \infty$) $\Delta a_{cp} = \lim \sum_{i=1}^{n} \Delta a_i = 0$ и определенная таким способом величина не может использоваться для характеристики точности измерений.

1.2.2 СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

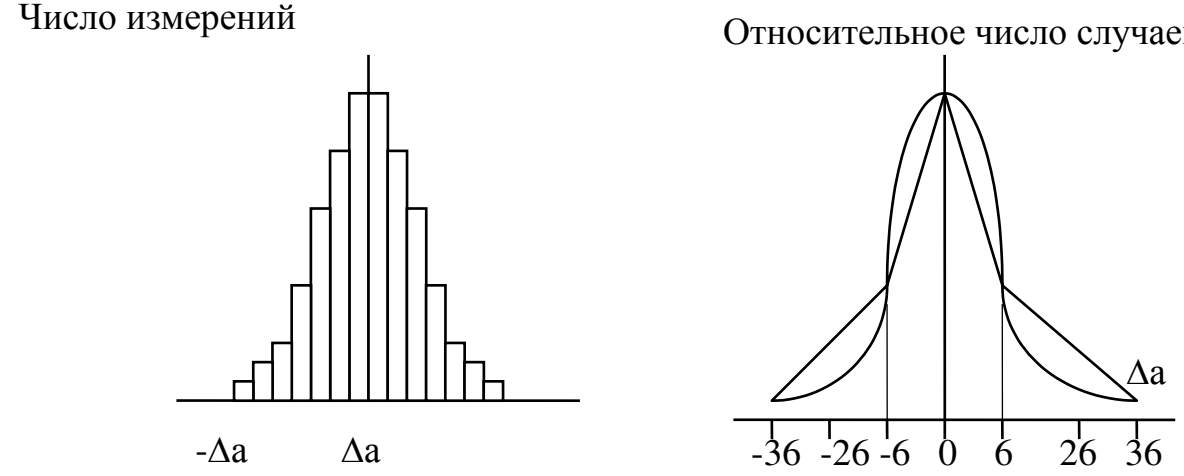
С помощью методов, основанных на теории вероятностей, можно оценить величину случайных погрешностей. Это обусловлено тем, что случайные погрешности подчиняются определенным статистическим закономерностям.

1.При большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака (т.е. погрешности как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения физической величины) встречаются одинаково часто.

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

Рассмотрим закономерности распределения случайных погрешностей отдельных измерений искомой величины. Для этого построим график распределения этих погрешностей (рис.1а). По оси абсцисс будем откладывать величину случайных погрешностей измеряемой величины. Разобьем эту ось на ряд одинаковых

интервалов. По оси ординат отложим число случаев, когда погрешность измерения попала в данный интервал. Полученный в результате опыта график распределения погрешностей будет иметь вид ступенчатой линии (гистограммы) с максимумом в области нулевой ошибки. По мере увеличения абсолютной величины погрешностей, как видно из графика, они встречаются реже. Очень большие погрешности при правильной постановке опыта крайне редки или совсем не встречаются. Число случаев, когда погрешность лежит в некотором интервале Δa, определяется площадью ступенчатой фигуры, злюченной в данном интервале.



а б

ис.1 - Гистограмма распределения погрешностей (а);
Гауссово распределение погрешностей (б)

Теперь будем увеличивать число измерений и, соответственно, уменьшать ширину интервалов разбиения по оси абсцисс. Гистограмма при этом будет стремиться к плавной кривой.

Предельная кривая распределения ошибок, полученная при неограниченно большом количестве опытов и бесконечно малых интервалах, изображена на рис.1б. Она носит название кривой Гаусса ("нормальное распределение" Гаусса). Как и для гистограммы, доля случаев, когда ошибка лежит в некотором интервале, определяется площадью под соответствующим участком кривой внутри этого интервала. Чем больше точность выполненных измерений, тем уже распределение, т.е. меньше ширина полученной кривой Гаусса.

Мерой точности измерений служит величина, называемая дисперсией. В случае большого числа измерений ($n \to \infty$) она равна среднему значению квадрата отклонения измеренных значений искомой величины от ее истинного значения

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

Корень квадратный из дисперсии называется СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ОШИБКОЙ или СТАНДАРТНЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ ОТДЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_{ср})^2} \; . \qquad /3/$$

До сих пор речь шла о среднеквадратичной ошибке отдельных измерений, рассчитываемой по формуле /3/. Однако, если мы находим искомое значение измеряемой величины как средний

результат серии измерений, то оно определяется в этом случае с более высокой точностью, чем при отдельных измерениях. Как указывалось ранее, причина улучшения результата состоит в том, что при усреднении результатов нескольких опытов положительные и отрицательные ошибки частично компенсируются.

При усреднении стандартная ошибка среднего результата измерений $\sigma_{ср}$ оказывается меньше, чем стандартная ошибка отдельных измерений σ и может быть рассчитана по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_{ср})^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2}\ . \qquad /4/$$

Стандартное отклонение $\sigma_{ср}$ имеет следующий смысл. В теории вероятностей показывается, что 68% всех случаев, т.е. с вероятностью 68%, результаты измерений отличаются от истинного среднего значения не более чем на величину $\pm\sigma_{ср}$. Графически это выражается следующим образом. Если провести на одинаковых расстояниях от начала координат две параллельные прямые, отсекающие на оси абсцисс значения ошибок, равные $\pm\sigma_{ср}$, то между ними уместится 68% всей площади, заключенной под графиком распределения ошибок (рис.2). Следовательно, в 68% случаев ошибка окажется меньше, а в 32% случаев - больше, чем стандартная ошибка $\pm\sigma_{ср}$. Иными словами, можно утверждать, что с вероятностью, равной 68%, ошибка лежит в пределах интервала ($-\sigma_{ср}$, $+\sigma_{ср}$), т.е. измеряемая величина попадает в интервал $(a_{ср} - \sigma_{ср}, a_{ср} + \sigma_{ср})$.

Если в качестве интервала ошибок взять $\pm 2\sigma_{ср}$, то вероятность того, что ошибка лежит в этом интервале, равна 95%. Для интервала $\pm 3\sigma_{ср}$ эта вероятность равна 99,7%.

Интервал $(a_{ср} - \Delta a, a_{ср} + \Delta a)$, в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью, называется ДОВЕРИТЕЛЬНЫМ ИНТЕРВАЛОМ. Вероятность того, что истинное значение измеряемой величины a_i попадает в данный доверительный интервал, называется НАДЕЖНОСТЬЮ РЕЗУЛЬТАТА α. Она выражается или в долях единицы, или в процентах.

Из сказанного выше ясно, что величина надежности α зависит от величины задаваемой погрешности Δa. Чем больше величина доверительного интервала $(a_{ср} - \Delta a, a_{ср} + \Delta a)$, т.е. чем больше задаваемая погрешность, тем с большей надежностью результаты отдельных измерений попадают в заданный интервал. Так, выбирая $\Delta a = \pm\sigma$, получаем надежность α=0,68, при $\Delta a = \pm 2\sigma$ надежность $\alpha = 0{,}95$, и при $\Delta a = \pm 3\sigma$ имеем α=0,997. Таким образом, величина абсолютной погрешности результата $\Delta a_{ср}$ может быть представлена в виде $\Delta a_{ср} = k_\alpha \sigma_{ср}$, /5/

где k_α - численный коэффициент (коэффициент Гаусса), зависящий от надежности результата: k_α=1 при α=0,68, k_α=2 при α=0,95, k_α=3 при α=0,997. Обычно берут k_α=2, т.е. в качестве абсолютной погрешности результата принято указывать величину $\Delta a_{ср} = 2\sigma$ с надежностью 95%.

Однако при ограниченном числе измерений ($n \le 20$), что имеет место в условиях реального физического эксперимента, формула /5/ не дает правильного значения стандартной ошибки, а является лишь ее приближенной оценкой, так как в этом случае распределение Гаусса не выполняется. Поэтому мы не можем воспользоваться значениями коэффициента Гаусса для оценки границ доверительного интервала.

В данном случае справедливо распределение Стьюдента, которое предложено английским математиком Госсетом, публиковавшим свои работы под псевдонимом "Стьюдент" - в переводе с английского «Студент».

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

$$\Delta a_{ср} = t_{\alpha n}\sigma_{ср}. \qquad /6/$$

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

Определив из данной таблицы коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ при заданных числе измерений n и надежности α и рассчитав по формуле /4/ среднеквадратичную ошибку, можно рассчитать величину погрешности результата $\Delta a_{ср}$ по формуле /6/ с надежностью α.

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

Однако абсолютная погрешность $\Delta a_{ср}$ не в полной мере характеризует точность измерений. Например, измерение масштабной линейкой с ценой

Таблица 1 - Коэффициенты Стьюдента

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

деления шкалы 1 см (т.е. точность измерения 0,5 см) длины стола дает достаточно хорошую точность. При измерении этой же линейкой диаметра шарика, составляющего несколько сантиметров, такая точность недостаточна.

Поэтому для оценки точности измерений вводится еще одна характеристика - ОТНОСИТЕЛЬНАЯ погрешность, равная отношению абсолютной погрешности результата измерений к измеряемой величине

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a_{ср}}{a_{ср}}. \qquad /7/$$

Обычно эта погрешность выражается в процентах

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a_{ср}}{a_{ср}}\%. \qquad /8/$$

1.2.3 ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА И ЕЕ УЧЕТ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОЛНОЙ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ

Кроме случайных погрешностей, появляющихся в процессе измерений, необходимо учитывать и абсолютную погрешность измерительного прибора. Погрешность прибора является систематической.

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

$$\delta = \frac{a_{\max}}{2n}, \qquad /9/$$

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

$$\Delta a_{cp} = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta a_{np})^2} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{cp})^2 + (k_\alpha \frac{\delta}{3})^3}, \qquad /10/$$

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

Стандартная ошибка прибора берется равной $\sigma_{np} = \delta / 3$, так как приборная погрешность обычно задается максимальным ее значением, равным утроенному значению стандартной ошибки $\delta = 3\sigma$ при надежности α=0,997.

Можно выделить три случая, соответствующие различным соотношениям между случайной среднеквадратичной погрешностью измерения σ_{cp} и погрешностью прибора δ.

1. Абсолютная погрешность прибора значительно меньше среднеквадратичной погрешности измерений: $\delta << \sigma_{cp}$. В этом случае можно не учитывать приборную погрешность δ, и полная абсолютная погрешность Δa_{cp} определяется по формуле /6/.

2. Абсолютная погрешность прибора значительно превышает среднеквадратичную погрешность измерений $\delta >> \sigma_{cp}$. Тогда полная абсолютная погрешность измерения принимается равной погрешности прибора. Многократные измерения при этом теряют смысл.

3. Абсолютная погрешность прибора и среднеквадратичная погрешность измерений - одного порядка. В этом случае необходимо учитывать обе погрешности в соответствии с формулой /10/.

Определив среднее значение измеряемой величины и ее абсолютную погрешность, результат измерений необходимо записать в виде $a = a_{cp} \pm \Delta a_{cp}$, $\varepsilon =$ %, /11/

определив при этом среднюю относительную погрешность результата по формуле /8/.

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Пусть искомая величина X определяется как некоторая функция величин $a,b,c...$, которые измеряются прямым путем. Разложив функцию $X = f(a,b,c...)$ в ряд Тейлора и сохраняя члены с нулевыми и первыми степенями погрешностей $\Delta a, \Delta b, \Delta c...$, можно показать, что

$$\Delta X = \sqrt{(\frac{\partial X}{\partial a})^2 \Delta a^2 + (\frac{\partial X}{\partial b})^2 \Delta b^2 + ...}, \qquad /12/$$

где $\frac{\partial X}{\partial a}, \frac{\partial X}{\partial b}, ...$ - частные производные функции X. Относительная погрешность по определению равна

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X}. \qquad /13/$$

Так как

$$\frac{1}{X}\frac{\partial X}{\partial a} = \frac{\partial(\ln X)}{\partial a}, \frac{1}{X}\frac{\partial X}{\partial b} = \frac{\partial(\ln X)}{\partial b}, \qquad /14/$$

то

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\partial \ln X}{\partial a})^2 \Delta a^2 + (\frac{\partial \ln X}{\partial b})^2 \Delta b^2 + ...}. \qquad /15/$$

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ:

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

$$\Delta X = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}\ ,..\frac{\Delta X}{X} = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a+b}; \qquad /16/$$

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

$$\Delta X = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}\ ,..\frac{\Delta X}{X} = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a-b}; \qquad /17/$$

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

$$\Delta X = \sqrt{b^2\Delta a^2 + a^2\Delta b^2}\ ,..\frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\Delta a}{a})^2 + (\frac{\Delta b}{b})^2}; \qquad /18/$$

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

$$\Delta X = \sqrt{\frac{1}{b^2}\Delta a^2 + \frac{1}{a^2}\Delta b^2}\ ,..\frac{\Delta X}{X} = \sqrt{(\frac{\Delta a}{a})^2 + (\frac{\Delta b}{b})^2}. \qquad /19/$$

1.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1.4.1. ДЛЯ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.Данные каждого измерения записать в таблицу результатов наблюдений.

2. Вычислить среднее значение из n измерений $a_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i$. /20/

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

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

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

6. Определить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений

$$\sigma_{ср} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2}. \qquad /21/$$

7. Задать значение надежности α (как указано выше, обычно выбираем α=0,95).

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

9. Найти границы доверительного интервала, т.е. погрешность результата измерений:

$$\Delta a_{ср} = t_{\alpha n}\sigma_{ср}. \qquad /22/$$

10. Если величина случайной погрешности $\Delta a_{ср}$ окажется сравнимой с погрешностью прибора, то в качестве границы доверительного интервала взять величину

$$\Delta a_{ср} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{ср})^2 + (k_\alpha\frac{\delta}{3})^3}\ , \qquad /23/$$

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

11. Записать окончательный результат в виде

$$a = a_{ср} \pm \Delta a_{ср},\ \varepsilon = \quad \%. \qquad /24/$$

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

1.4.2. ДЛЯ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

2. По средним значениям измеренных величин рассчитать искомую величину.

3. Найти выражения для абсолютной ΔX и относительной ε_x погрешностей искомой косвенно определяемой величины X по формулам /12/,/15/, исходя из формулы для расчета искомой величины X и с учетом формул /16/,/17/,/18/, /19/ и т.п. Произвести вычисления ΔX и ε_x по полученным формулам.

В большинстве случаев удобно сначала исходную формулу прологарифмировать и определить относительную погрешность искомой величины по формуле /15/. Затем, зная относительную погрешность, определить абсолютную погрешность по формуле $\Delta X = \varepsilon_x X_{ср}$. /25/

Если косвенные измерения одной и той же величины производятся многократно и для каждого измерения рассчитывается значение искомой величины, то среднее значение результата серии косвенных измерений и его погрешности могут быть рассчитаны по формулам для расчетов погрешностей при прямых измерениях в их варианте для случая малой величины погрешности прибора (формулы /6/, /8/).

1.5. ОКРУГЛЕНИЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ. ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Все цифры, приводимые в записи результата эксперимента, должны быть обоснованы, поскольку количество указанных в числе значащих разрядов связано с точностью определения данного числа. Принято считать, что если в числе указано некоторое количество разрядов (значащих цифр), то за абсолютную погрешность определения этого числа принимается половина значащего разряда после последнего указанного. Например: Указано число 3,14. Тогда за абсолютную погрешность определения этого числа принимается величина 0,005. Если берется приближенное значение некоторой табличной величины, взятое из справочника, где оно округлено до необходимого количества значащих цифр, и отброшенная при округлении цифра не известна, то за абсолютную погрешность берется половина значащего разряда после последнего указанного. Например, в справочнике дана плотность некоторого вещества ρ=0,96*10^3 кг/м^3. Тогда $\Delta\rho$=0,005*10^3 кг/м^3. Если отброшенная значащая цифра известна, то в качестве погрешности берется ее значение. Например, если π = 3,14, то $\Delta\pi$ = 0,002.

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

Проводя вычисления при обработке результатов измерений (проделав арифметические действия над числами) с использованием вычислительной техники, мы, как правило, получаем результат с излишним количеством значащих цифр. Высокая точность вычислений не может привести к увеличению точности результата измерений.

Поэтому при выполнении измерений, заполнении таблиц результатов наблюдений и указании результатов вычислений следует руководствоваться следующими правилами.

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

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

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

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

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

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

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

Примеры:

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

Напомним правила округления и определения числа значащих цифр.

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

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

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

1.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМА ЦИЛИНДРА

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

Приборы и материалы: штангенциркуль, микрометр, цилиндр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Объем цилиндра рассчитывается по формуле $$V = \frac{\pi D^2 h}{4}, \qquad /26/$$

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

Для вывода формулы относительной погрешности ε_v прологарифмируем выражение /26/

$$\ln V = \ln\pi + 2\ln D + \ln h - \ln 4. \qquad /27/$$

Найдем частные производные:

$$\frac{\partial(\ln V)}{\partial\pi} = \frac{1}{\pi}, \quad \frac{\partial(\ln V)}{\partial D} = 2\frac{1}{D}, \quad \frac{\partial(\ln V)}{\partial h} = \frac{1}{h}. \qquad /28/$$

Здесь величину π считаем приближенным числом.

Согласно формуле /15/ получим $$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{(\frac{\Delta\pi}{\pi})^2 + 4(\frac{\Delta D}{D})^2 + (\frac{\Delta h}{h})^2}. \qquad /29/$$

Формулу для определения абсолютной погрешности получим по формуле /25/:

$$\Delta V = \varepsilon_x * V_{ср}. \qquad /30/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Результаты каждого измерения записать в таблицу результатов наблюдений (таблица 2).
2. Вычислить средние значения D и h из n измерений по формуле /20/:

$$a_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i \,. \qquad /31/$$

Таблица 2 ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

3. Проверить, нет ли промахов в серии измерений, т.е. значений, резко отличающихся от остальных измерений. Исключить эти результаты.
4. Найти погрешности отдельных измерений D и h по формуле $\Delta a_i = a_i - a_{ср}$ и занести в таблицу 2.
5. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений D и h по формуле $(\Delta a_i)^2$ и занести в таблицу 2.
6. Определить среднеквадратичные погрешности измерения D и h по формуле /21/:

$$\sigma_{ср} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i)^2} \,. \qquad /32/$$

7. Выяснить у преподавателя значение надежности α (обычно выбираем $\alpha = 0{,}95$).
8. Определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для заданной преподавателем надежности α и числа произведенных измерений n (из таблицы 1).
9. Найти границы доверительных интервалов D и h по формуле /22/.

$$\Delta a_{ср} = t_{\alpha n}\sigma_{ср}. \qquad /33/$$

10. Вычислить величины случайных погрешностей D и h по формуле /23/:

$$\Delta a_{ср} = \sqrt{(t_{\alpha,n}\sigma_{ср})^2 + (k_\alpha \frac{\delta}{3})^3} \,. \qquad /34/$$

11. Записать полученные для D и h результаты в виде

$$a = a_{ср} \pm \Delta a_{ср},\ \varepsilon = \quad \%. \qquad /35/$$

12. Вычислить значения $V, \varepsilon_V, \Delta V$ по формулам /26/,/29/,/30/ и записать окончательные результаты в виде $V = V_{ср} \pm \Delta V_{ср},\ \varepsilon_V = \quad \%$.

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

2. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

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

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы классифицируют по следующим признакам:

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

Классификация основных типов электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины приведена в таблице 3.

Таблица 3

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

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

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

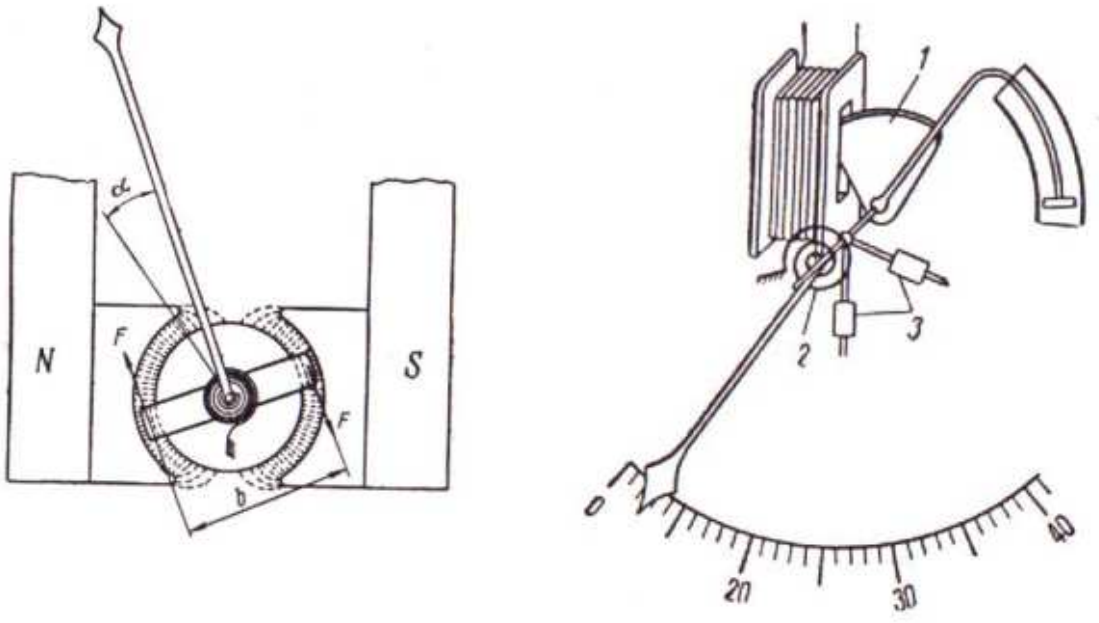
2.2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

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

2.2.1. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии между магнитным полем постоянного магнита и легкой подвижной катушки (рамки), по которой проходит измеряемый ток (рис.2а).

При наличии в подвижной рамке электрического тока на нее со стороны магнитного поля действует вращающий момент силы, пропорциональный силе тока. В результате рамка со стрелкой поворачивается на некоторый угол до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом



а б

Рис.2. Приборы магнитоэлектрической (а) и электромагнитной (б) систем

упругой силы, создаваемым пружинами. Так как индукция поля во всех точках зазора постоянного магнита одинакова и направлена радиально, а противодействующий момент силы пружин пропорционален углу поворота подвижной части прибора (рамки со стрелкой), то отклонение стрелки пропорционально измеряемому току.

Поэтому шкала магнитоэлектрических приборов равномерная, что является одним из достоинств приборов этой системы. К достоинствам приборов магнитоэлектрической системы можно отнести и следующие: а) высокие точность (до 0,1%) и чувствительность (до 10^{-5}А/дел); б) малое влияние внешних магнитных полей и температуры; в) малую потребляемую мощность. Недостатками являются: а) пригодность только для постоянного тока; б) чувствительность к электрическим перегрузкам и механическим воздействиям; в) сложность конструкции и высокая стоимость.

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

На шкале прибора эта система обозначается знаком



Кроме того, на шкале значком ⎓ указывается то, что прибор может измерять только постоянный ток.

2.2.2. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

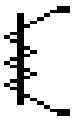
Принцип их работы основан на взаимодействии магнитного поля, образуемого измеряемым током при прохождении его по обмотке неподвижной рабочей катушки с щелевым зазором, и подвижного сердечника, сделанного в виде диска специальной формы из мягкого ферромагнитного сплава, укрепленного эксцентрично на одной оси со стрелкой. При пропускании тока через катушку диск втягивается в нее и стрелка отклоняется. Противодействующий момент силы создается пружиной. На одной оси со стрелкой также закреплен воздушный успокоитель (демпфер), гасящий колебания стрелки (рис.2б). Так как

момент силы взаимодействия между магнитным полем и ферромагнитным диском приблизительно пропорционален квадрату силы тока, а противодействующий момент силы пропорционален углу поворота, то шкала электромагнитных приборов неравномерная.

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

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

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

Приборы электромагнитной системы применяются в качестве амперметров и вольтметров. На шкале прибора эта система обозначается знаком 
Кроме того, на шкале значком ≂ указывается то, что прибор может измерять постоянный и переменный ток.

2.2.3. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по двум катушкам. Одна из них неподвижна, а вторая может поворачиваться вокруг оси внутри первой. В обоих случаях вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален квадрату силы тока, протекающего через прибор, и $\cos\varphi$ между фазами переменных тока и напряжения, рис.3. Поэтому приборы электродинамической системы имеют неравномерную шкалу.

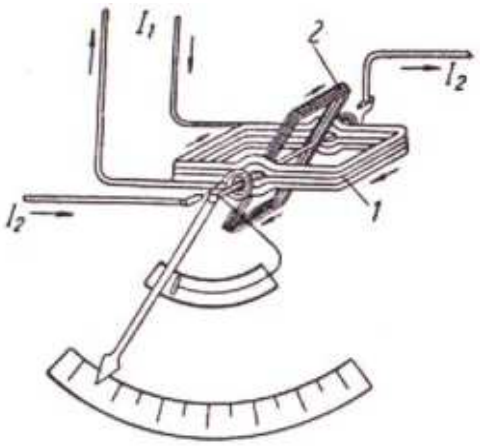


Рис.3 - Прибор электродинамической системы

При одновременном изменении направления тока в обеих катушках направление вращающего момента не изменяется. Поэтому электродинамические приборы можно применять для измерений в цепях и постоянного, и переменного тока.

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

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

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

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

2.3. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, МОЩНОСТИ

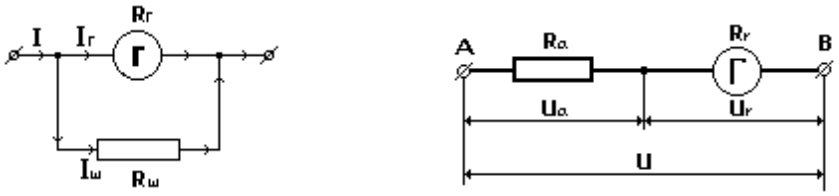
Электроизмерительные приборы рассмотренных систем, без каких-либо дополнительных подключений, как правило, имеют малый предел измерения, т.е. могут служить в качестве гальванометров. Для расширения предела измерения прибора как амперметра к нему нужно подключить шунт, а в качестве вольтметра - добавочное сопротивление.

2.3.1. АМПЕРМЕТРЫ

Приборы, предназначенные для измерения силы тока - амперметры - включаются последовательно с измеряемым участком цепи. В этом случае сила тока, проходящего через прибор и измеряемый участок, одинакова. Однако включение амперметра последовательно с измеряемым участком увеличивает сопротивление участка, что приводит к уменьшению силы тока на участке после подключения амперметра по сравнению с истинным. Для того чтобы включение амперметра не изменяло заметно тока в цепи, его внутреннее сопротивление должно быть достаточно малым по сравнению с сопротивлением участка.

Для расширения предела измерений амперметра параллельно его рамке включают дополнительное сопротивление - так называемый шунт, рис.4а.

Через шунт ответвляется часть тока, идущего по цепи, причем $I = k * I_Г$, где $I_Г$ - максимальный ток, который может измерять гальванометр, т.е. предел измерения гальванометра; k - коэффициент расширения шкалы, который показывает, во сколько раз увеличивается предел измерения гальванометра с подключенным шунтом: $$k = \frac{I}{I_Г}. \qquad /36/$$



а б

Рис.4 - Расширение пределов амперметра (а) и вольтметра (б)

Рассчитаем величину шунта, необходимого для расширения предела измерения прибора в k раз, если известно сопротивление его рамки $R_Г$. На рамке прибора и шунте падения напряжения одинаковы: $$I_Г R_Г = I_Ш R_Ш. \qquad /37$$

Откуда $$I_Ш = I_Г \frac{R_Г}{R_Ш}. \qquad /38/$$

По первому правилу Кирхгофа $$I = I_Ш + I_Г = I_Г \frac{R_Г}{R_Ш} + I_Г. \qquad /39/$$

Отсюда получим $$R_Ш = \frac{R_Г}{\frac{I}{I_Г} - 1} = \frac{R_Г}{k - 1}. \qquad /40/$$

Следовательно, чтобы увеличить предел измерения амперметра в k раз, необходимо подключить шунт, сопротивление которого в $(k-1)$ раз меньше сопротивления прибора.

2.3.2. ВОЛЬТМЕТРЫ

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

Для расширения предела измерения вольтметра последовательно с его рамкой подключают добавочное сопротивление (рис.4б). При этом на приборе будет падать только часть $(U_Г)$ от полного напряжения U , приложенного между точками А и В.

Используя гальванометр с добавочным сопротивлением, мы фактически имеем вольтметр с пределом измерения $U = kU_Г$, где $k = \dfrac{U}{U_Г}$ - коэффициент расширения шкалы.

Рассчитаем величину добавочного сопротивления $R_Д$ через известное сопротивление рамки прибора $R_Г$. По рамке и добавочному сопротивлению течет один и тот же ток

$$I = \frac{U_Г}{R_Г} = \frac{U_Д}{R_Д}. \qquad /41/$$

Откуда

$$U_Д = U_Г \frac{R_Д}{R_Г}. \qquad /42/$$

Кроме того, при последовательном соединении

$$U = U_Д + U_Г = U_Г \frac{R_Д}{R_Г} + U_Г. \qquad /43/$$

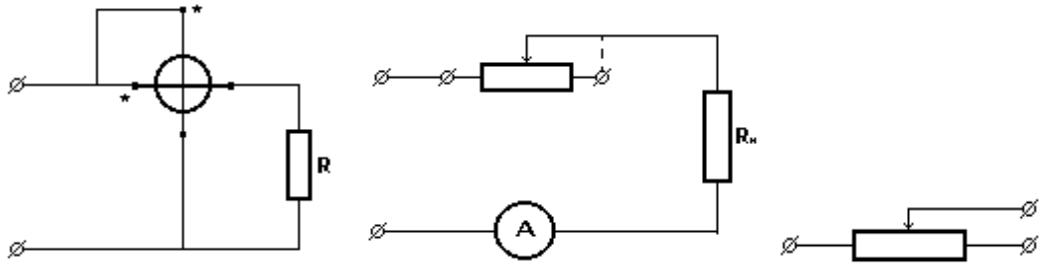
Тогда

$$R_Д = R_Г \frac{U - U_Г}{U_Г} = R_Г(\frac{U}{U_Г} - 1) = R_Г(k-1). \qquad /44/$$

Таким образом, чтобы увеличить предел измерения вольтметра в k раз, необходимо последовательно с прибором подключить добавочное сопротивление в $(k-1)$ раз больше собственного сопротивления прибора. Стандартные приборы уже снабжены размещенными внутри корпуса добавочными сопротивлениями или шунтами.

2.3.3. ВАТТМЕТРЫ

Измерение электрической мощности, потребляемой на участке цепи, можно производить с помощью амперметра и вольтметра $P = U * I$. Непосредственный отсчет мощности можно осуществить с помощью приборов электродинамической системы, имеющих две катушки. Одна из них, неподвижная, включается в цепь последовательно (токовая катушка), а вторая - подвижная - параллельно (катушка напряжения). Отклонение стрелки прибора в этом случае пропорционально как силе тока, протекающего по неподвижной катушке, т.е. силе тока на нагрузке, так и силе тока в подвижной рамке, которая пропорциональна напряжению на нагрузке. Показания прибора пропорциональны произведению силы тока на падение на-



а б в

Рис.5 - Подключение прибора электродинамической системы как ваттметра (а). Подключение реостата как дополнительного сопротивления (б) и как делителя напряжения (в)

пряжения, т.е. мощности, и такие приборы могут служить в качестве ваттметров. Ваттметр имеет четыре клеммы и подключается согласно схеме на рис.5а.

2.4. РЕОСТАТЫ, МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

2.4.1. РЕОСТАТЫ

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

2.4.1.1. Последовательное включение реостата (для регулирования силы тока)

Реостат включается в цепь последовательно: к одной из нижних клемм и клемме ползунка (рис.5б). Вторая нижняя клемма остается неподключенной. При перемещении ползунка меняется сопротивление и ток в цепи. Перед подключением источника тока ползунок должен быть передвинут к свободной нижней клемме. В этом случае ток будет минимальным. Сопротивление реостата подбирают как минимум на порядок большим, чем сопротивление остальной цепи. Недостаток ограничителя тока в том, что с его помощью нельзя уменьшить ток до нуля.

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

В этом случае используются все три клеммы реостата (рис.5в). Полное сопротивление реостата подключается нижними клеммами к источнику напряжения. Если необходимо подать на потребитель не все напряжение источника U_o, а его часть, то рабочий участок цепи подключают между одной из нижних клемм и ползунком. При увеличении сопротивления той части реостата, к которой подключена рабочая цепь, увеличивается напряжение U, подаваемое на нагрузку. Перед подключением источника энергии ползунок должен быть передвинут к той нижней клемме, от которой отходят два провода (на источник тока и на нагрузку). В этом случае U=0. Сопротивление реостата выбирают на порядок меньше, чем сопротивление остальной цепи. В этом случае напряжение на ней будет меняться примерно пропорционально смещению ползунка от крайнего положения.

2.4.2. МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для подбора различных сопротивлений в широком интервале с высокой точностью применяются магазины сопротивлений. Наиболее распространены рычажные магазины сопротивлений. В них имеются последовательно соединенные группы катушек, состоящие из десяти катушек одинакового сопротивления (0.01, 0.1, 1.0, 10, 100 Ом и т.д.). От каждой катушки делается отдельный отвод. Поворачивая ручку управления, можно набрать любое значение сопротивления.

2.5. ПОГРЕШНОСТИ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

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

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

Разность между показанием рабочего прибора a и истинным значением измеренной величины $a_Д$ называется АБСОЛЮТНОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ измерения: $\Delta a = a - a_Д$.

Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком, называется ПОПРАВКОЙ. Поправка есть величина, которую необходимо алгебраически прибавить к показанию прибора, чтобы получить истинное значение измеряемой величины. Величина абсолютной погрешности не дает

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

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

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

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{|\Delta a|_{MIN}}{a_{MAX}} 100\%. \qquad /45/$$

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

$$\varepsilon_{ПРИВ} = \frac{\delta / 2}{a_{MAX}} = \frac{a_{MAX} / 2N}{a_{MAX}} = \frac{1}{2N}, \qquad /46/$$

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

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

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

$$\Delta a_{MIN} = \frac{\varepsilon_{ПРИВ.СТ} * a_{MAX}}{100\%}. \qquad /47/$$

Средняя абсолютная погрешность, полученная в эксперименте, будет всегда больше или равна минимальной средней абсолютной погрешности (см. раздел 1.) - $\Delta a_{CP} \geq \Delta a_{MIN}$.

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

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

2.6. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

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

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

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

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

При пользовании многопредельными приборами необходимо руководствоваться следующими правилами:

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

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

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

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

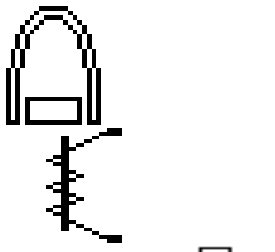
Цена деления определяется как отношение предела измерения, на котором работает прибор, к числу делений его шкалы.

2.7. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

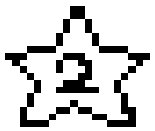
Технические характеристики электроизмерительного прибора обозначаются условными знаками обычно на лицевой стороне его шкалы. На шкале или над клеммами прибора указывается, для измерения каких величин он предназначен.

Обязательно указываются следующие технические характеристики, приведенные в таблице 4.

1.2.4 Таблица 4

Техническая характеристика	Условное обозначение
Система прибора: магнитоэлектрическая	
электромагнитная	
электродинамическая	
Класс точности прибора	0.2, 1.0,....
Прибор предназначен для включения в цепь:	
- постоянного тока	
- переменного тока	
- постоянного и переменного тока	
Рабочее положение прибора вертикальное	
Рабочее положение прибора горизонтальное	

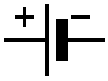
Измерительный механизм изолирован от корпуса,
и проведено испытание при напряжении 2 кВ.



2.8. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование — Обозначение

1. Гальванический элемент

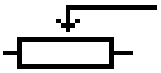


Примечание: знаки полярности можно не ставить.

2. Постоянный резистор (сопротивление постоянное)



3. Реостат (сопротивление переменное)



(при последовательном включении реостата для регулирования тока один отвод можно не показывать)



Допускаемое обозначение переменного сопротивления (реостата), включаемого в цепь последовательно

4. Конденсатор постоянной емкости



Конденсатор переменной емкости



5. Катушка индуктивности (дроссель) без сердечника



Катушка индуктивности (дроссель) с ферромагнитным сердечником



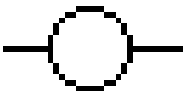
6. Трансформатор с сердечником



Трансформатор без сердечника



7. Прибор измерительный

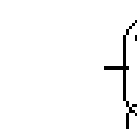


8. Диод вакуумный прямого накала

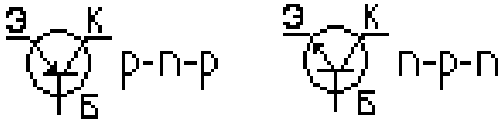


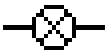
косвенного накала

9. Триод вакуумный

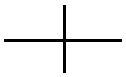


10. Диод полупроводниковый

11. Транзистор 

12. Лампа накаливания 

13. Лампа сигнальная 

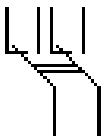
14. Пересечение проводов, электрически не соединенных 

15. Электрические провода с соединением 

16. Заземление 

17. Соединение с корпусом 

18. Выключатель однополюсный (ключ) 

19. Выключатель двойной (на два положения) 

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

В журнале наблюдений приводятся следующие сведения:

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

В журнале отчетов приводятся следующие сведения:

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

Каждая лабораторная работа визируется преподавателем после выполнения (снятия данных) подписью в журнале наблюдений и после оформления - подписью в журнале отчетов. Отчеты без подписи в журнале наблюдений не принимаются.

Журнал наблюдений и журнал отчетов студент сдает преподавателю в конце семестра.

4. ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

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

Графики позволяют:

1. Глубже понять и наглядно представить функциональную связь физических величин (функции и аргумента).

2. Производить фактическое усреднение значений функции.

3. Производить вычисление значений функции при различных значениях аргумента.

4. Производить вычисление значений тангенса угла наклона графика к оси абсцисс (скорости изменения функции при изменении аргумента).

5. Производить вычисление значений отрезков, отсекаемых на осях координат (значения функции при нулевом значении аргумента и значения аргумента при нулевом значении функции, имеющих самостоятельный физический смысл).

6. Производить вычисление площади под графиком функции и др.

Графики выполняются после получения экспериментальных данных с соблюдением следующих правил:

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

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

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

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

5. Точка пересечения осей координат выбирается с отступом 1-1.5 см вверх и вправо от левого нижнего угла листа (рис.6).

При наличии положительной и отрицательной ветвей графика точку пересечения осей координат удобно смещать к центру листа. При этом на графике будут построены обе ветви одновременно (рис.7).

6. Не требуется, чтобы точка пересечения осей координат обязательно совпадала с началом координат. Целесообразно, чтобы точка пересечения осей координат соответствовала или была близка к минимальным значениям аргумента и функции (рис.8,9).

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

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

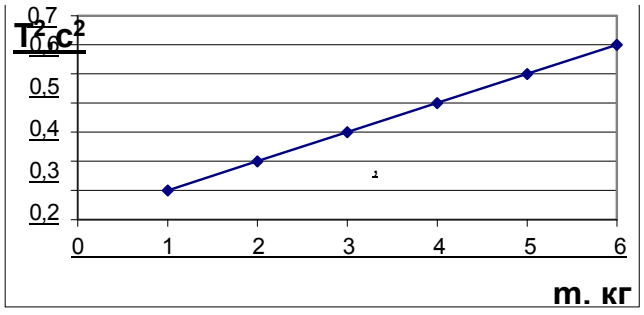


Рис.6 - График зависимости квадрата периода T^2 пружинного маятника от массы тела m

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

10. Буквенное обозначение функции и аргумента и через запятую - кратный множитель и обозначение единиц измерения наносятся за пределами квадранта, в котором находится график, рядом со стрелками. Обозначение аргумента и функции допускается писать словами (рис.8).

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

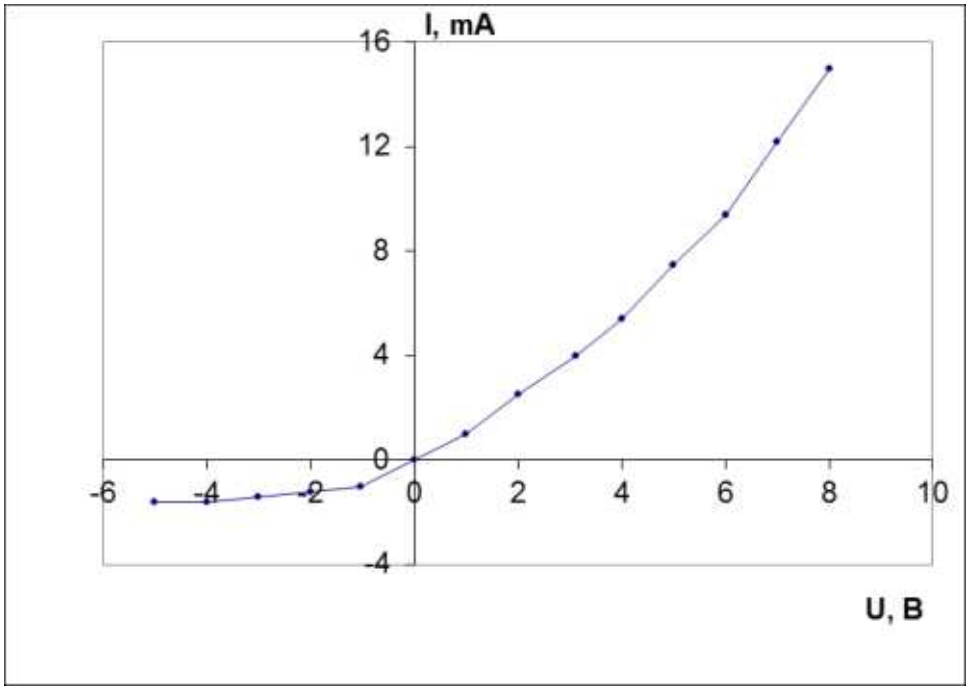


Рис.7 - Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

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

13. На одном листе можно (и целесообразно) строить несколько вариантов одной функциональной зависимости, соответствующих различным случаям. Тогда точки на различных графиках обозначают разными символами (*, +, о и т.д.) или разным цветом (рис.9). Обозначения точек, соответствующих каждому из случаев, указывают на свободном поле графика.

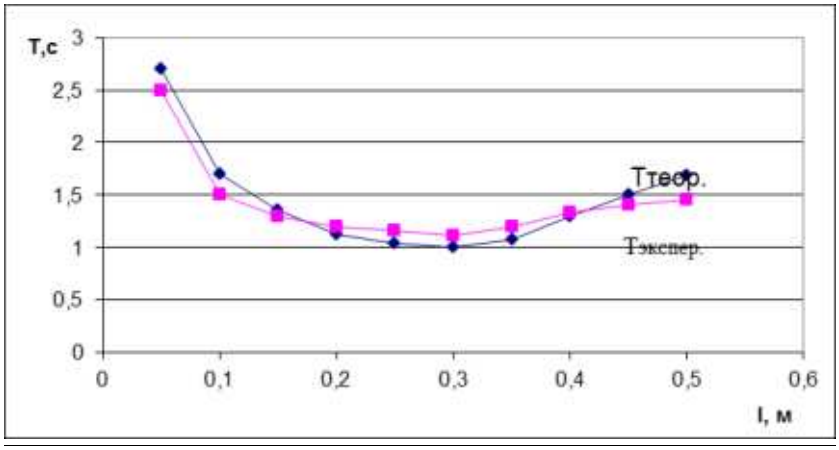


Рис.8. График зависимости периода колебаний Т физического маятника от расстояния "центр масс - точка подвеса"

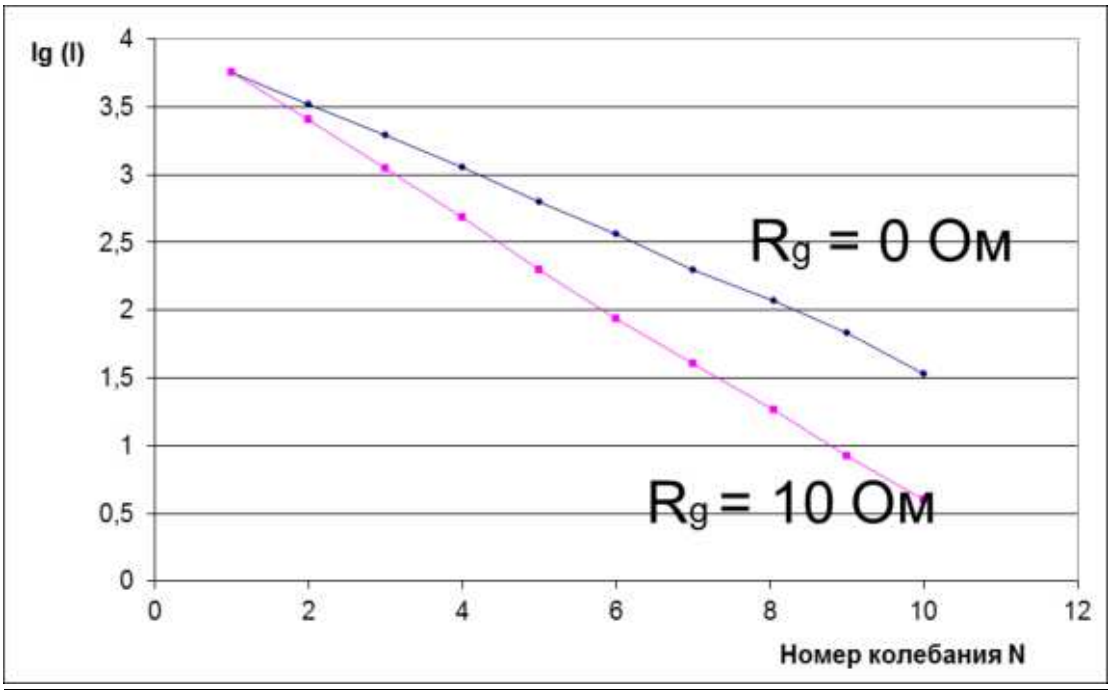


Рис.9. График зависимости натурального логарифма амплитуды затухающих колебаний 1пI от номера колебания N

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

16. После нанесения всех экспериментальных точек график аппроксимируется прямой или, как правило, гладкой кривой. При этом в первом приближении количество точек с одной стороны линии примерно равно их количеству с другой стороны. Значительное удаление одной из точек от графика либо указывает на неточность измерений, либо должно быть подтверждено проверкой и объяснено.

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

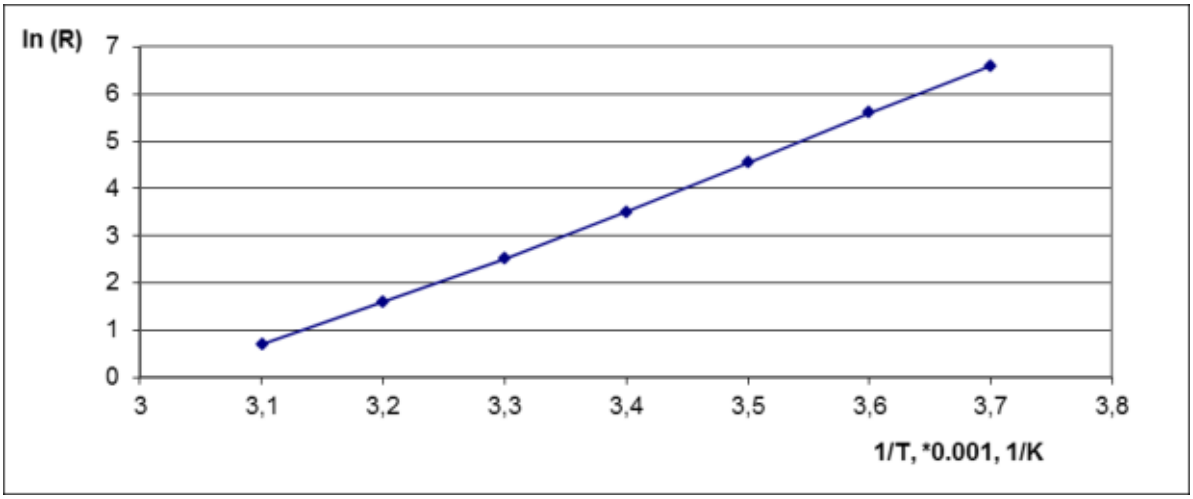


Рис. 10 - График зависимости натурального логарифма значения сопротивления полупроводника lnR от величины обратной абсолютной температуры 1/T.

17. Линия графика проводится сплошной линией.

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

19. В подрисуночной подписи дается нумерация графика и поясняется изображенная функциональная зависимость, а если их несколько - условия, при которых они получены (рис.9).

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

21. При вычислении физической величины, равной тангенсу угла наклона прямолинейного участка графика, экспериментальные точки, координаты которых подставляются в рабочую формулу, выбираются возможно более удаленными друг от друга (рис.6).

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Касандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений /О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 134 с.

2. Руководство к лабораторным работам по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 535 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11
ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

где J - момент инерции тела относительно оси вращения.

Общий вид лабораторной установки изображен схематически на рис.11.1. На вертикальной колонне (16), установленной на основании, закреплены два кронштейна: нижний неподвижный (18) и верхний подвижный (17). Основание снабжено регулировочными винтами (7), обеспечивающими вертикальную установку колонны. На верхнем кронштейне (17) закреплен шкив (10). Через шкив переброшена нить (7), один конец которой прикреплен к двухступенчатому шкиву маятника (12). На втором конце нити закреплен груз (13). На обратной стороне маятника закреплен тормозной электромагнит, который удерживает маятник и грузы в состоянии покоя.

Подвижный кронштейн (17) можно перемещать вдоль колонны и фиксировать его в любом положении, задавая таким образом по миллиметровой шкале (10) высоту h падения груза.

На подвижном кронштейне (17) закреплен фотоэлектрический датчик. На неподвижном кронштейне (18) закреплен фотоэлектрический датчик, вырабатывающий импульс конца измерения времени и включающий тормозной электромагнит.

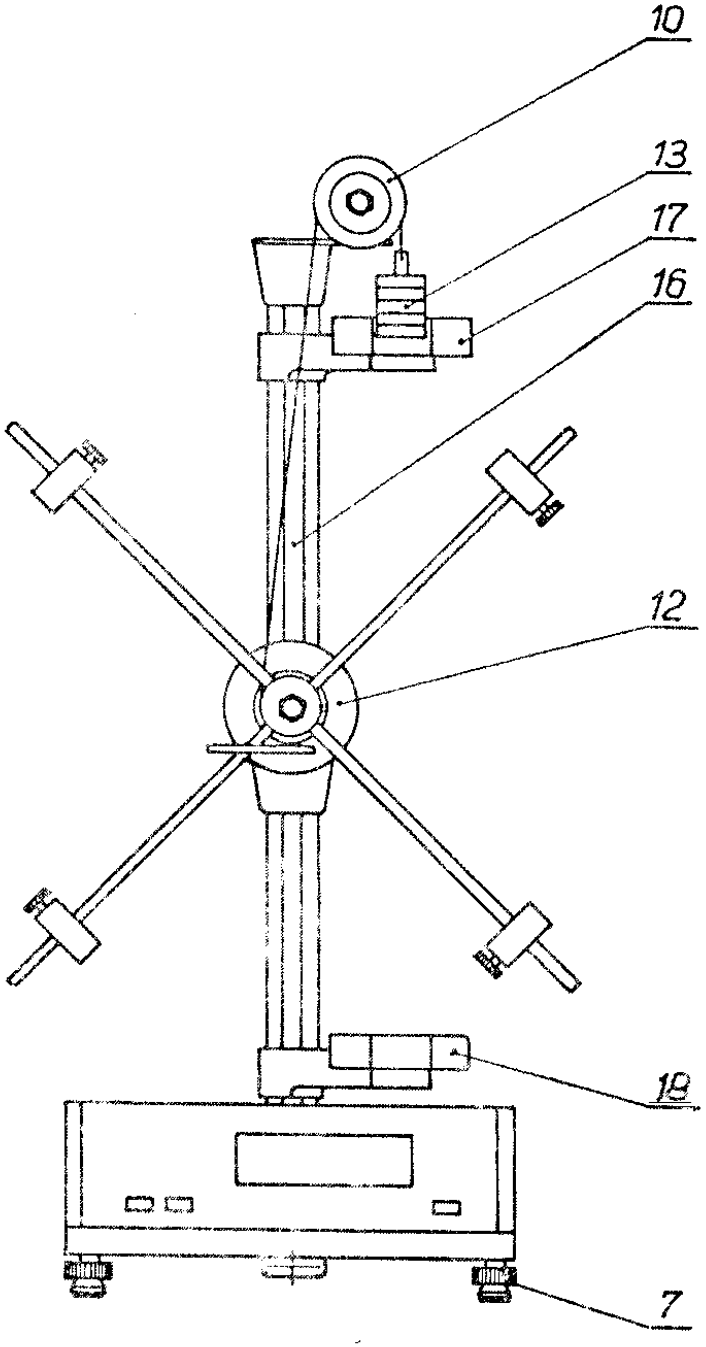


Рис.11.1

К кронштейну (18) прикреплена платформа, ограничивающая движение груза. На основании (7) установлен блок управления и измерения времени. Маятник состоит из четырех стержней и двух шкивов различного радиуса, укрепленных на одной горизонтальной оси. По стержням могут перемещаться и закрепляться в нужном положении четыре (по одному на каждом стержне) груза одинаковой массы m_1. При помощи грузов различной массы *m* маятник может приводиться во вращение.

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

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

где T - сила натяжения нити, а r - радиус шкива, и момента сил трения M_{TP}, направленного противоположно. Тогда основной закон динамики вращательного движения /1/ принимает вид:

$$\varepsilon = \frac{M_T - M_{Tm}}{J}. \qquad /3/$$

Сила натяжения нити определяется из второго закона динамики поступательного движения:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{mg - T}{m},$$

/4/

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

Ускорение груза a находится из кинематического уравнения зависимости пути от времени для равноускоренного движения и равно: $a = \frac{2h}{t^2},$ /6/

где *h* - расстояние, пройденное грузом из состояния покоя до удара об ограничивающую платформу за время *t*. Угловое ускорение шкива определяется из соотношения $\varepsilon = \frac{a}{r}.$ /7/

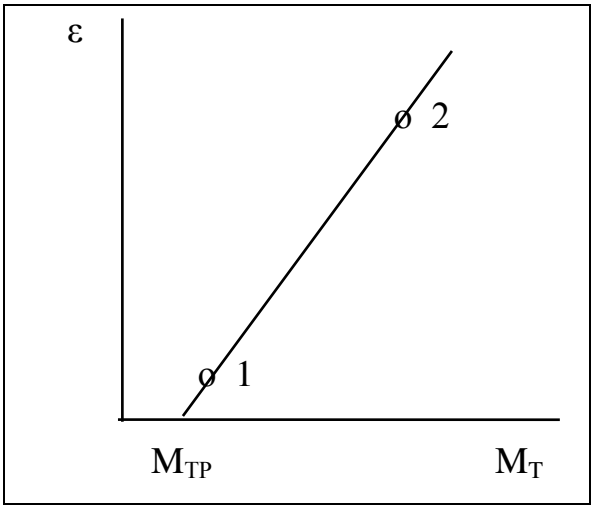


Рис.11.2

Для определения *J* и M_{TP} необходимо построить график зависимости $\varepsilon = f(M_T)$ (рис.11.2). Отрезок, отсекаемый прямой $\varepsilon = f(M_T)$ на оси абсцисс, есть M_{TP}, а тангенс угла наклона графика к оси абсцисс есть $\frac{1}{J}$. Поскольку формула /3/ справедлива для любых двух точек на графике (рис.11.2), *J* можно нахо дить по формуле

$$J = \frac{M_{T_2} - M_{T_1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}.$$ /8/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА НАСТОЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

1. Установить колонну (16) прибора с помощью винтов (7) в вертикальное положение.
2. Установить подвижный кронштейн (17) на выбранную высоту *h*. Измерить радиус шкива *r* штангенциркулем.
3. Надеть петлю, которой заканчивается нить груза-платформы, на вырез на ободе шкива. Намотать нить так, чтобы нижний край груза-платформы массой *m* (13) (масса указана на самом грузе) находился на уровне черты на корпусе фотоэлектрического датчика (17). Груз не должен касаться корпуса датчика и находиться в состоянии покоя. Зафиксировать шкив в исходном положении с помощью электромагнита, нажав клавишу «сеть» на панели блока управления. Клавиши «сброс» и «пуск » отжаты.
4. Закрепить грузы массой m_1 на стержнях маятника. Расстояние груза от оси шкива задает преподаватель.
5. Нажать клавишу «пуск». При этом электромагнит отключается, а секундомер включится и после опускания груза автоматически отключится. Записать время падения груза *t* в таблицу результатов наблюдений 1. Нажать клавишу «сброс» для обнуления секундомера и отключения электромагнита.
6. Повторить измерения по пункту 4 и 5 5-6 раз при неизменном положении грузов на спицах и высоте падения *h* и изменяя высоту падающего груза.
7. Рассчитать по формулам /5/, /6/, /7/ ускорение груза, угловые ускорения шкива и моменты сил для каждого опыта. Построить график зависимости $\varepsilon = f(M_T)$ (рис.11.2). Точки на гра-

фике должны лежать на прямой линии. Это говорит о выполнении основного закона динамики вращательного движения.

8. Определить по графику момент силы трения M_{TP} и вычислить момент инерции маятника по формуле /8/, взяв для этого на прямой точки (1,2), расположенные как можно дальше друг от друга.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА НАСТЕННОЙ УСТАНОВКЕ

1. Измерить радиус барабана *r* штангенциркулем.
2. Надеть петлю, которой заканчивается шнур груза-платформы, на штифт, имеющийся на барабане. Намотать на барабан шнур, вращая шкив до тех пор, пока нижний край груза не установится на нужной высоте (ее определяют с помощью прямоугольного треугольника). Зафиксировать шкив в исходном положении, нажав кнопку «тормоз» на щите управления.
3. На полу в месте падения груза поместить контактный выключатель, установив его в верхнее (отжатое) положение.
4. Установить в нулевое положение стрелку электрического секундомера.
5. Нажать кнопку «секунд». При этом включается секундомер и отключается электромагнит, удерживающий шкив. При падении груза на контактный выключатель электрическая цепь разорвется и секундомер остановится. Записать время падения груза. Повторить измерения 5-6 раз, увеличивая массу груза. Данные занести в таблицу результатов измерений.
6. Рассчитать по формулам /5/, /6/, /7/ ускорение падения груза, угловое ускорение шкива и моменты сил для каждого опыта. Построить график зависимости ε от M_T (рис .11.2).
7. Определить по графику момент сил трения и вычислить момент инерции маховика по формуле /8/, взяв для этого на прямой точки, расположенные как можно дальше друг от друга.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

m,кг	t,с	H,м	a,м $с^{-2}$	$\varepsilon, с^{-2}$	$M_T, 10^{-2}$Н м

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом силы? Что такое плечо силы? Укажите единицы их измерения. Как определяется направление момента силы?
2. Что называют моментом инерции твердого тела? Укажите единицы его измерения? От чего зависит момент инерции твердого тела. Какие существуют методы вычисления момента инерции?
3. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите ее математическое выражение.
4. Как с помощью линейки (штангенциркуля) можно вычислить момент инерции маятника?
5. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения. В чем состоит его аналогия со вторым законом Ньютона? Выведите основное уравнение динамики вращательного движения.
6. Какие законы используются при выводе теории лабораторной работы № 11?
7. Как изменится угол наклона прямой на графике, если момент инерции маятника уменьшить (увеличить)?
8. Как можно изменить отрезок, отсекаемый на оси абсцисс графиком, который строится в лабораторной работе № 11?
9. Как изменится время падения груза при уменьшении (увеличении) момента инерции маятника, момента силы трения? Почему?
10. Выведите формулу M = m(g-a)r.
11. Вычислите момент инерции куба с ребром 1 м из невесомых проволочек с шариками одинаковой массы 0,1 кг в вершинах относительно различных осей (по заданию преподавателя).

ЛИТЕРАТУРА
1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 4,6,16,18.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 4,5,8,9,38, 39;

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ШКИВА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Шкив (1), момент которого необходимо определить, вращается на валу. К шкиву, на одной с ним оси, прикреплен барабан (2). На барабан намотана нить, к концу которой подвешен груз (3), поднятый над полом на высоту h. При падении груза создается вращающий момент, под действием которого шкив будет равноускоренно вращаться.

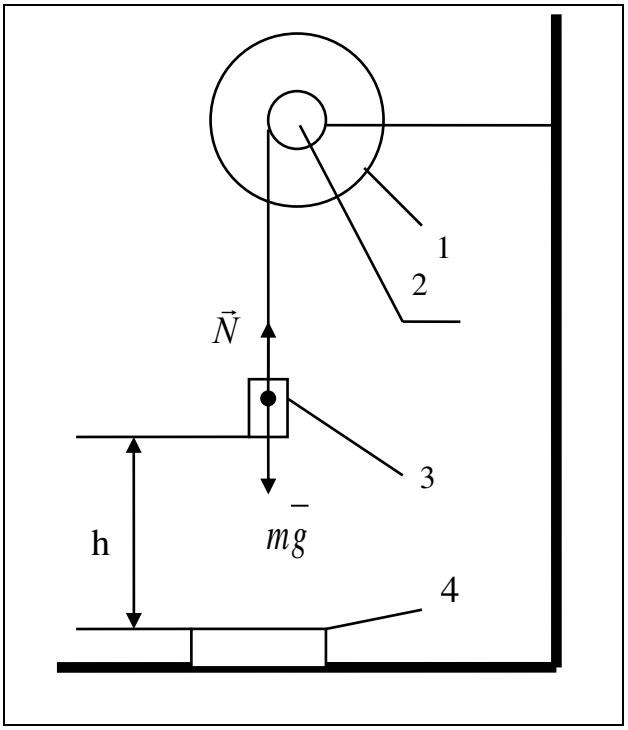


Рис.12.1

При этом начальная потенциальная энергия груза

$$П = mgh$$

превращается в другие виды энергии:

а) в кинетическую энергию поступательного движения самого груза $T_П = \frac{mv^2}{2}$;

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

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

На основании закона сохранения энергии в момент падения груза движения самого груза

$$T_П = \frac{mv^2}{2};$$

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

а) в кинетическую энергию поступательного

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

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

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

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

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

где m - масса груза, v - скорость груза в момент падения на пол, J -момент инерции шкива, ω - конечная угловая скорость, A_0 работа по преодолению сил трения за один оборот, N_1 - число

оборотов шкива за время падения груза. Определим работу A_0. Нить, к которой прикреплен груз, соскакивает со шкива при ударе груза о пол. Шкив некоторое время продолжает вращаться пока его кинетическая энергия T_{BP} не будет израсходована на работу по преодолению сил трения. Если с момента прекращения движения груза до остановки шкив сделает N_2 оборотов, то энергия, затраченная на преодоление сил трения за это время равна, $A_O N_2$. По закону сохранения энергии $T_{BP} = A_O N_2$, откуда

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

Подставив значение A_O в формулу /1/ и заменив $\omega = \frac{v}{r}$ и $v = \frac{2h}{t}$ (с учетом того, что движение груза равноускоренное), получим

$$J = \frac{mr^2\left(qt^2 - 2h\right)}{2h\left(1 + \frac{N_1}{N_2}\right)}, \qquad /4/$$

где r - радиус барабана, на который наматывается нить, t - время падения груза. Выразив число оборотов груза до удара о пол через расстояние, пройденное грузом $h = 2\pi r N_1$ и вводя общее число оборотов шкива до полной остановки $N = N_1 + N_2$, получим окончательно рабочую формулу

$$J = \frac{mr\ \left(gt^2 - 2h\right)}{4\pi N h}\left(2\pi r N - h\right). \qquad /5/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить радиус барабана.

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

3. Нажать кнопку «пуск». При этом включаются секундомер и счетчик оборотов. При опускании груза на концевой выключатель секундомер остановится, нить спадет с барабана, шкив продолжит вращаться. После остановки маховика записать число его оборотов от начала движения до остановки N_1 и время падения груза t в таблицу результатов наблюдений 1.

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

5. Убедиться, что движение груза равноускоренное. Для этого построить график зависимости высоты падения груза от квадрата времени его движения. При равноускоренном движении график должен быть прямолинейным, проходящим через начало координат.

6. Вычислить по формуле /5/ момент инерции шкива в каждом опыте. Найти его среднее значение, абсолютную (по формуле

$\Delta J_{cp} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta J_i)^2}{n(n-1)}}$) и относительную (по формуле $\varepsilon_{CP} = \frac{\Delta J_{CP}}{J_{CP}}$) погрешности, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум». Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя. Данные записать в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

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

ТАБЛИЦА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

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

7. Окончательный результат записать следующим образом:

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют моментом инерции твердого тела? Каков физический смысл этой величины? Укажите единицы измерения момента инерции.
2. Запишите формулы для вычисления моментов инерции тел правильной геометрической формы.
3. Какие превращения энергии происходят в данной работе? Запишите соответствующие формулы энергии.
4. Какие законы используются в теории лабораторной работы № 12? Выведите расчетную формулу в этой работе.
5. Как зависит момент инерции шкива от массы подвешенного груза, радиуса барабана, на который наматывается нить, времени падения груза, высоты падения, числа оборотов шкива? Ответ обосновать.
6. Поясните, на каком основании в данной работе можно определить J_{CP} из нескольких различных опытов.
7. Выведите формулу для вычисления кинетической энергии вращающегося тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 3,8,11,12,13,16,17.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 3,5,15,19,22,24,39,42.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.1, I.3.2, I.3.3, I.3.4, I.4.2, I.4.3.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13
ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Цель работы: экспериментальная проверка справедливости закона сохранения энергии при поступательном и вращательном движении и оценка потерь механической энергии на трение.

Приборы и принадлежности: прибор Гримзеля, шар известной массы, листы чистой и копировальной бумаги, масштабная линейка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Согласно закону сохранения энергии в замкнутой системе тел сумма механической и внутренней энергий не меняется при наличии сил трения:

$$E_M + U = const. \qquad /1/$$

Если в начальном состоянии система обладает потенциальной энергией $П_1$, кинетической энергией T_1 и внутренней энергией U_1, а в конечном соответственно, $П_2$ T_2, и U_2, то по закону сохранения энергии

$$T_1 + П_1 + U_1 = T_2 + П_2 + U_2. \qquad /2/$$

Это выражение можно переписать в виде $T_2 - T_1 = П_1 - П_2 - Q, \qquad /3/$

где $Q = U_2 - U_1$ - изменение внутренней энергии системы. Этот результат можно сформулировать так: кинетическая энергия системы увеличивается за счет убыли ее потенциальной энергии, причем часть последней необратимо превращается в тепловую энергию.

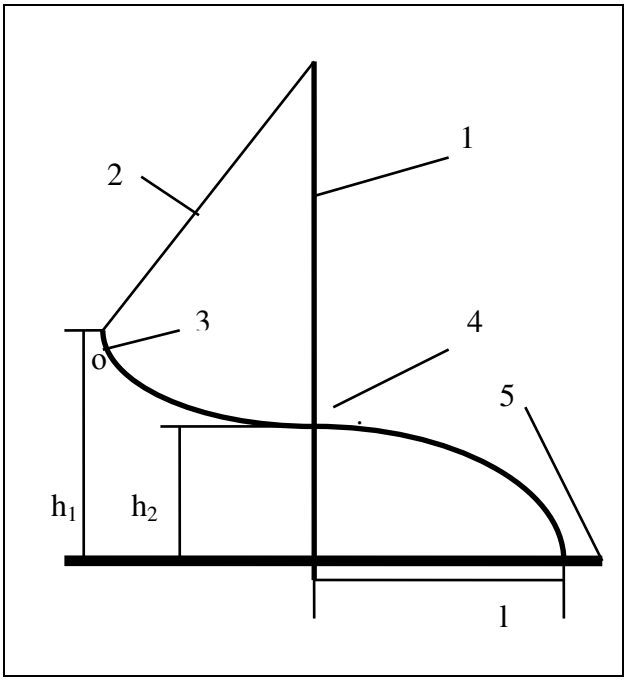


Рис.13.1

Экспериментальную проверку выражения /3/ можно произвести на приборе Гримзеля, изображенном на рис.13.1. Он состоит из вертикальной стойки (1), с шарнирно укрепленным на ней маятником (2), в котором устанавливается легко отделяющийся шар (3), ограничителя (4) и стола (5). Для приведения установки в исходное положение шар (3) вставляют в маятник (2) и отводят последний на некоторый угол. При этом шар обладает относительно стола потенциальной энергией.

$$П_1 = mgh_1, \qquad /4/$$

где m - масса шара, g - ускорение свободного падения, h - высота шара над поверхностью стола, и кинетической энергией $T_1 = 0$. При отпускании маятник в нижнем положении останавливается, шар вылетает из него. В момент вылета шар обладает потенциальной энергией

$$П_2 = mgh_2 \qquad /5/$$

и кинетической энергией

$$T_2 = (mv^2)/2, \qquad /6/$$

где v - горизонтальная скорость шара в момент вылета. Он продолжает двигаться по параболической траектории и падает на лежащий на столе (5) лист бумаги, накрытый копировальной бумагой, оставляя на бумаге след (точку). Криволинейное движение шара согласно принципу независимости движений можно разбить на два прямолинейных: равномерное по горизонтали, причем пройденный путь l равен:

$$l = vt, \qquad /7/$$

где t - время движения, и движение с постоянным ускорением без начальной скорости по вертикали, причем $h = gt^2/2$. /8/

Поскольку время в /7/ и /8/ одно и то же, можно вычислить начальную горизонтальную скорость

$$v = l\sqrt{g/2h_2}$$

/9/

и кинетическую энергию $T_2 = (m g l^2)/(4h_2)$.

/10/

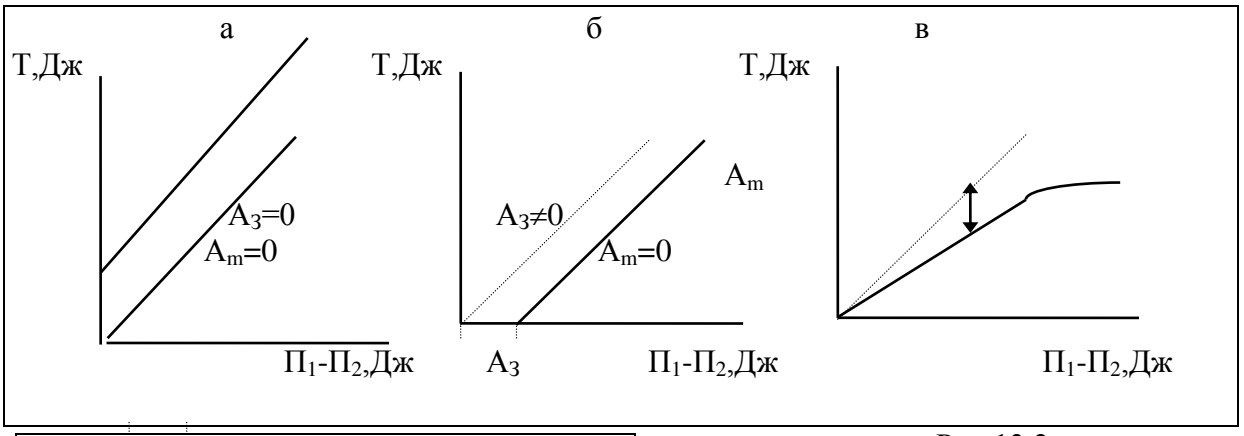


Рис.13.2.

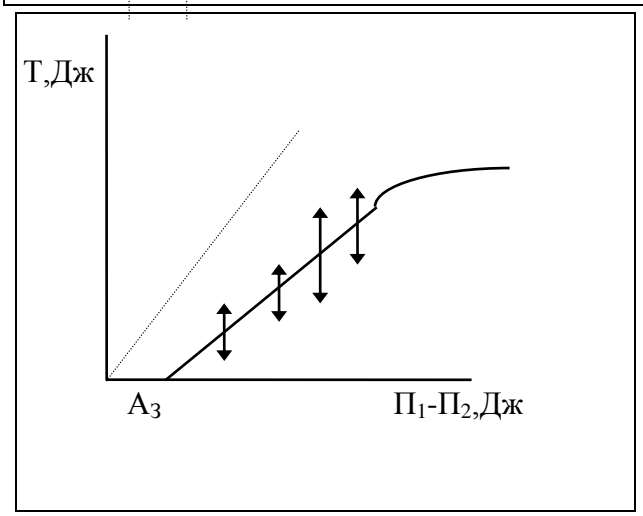


Рис.13.3

Поскольку изменение потенциальной энергии равно:

$$П_1 - П_2 = mg(h_1 - h_2), \qquad /11/$$

то из /3/, /10/, /11/ получим

$$T_2 = (mgl^2)/(4h_2) = mg(h_1 - h_2) - Q, \qquad /12/$$

где все величины, кроме Q, могут быть измерены в эксперименте. Масса шарика задается заранее.

Затруднения с измерениями Q не позволяют произвести точную проверку закона сохранения энергии с помощью формул /3/ и /12/. Однако относительно природы Q можно сделать некоторые заключения. Эта величина складывается из потерь энергии для совершения работы по преодолению сил трения в шарнире маятника A_T, в зажиме при отделении шара $A_З$ и для совершения работы по преодолению силы сопротивления воздуха A_C. При небольшой скорости, которую приобретает шар, работой по преодолению силы сопротивления воздуха можно пренебречь A_C=0. Работа сил трения в шарнире A_T пропорциональна углу поворота маятника и, если он не слишком близок к 90^0, приблизительно пропорциональна изменению потенциальной энергии. Работа сил трения в зажиме $A_З$ постоянна и не зависит от начального отклонения маятника. На рис.13.2 показана зависимость кинетической энергии при отсутствии потерь (рис.13.2а) и при действии каждого из рассмотренных факторов в отдельности (рис.13.2б и рис.13.2в), а на рис.13.3 - вид этой зависимости при одновременном действии обоих факторов.

Таким образом, бросая шар с различных высот и по полученным результатам построив график зависимости $T_2 = f(П_1 - П_2)$ можно проверить справедливость закона сохранения энергии /3/ и оценить работу сил трения в шарнире и при отрыве шара.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Закрепить шар в зажиме маятника и измерить его высоту над столом в момент отрыва (нижнее положение) h_2. Измерение высот производить от поверхности стола до нижней точки шара.
2. Масса шара задается заранее.
3. Отклонить маятник на некоторый угол, зафиксировать его в отклоненном положении, включив питание
электромагнита, измерить высоту h_1.
4. На столе (5) закрепить кнопками лист бумаги и положить на него копировальную бумагу краской вниз.
5. Отпустить маятник и, после падения шара, измерить расстояние от основания стойки до центра метки, оставленной шаром на бумаге. Опыт повторить пять раз.
6. Отклонить маятник на другой угол и повторить измерения по п.п. 2,3,4. Измерения провести при 5-6 различных высотах h_1.
7. Результаты измерений h_1, h_2 и l занести в таблицу результатов наблюдений 1 и вычислить для каждой высоты h_1 величину l_{CP}, и Δl_{CP} по формуле

$$\Delta l = t_{\alpha,n}\sqrt{(\sum \Delta l_i^2)/n(n-1)}, \qquad /13/$$

где n - количество измерений на одной высоте h_{1i}, а $t_{\alpha,n}$ - коэффициент Стьюдента (см. методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум»).
8. По формулам /10/ и /11/ вычислить для каждой высоты значения $П_1 - П_2$ и T_2. Результаты вычислений занести в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

h_1,м	N п.п.	l_1,м	Δl_i,м	Δl_i^2,м^2	Δl_{CP},м	$\Delta l_{CP}/l_{CP}$
	$n = 5$	l_{CP} =		$\sum \Delta l_i^2$ =		

9. Вычислить абсолютную погрешность кинетической энергии T_2 полагая, что все величины, входящие в формулу /10/, кроме l, содержат только систематическую погрешность, пренебрежимо малую по сравнению со случайной погрешностью Δl_{CP}. Поэтому

$$\Delta T_2 = 2T_2 \Delta l_{CP}/l_{CP} . \qquad /14/$$

Результаты вычислений записать в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

m, кг	h_1,м	$П_1 - П_2$,Дж	l_{CP},м	T_2,Дж	$\Delta l_{CP}/l_{CP}$	ΔT_2,Дж

10. Построить график зависимости $T_2 = f(П_1 - П_2)$ (рис.13.3) откладывая величины с одинаковым масштабом по обеим осям. Отложить доверительные интервалы ΔT_2 значений T_2 и провести по экспериментальным точкам прямую наилучшим образом. Определить по графику работу сил трения в зажиме A_3 и оценить работу сил трения в шарнире.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение энергии и работы. В каких единицах измеряются энергия и работа? Сформулируйте закон сохранения и превращения энергии.
2. Дайте определения видов механической энергии (кинетической и потенциальной). Выведите формулы для этих видов механической энергии.
3. Сформулируйте закон сохранения механической энергии системы тел. В каких системах выполняется закон сохранения механической энергии? Какому условию должны отвечать силы, действующие в системе, чтобы выполнялся закон сохранения механической энергии?
4. Сформулируйте закон сохранения полной энергии. В каких системах выполняется закон сохранения полной энергии? Какому условию должны отвечать силы, действующие в системе, чтобы выполнялся закон сохранения полной энергии?
5. Какие превращения энергии происходят в этой работе?
6. Выведите расчетные формулы данной лабораторной работы.
7. Каково влияние массы шара на величину его кинетической и потенциальной энергии?
8. Вычислите тангенс угла наклона вектора полной скорости к поверхности стола.

ЛИТЕРАТУРА

5. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 2,3,8,11,12,13.
6. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 3,19,22,24.
7. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.1, I.3.2, I.3.3, I.3.4, I.4.2, I.4.3.
8. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

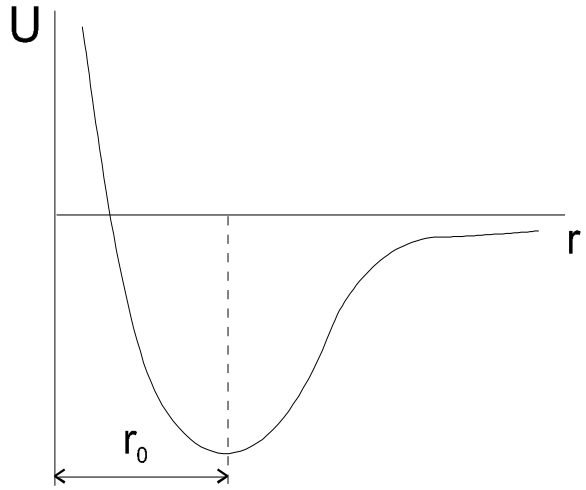
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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



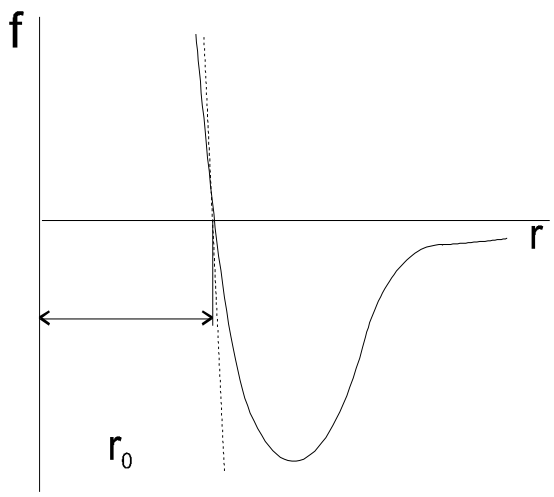


Рис.14.1 Рис.14.2

Сила f взаимодействия тел в потенциальном поле имеет вид

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

Соответствующий график зависимости $f(r)$ представлен на рис.14.2. Вблизи r_0 при малых смещениях атомов из положения равновесия $\Delta r << r_0$ можно считать что

$$f = -\chi \Delta r, \qquad /2/$$

т.е. сила, действующая на атом, пропорциональна его смещению из положения равновесия. Пользуясь этим соотношением, можно установить связь между микроскопическим параметром взаимодействия атомов χ и модулем Юнга E, фигурирующим в законе Гука: В области упругих деформаций относительная деформация прямо пропорциональна приложенному механическому напряжению $\varepsilon = \sigma / E$,

/3/

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

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

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

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

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

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

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

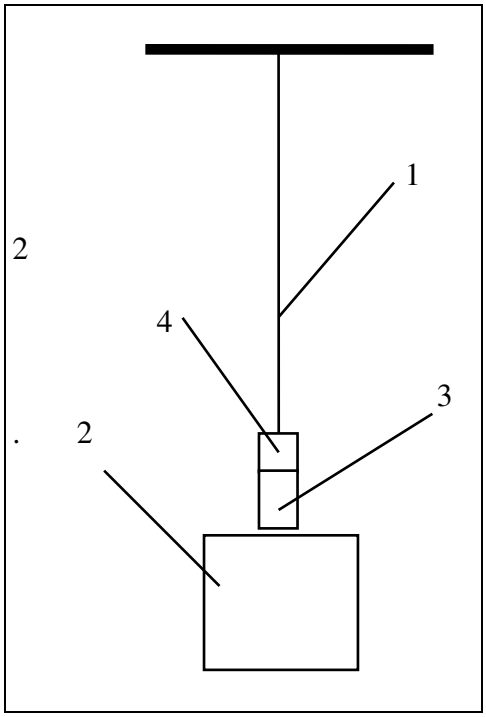


Рис.14.3

Экспериментальная установка представлена на рис.14.3. Образец медной проволоки (1) длиной $X \approx 1.6$ м подвешен на кронштейне. Корпус (2) измерительного блока закреплён неподвижно. В его отверстии помещается основной груз (3), центрируемый подпружиненными шариками. Дополнительные грузы (4), создающие абсолютное удлинение ΔX, помещаются на основной груз сверху. Индикатор малых перемещений (5) установлен посредине основного груза снизу с помощью штыря и планки. Перемещение основного груза при удлинении проволоки вызывает поворот большой стрелки индикатора с ценой деления 10^{-5} м. Малая стрелка указывает число целых миллиметров. Установка индикатора в нулевое положение производится поворотом шкалы большой стрелки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать длину проволоки X, указанную на установке.

2. Измерить микрометром диаметр проволоки d в нескольких местах, очищенных от слоя лаковой изоляции.3. Индикатор установить в нулевое положение, проверяя правильность установки постукиванием
по корпусу. При этом большая стрелка индикатора не смещается из нулевого положения.

4. Установить на основной груз дополнительные грузы, увеличивая их величину. Измерить абсолютное удлинение ΔX нарастающим итогом. Опыт по п. 4 произвести несколько раз. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5. Построить график зависимости $\Delta X = f(mg)$, откладывая на оси абсцисс нагрузку mg, а по оси ординат абсолютное удлинение ΔX. Провести через полученные точки наилучшим образом прямую. С учетом того, что площадь сечения проволоки $S = 1/(4\pi d^2)$, рассчитать среднее значение модуля Юнга по форму ле

$$E = (4X/\pi d^2)\left[\frac{m_2 g - m_1 g}{\Delta X_2 - \Delta X_1}\right]. \qquad /18/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое деформация? Что такое упругие и пластические деформации?
2. Какие существуют виды деформации с точки зрения изменения формы тела? Приведите примеры.
3. Что такое абсолютная и относительная деформации (удлинения), в каких единицах они измеряются?
4. Как соотносятся между собой деформирующая сила и сила упругости?
5. Что называется механическим напряжением? Укажите единицу измерения механического напряжения.

6. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
7. Сформулируйте и запишите (выведите) закон Гука для одноосного растяжения (сжатия).
8. Каков физический смысл и единица измерения модуля Юнга? От чего зависит модуль Юнга?
9. Нарисуйте график закона Гука и прокомментируйте его.
10. Нарисуйте диаграмму растяжения, т.е. график, связывающий деформацию и напряжение, и поясните его.

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТОДОМ ИЗГИБА

Цель работы: убедиться, что для упругих деформаций величина деформации прямо пропорциональна деформирующей силе, и вычислить модуль Юнга методом изгиба пластины прямоугольного сечения.

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Под действием внешних сил в твердых телах возникают деформации. Для упругих деформаций справедлив закон Гука, который в случае растяжения или сжатия имеет вид (см. лабораторную работу № 14): $\varepsilon = \sigma / E$, где $\varepsilon = \Delta X / X$ - относительное удлинение образца, ΔX - абсолютное удлинение, X - первоначальная длина образца, $\sigma = F / S$ - механическое напряжение, равное отношению деформирующей силы F к площади поперечного сечения образца S, E - модуль упругости первого рода или модуль Юнга.

В данной работе модуль Юнга определяется методом изгиба пластины прямоугольного сечения. Действие силы тяжести груза, подвешенного к пластине, вызывает деформацию изгиба. В этом случае величина деформации определяется «стрелой прогиба» ΔY, т.е. расстоянием, на которое опускается точка приложения силы, действующей на пластину. Для вычисления модуля Юнга используются соотношения для трех возможных способов закрепления пластины:

1. Оба конца свободны - $$E = \frac{l^3 g(m_2 - m_1)}{4ab^3(\Delta Y_2 - \Delta Y_1)}.$$ /1/

2. Оба конца закреплены - $$E = \frac{l^3 g(m_2 - m_1)}{16ab^3(\Delta Y_2 - \Delta Y_1)}.$$ /2/

3. Один конец свободен, а другой закреплен. $$E = \frac{4l^3 g(m_2 - m_1)}{ab^3(\Delta Y_2 - \Delta Y_1)}.$$ /3/

Здесь m - масса груза, вызывающего деформацию, a - ширина поперечного сечения пластины, b - ее толщина. Формулы /1/ и /2/ соответствуют приложению нагрузки к середине пластины, а /3/ - к свободному концу. Стрела прогиба в точках приложения нагрузки измеряется индикатором малых перемещений. В формулах /1/ и /2/ l есть расстояние между опорами, в формуле /3/ l - расстояние от точки приложения нагрузки до опоры. Вывод соотношений /1/, /2/ и /3/ изложен в учебнике [4].

В экспериментальной установке (рис.15.1) пластина прямоугольного сечения (1) опирается на ребра призм (2) и прижимается с помощью зажимов (3) к вертикальным стойкам (4), установленным на основании (5).
Пластина нагружается грузами (6), подвешиваемыми к крюку (7), укрепленному на подвижных салазках (8). Над пластиной (1) закреплен индикатор (9), стержень ко торого соприкасается с пластиной в точке подвеса груза. Перемещение стержня индикатора при прогибе пластины передается стрелке прибора, отсчитывающей по шкале величину перемещения в сотых долях миллиметра.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить ширину пластины a штангенциркулем и толщину b микрометром;
2. Закрепить пластину на опорах способом /1/, /2/ или /3/ по заданию преподавателя;
3. Измерить расстояние l масштабной линейкой;
4. Закрепить индикаторную головку в точке подвеса груза и установить шкалу в нулевое положение;
5. Подвесить груз массой m и измерить стрелу прогиба ΔY индикатором. Прежде чем записать показание индикатора, необходимо, слегка постукивая по основанию прибора, добиться, чтобы стрелка установилась в равновесном положении. Увеличивая массу груза повторить измерения 5-6 раз. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.
6. Разгрузить установку и повторить серию измерения по п.п.4,5.
7. Построить график $\Delta Y_{CP} = f(mg)$. Провести через экспериментальные точки прямую наилучшим образом. Рассчитать по координатам двух далеко отстоящих точек, взятых на ней, величину модуль Юнга по соответствующей из формул /1/, /2/, /3/. Сравнить результат с табличными данными.

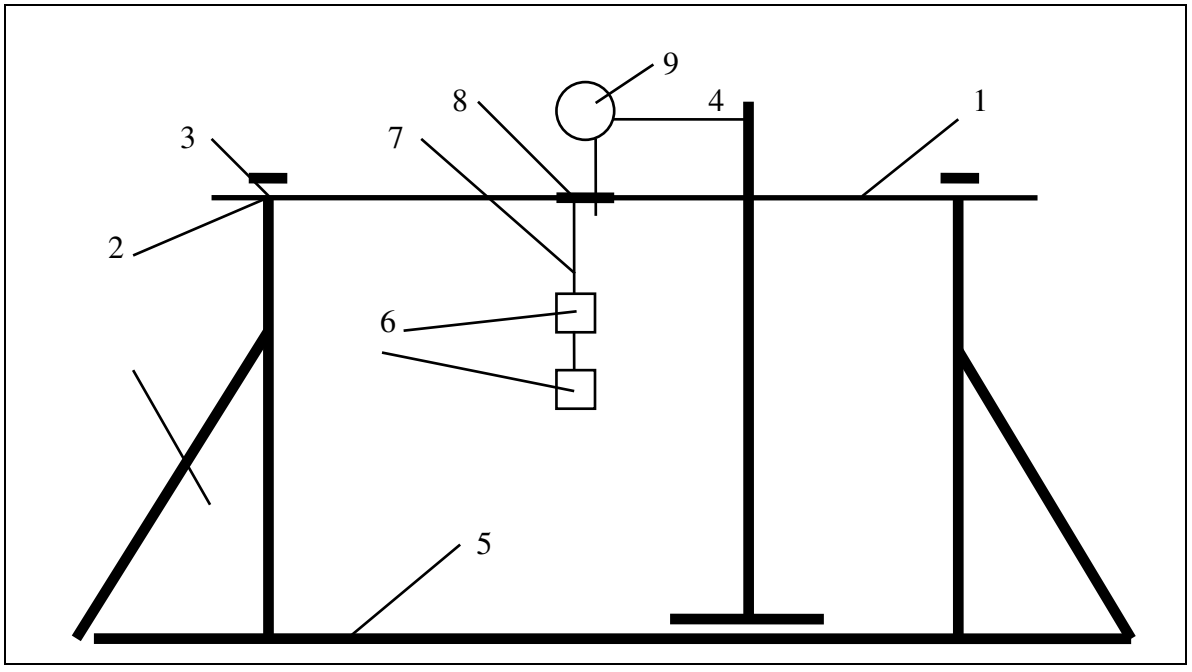


Рис.15.1

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Способ	а,10^{-2}м	в,10^{-3}м	1,м	mg,Н	ΔY,10^{-5}м		
крепления					1	2	Среднее

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое деформация?
2. Что такое упругие и пластические деформации?
3. Какие существуют виды деформации с точки зрения изменения формы тела? Приведите примеры.
4. Что такое абсолютная и относительная деформации (удлинения), в каких единицах они измеряются?
5. Как соотносятся между собой деформирующая сила и сила упругости?
6. Что называется механическим напряжением? Укажите единицу измерения механического напряжения.
7. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
8. Сформулируйте и запишите (выведите) закон Гука для одноосного растяжения (сжатия).
9. Что называется пределом упругости?
10. Каков физический смысл и единица измерения модуля Юнга? От чего зависит модуль Юнга?
11. Нарисуйте график закона Гука и прокомментируйте его.
12. Нарисуйте диаграмму растяжения, т.е. график, связывающий деформацию и напряжение, и поясните его.

ЛИТЕРАТУРА.

12. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 12,21.
13. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 14,25.
14. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.3, VII.1.3.
4. Стрелков С.П. Механика / С.П. Стрелков. - М.: ВШ, - 1975, - § 12.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы: изучение сложного ускоренного и равномерного движения и определение ускорения свободного падения.

Приборы и материалы: экспериментальная установка (машина Атвуда), грузы с нитью и перегрузки.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Законы кинематики и динамики поступательного и вращательного движения могут быть исследованы с помощью машины Атвуда. Установка, представленная на рис.16.1, состоит из основания (1), вертикальной стойки (2) с нанесенным масштабом, нижнего (3), среднего (4), верхнего (5) кронштейнов, шкива с тормозом (6). Внизу на основании (1) установлен блок управления и измерения времени (7). Через вращающийся вокруг вертикальной оси легкий шкив (6) переброшена нить с двумя грузами (8,9) равной массы m. На правый груз (9) помещается перегрузок небольшой массы Δm (10), под действием которой груз (9) вместе со связанным с ним грузом (8) движется равноускоренно от кронштейна (5) до кронштейна с фотоэлементом (4). Здесь кольцом (11) перегруз снимается и до кронштейна (3) с фотоэлементом груз (9) движется равномерно.

Уравнения динамики, описывающие поступательное движение грузов на первом участке и вращательное движение шкива, имеют вид $m\bar{a} = m\bar{g} + \bar{T}_1$,

$$\begin{gathered}(m+\Delta m)\bar{a} = (m+\Delta m)\bar{q} + \bar{T}_2, \qquad /1/ \\ \mathrm{J}\bar{\varepsilon} = \bar{\mathrm{M}}_{\mathrm{T_1}} + \bar{M}_{T_2} + \bar{M}_{TP}.\end{gathered}$$

Нить считается невесомой и нерастяжимой, $\overline{T}_1$ и $\overline{T}_2$ - силы, действующие на левый и правый грузы со стороны нити; $\overline{M}_{T1}$ и $\overline{M}_{T2}$ – моменты сил, создаваемые этими силами; $\overline{M}_{TP}$ – момент силы трения, J - момент инерции шкива, ε - его угловое ускорение, связанное с линейным ускорением движения грузов соотношением $a = \varepsilon R$, где R - радиус шкива.

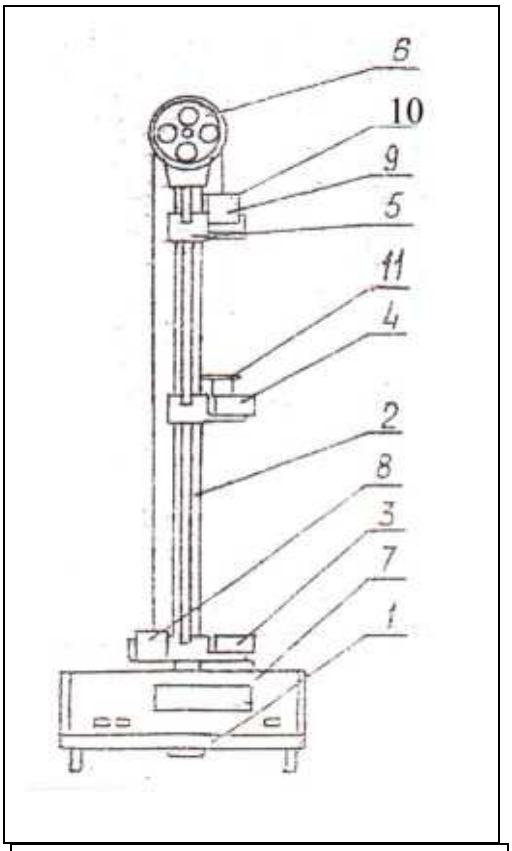


Рис.16.1

Переходя от векторной к скалярной форме уравнений динамики с учетом направления движения грузов и сил, получим

$$ma = -mg + T_1$$
$$(m + \Delta m)a = (m + \Delta m)q - T_2 .$$

/2/

$$J\frac{a}{R} = RT_2 - RT_1 - M_{mp}$$

Откуда линейное ускорение грузов равно:

$$a = \frac{\Delta mg - M_{mp}/R}{2m + \Delta m + J/R^2} . \qquad /3/$$

Масса шкива (за счет применения легкого материала и сверления облегчающих отверстий) и его момент инерции незначительны. Момент силы трения в подшипнике шкива мал по сравнению с моментом силы тяжести перегруза $M_{TP} << R\Delta mg$. При достаточно малой массе перегрузка (по сравнению с массой грузов) $\Delta m << 2m$ ускорение пропорционально массе перегруза

$$a \approx \frac{\Delta mq - M_{mp}/R}{2m + \Delta m} \approx \frac{\Delta mq}{2m + \Delta m} . \qquad /4/$$

Линейное ускорение грузов может быть найдено из уравнений кинематики равноускоренного движения на участке ΔS_1 и равномерного движения на участке ΔS_2:

$$\Delta S_1 = a\Delta t_1^2/2 , \qquad V = a\Delta t_1 , \qquad \Delta S_2 = V\Delta t_2 , \qquad /5/$$

где V - скорость движения в момент прохождения фотоэлемента на кронштейне (4), Δt_1 – время движения на участке ΔS_1, Δt_2 - на участке ΔS_2 соответственно. Откуда

$$a = \frac{\Delta S_2^2}{2\Delta S_1 \Delta t_2^2} . \qquad /6/$$

Сравнивая уравнения /4/ и /6/, получим выражение для расчета ускорения свободного падения

$$q = \frac{2m + \Delta m}{\Delta m} * \frac{\Delta S_2^2}{2\Delta S_1 t_2^2} . \qquad /7/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить стойку (2) с помощью винтов (12) в вертикальное положение. При этом груз (9) свободно проходит через кольцо (11) и фотоэлементы кронштейнов (3) и (4).

2. Включить питание блока (7) кнопкой «сеть» и нажать кнопку «сброс». При этом шкив (6) фиксируется тормозом.
3. Установить длины участков ΔS_1 и ΔS_2 перемещением кронштейнов (4) и (5). Кронштейн (3) установлен неподвижно в начале шкалы.
4. Установить нижний край правого груза с перегрузом (9) против отметки на кронштейне (5).
5. Нажать кнопку «пуск». При этом грузы придут в движение, и будет измерено секундомером время Δt_2. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.
6. Повторить 6...7 раз измерения по пунктам 2...5 при постоянных Δm и ΔS_1 изменяя ΔS_2 (передвигая кронштейны (4) и (5)). Построить график зависимости $\Delta S_2 = f(\Delta t_2)$ и убедиться, что движение на этом участке равномерное.
7. Повторить 6..7 раз измерения по пункту 2...5 изменяя Δm и оставляя неизменными ΔS_1 и ΔS_2. Рассчитать величину ускорения a по формуле /6/ и построить график зависимости $a = f(\Delta m)$.
8. Пользуясь формулой /7/ и данными обоих серий измерений рассчитать величину ускорения свободного падения.
9. Рассчитать по формуле /8/ Δg_{CP} и $\varepsilon = \Delta g_{CP} / g_{CP}$ (см. «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум»).

$$\Delta q_{c\text{p}} = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta q_i^2}{n(n-1)}} \; . \qquad /8/$$

Число измерений n= ; Надежность выбирается α=0,95 или задается преподавателем. Представить окончательные результаты в виде

$$g = g_{CP} \pm \Delta g_{CP} \; ; \qquad \varepsilon = \Delta g_{CP} / g_{CP} \; 100\% \; .$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

m,кг	Δm,кг	ΔS_1 ,м	ΔS_2,м	$\Delta t_{2,c}$	a,м/с^2	q,м/с^2	Δq	Δq^2,

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды движения наблюдаются при падении груза в данной лабораторной работе?
2. Какое движение называется равномерным прямолинейным? Запишите для него уравнение движения.
3. Какое движение называется равноускоренным прямолинейным? Запишите для него уравнения движения.
4. Что называется ускорением, от чего зависит ускорение тела, в каких единицах измеряется ускорение?
5. Какие законы механики используются при выводе формулы для вычисления ускорения свободного падения в лабораторной работе № 16?
6. Какие предположения делаются в теории лабораторной работы № 16 при выводе формулы для вычисления ускорения свободного падения?
7. Выведите выражения для расчета ускорения тела и ускорения свободного падения в лабораторной работе № 16. От чего зависит ускорение груза?
8. Нарисуйте график зависимости пути от времени (координаты от времени) для правого (левого) груза.

9. Возможны ли движения, при которых отсутствует нормальное ускорение? Тангенциальное ускорение? Приведите примеры.
10. От каких факторов зависит ускорение грузов в лабораторной работе № 16?
11. От каких факторов зависит ускорение свободного падения?

ЛИТЕРАТУРА

15. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 4,6,16,18.
16. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 4,5,8,9,38,39.
17. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.1.4, I.2.4, I.4.1, I.4.2, I.4.3.
18. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ КОЛЬЦА

Цель работы: исследование основного закона динамики вращательного движения и определение моментов инерции толстостенного кольца и цилиндра.

Приборы и принадлежности: установка «Маятник Максвелла».

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Момент инерции - это мера инертности тела при вращательном движении.

При вращении твердого тела относительно неподвижной оси его отдельные малые (точечные) части с массами Δm_i описывают окружности различных радиусов r_i. Момент инерции равен сумме произведений масс точечных частей тела на квадраты их расстояний до оси вращения:

$$J = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 . \qquad /1/$$

Если масса распределена в пространстве непрерывно, то момент инерции определяется интегрированием по всему объёму тела $J = \int_V r^2 dm$. /2/

Момент инерции тела зависит от массы тела, его формы, размеров и распределения массы рассматриваемого тела относительно заданной оси (от расположения оси, относительно которой определяется момент инерции).

Если известен момент инерции тела относительно оси О-О’, проходящей через центр масс этого тела J_O, то для нахождения момента инерции J относительно параллельной оси $X - X'$, проходящей на расстоянии a от оси О-О’, используют теорему Штейнера

$$J = J_O + ma^2 . \qquad /3/$$

Моменты инерции тел сложной формы определяются экспериментально с использованием уравнения динамики, закона сохранения энергии или теории колебаний физического маятника.

Работа посвящена изучению динамического метода определения момента инерции тела сложной формы (состоящего из нескольких тел простой формы) на установке, называемой «маятник Максвелла».

Экспериментальная установка показана на рис.17.1. Основание (1) имеет ножки (2) регулируемой высоты. В основании закреплена колонна (3), к которой прикреплен неподвижный верхний кронштейн (4) и подвижный нижний кронштейн (5). На верхнем кронштейне находится электромагнит (6), фотоэлектрический датчик и вороток (8) для закрепления и регулирования длины нитей бифилярной подвески маятника.

Экспериментальная установка показана на рис.17.1. Основание (1) имеет ножки (2) регулируемой высоты. В основании закреплена колонна (3), к которой прикреплен неподвижный

верхний кронштейн (4) и подвижный нижний кронштейн (5). На верхнем кронштейне находится электромагнит (6), фотоэлектрический датчик и вороток (8) для закрепления и регулирования длины нитей бифилярной подвески маятника.

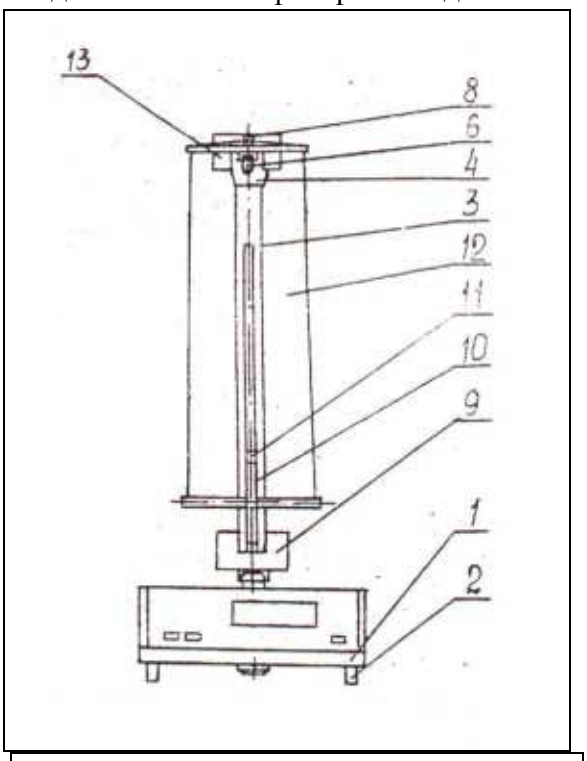


Рис.17.1

Экспериментальная установка показана на рис.17.1. Основание (1) имеет ножки (2) регулируемой высоты. В основании закреплена колонна (3), к которой прикреплен неподвижный верхний кронштейн (4) и подвижный нижний кронштейн (5). На верхнем кронштейне находится электромагнит (6), фотоэлектрический датчик и вороток (8) для закрепления и регулирования длины нитей бифилярной подвески маятника.

Нижний кронштейн вместе с прикрепленным к нему фотоэлектрическим датчиком (9) можно перемещать вдоль колонны и фиксировать в выбранном положении. Маятник (10) прибора представ-

ляет собой диск на стержне, подвешенном бифилярно, на который надевают сменные кольца (11). Маятник с одетым кольцом удерживается в верхнем положении электромагнитом. Длина маятника определяется по шкале (12) на колонне прибора.

В каждый данный момент маятник совершает вращательное движение вокруг горизонтальной мгновенной оси вращения O_M (рис.17.2) под действием момента силы тяжести $M = mgr_C$, где r_C - радиус стержня маятника, m - общая масса маятника.

Согласно основному закону динамики вращательного движения, угловое ускорение равно:

$$\varepsilon = M/J \ . \qquad /4/$$

где J - момент инерции относительно мгновенной оси вращения O_M. Подставляя в формулу теоремы Штейнера /3/ полную массу маятника m и радиус стержня $r_C = a$ получим момент инерции маятника относительно центра масс

$$J = (M/\varepsilon) - mr_C^2 . \qquad /5/$$

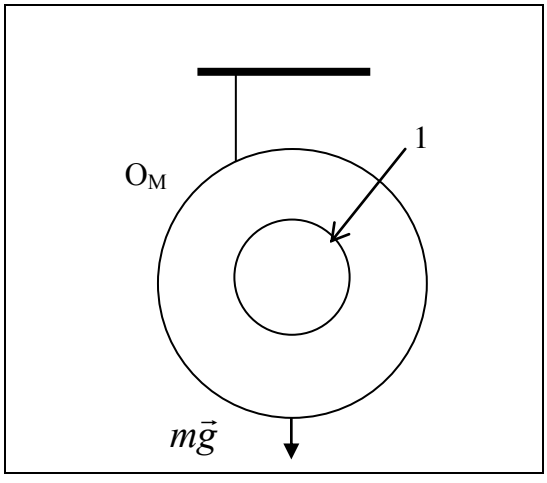


Рис.17.2.

Угловое ускорение маятника связано с его линейным ускорением $a = r\varepsilon_C$. Линейное ускорение может быть найдено из уравнений кинематики равноускоренного движения $a = 2h/t^2$, где h - высота падения маятника, равная его длине, а t - время падения маятника. Откуда получим

$$J = \frac{mgt^2 r_C^2}{2h} - mr_C^2 = \frac{mr_C^2 (gt^2 - 2h)}{2h} . \qquad /6/$$

Момент инерции тела равен сумме моментов инерции составляющих его частей относительно той же оси. Тогда теоретическое значение момента инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс,

может быть вычислено по формуле

$$J = J_C + J_D + J_K = \frac{m_C D_C^2}{8} + \frac{m_D (D_D^2 + D_C^2)}{8} + \frac{m_K (D_K^2 + D_D^2)}{8} \qquad /7/$$

где J_C, J_D, J_K - моменты инерции, D_C, D_D, D_K - диаметры, m_C, m_D, m_K - массы стержня, диска и кольца соответственно, а масса тела равна $m = m_C + m_D + m_K$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить колонну и нити маятника в вертикальное положение вращением ножек основания.
2. Отрегулировать горизонтальное расположение оси маятника визуально путем перепускания одной из нитей при отпущенной гайке фиксации воротка (8).
3. Накручиванием обоих нитей на вороток и фиксацией гайки воротка установить нижнее положение маятника. Нижний кронштейн поднять до перекрытия светового потока фотодатчика диском маятника. На шкале колонны по визиру нижнего кронштейна (9) определить и занести в таблицу результатов наблюдений высоту падения (длину) маятника h, равную координате нижней точки маятника в нижнем положении h_2, поскольку координата нижней точки маятника в верхнем положении $h_1 = 0,\ h = h_2 - h_1 = h_2$.
4. Включить прибор в сеть 220 В, нажав клавишу «сеть». Обнулить показания секундомера, нажав кнопку «сброс».
5. Накрутить нити подвеса на стержень маятника. Зафиксировать маятник в верхнем положении электромагнитом, отжав кнопку «пуск».
6. Нажать кнопку «пуск» и измерить время падения t. Измерения повторить 5-6 раз.
7. Рассчитать экспериментальные значения момент инерции маятника J в каждом опыте по формуле /6/. Найти его среднее значение, абсолютную (по формуле $\Delta J_{cp} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta J_i)^2}{n(n-1)}}$) и относительную (по формуле $\varepsilon_{CP} = \frac{\Delta J_{CP}}{J_{CP}}$) погрешности, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум». Здесь n - число измерений (5-6), $t_{\alpha,n}$ - коэффициент Стьюдента при надежности α=0,95 или задаваемой преподавателем. Данные записать в таблицу результатов наблюдений.
8. Рассчитать теоретическое значение момента инерции маятника по формуле /7/. Значения масс указаны на деталях маятника, а диаметры измеряются штангенциркулем. Теоретическое значение момента инерции маятника должно отличатся от экспериментального не более чем на ΔJ_{CP}

m_C= $m_Д$ = $m_К$=
D_C= $D_Д$ = $D_К$=
$J_{ТЕОР}$ = $J_{ЭКСП\ СР}$ = $\Delta J_{СР}$ =

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

h,м	t,с	m,кг	$J,10^{-3}$кгм^2	$\Delta J,10^{-3}$ кгм^2	$\Delta J^2,10^{-6}$кг^{2}м^4

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое момент инерции твердого тела? Каков физический смысл этой величины? Укажите его единицу измерения. Векторная или скалярная величина - момент инерции?
2. Как вычислить момент инерции материальной точки, твердого тела?
3. Укажите методы вычисления момента инерции.

4. Приведите моменты инерции симметричных тел относительно осей проходящих через центр масс.
5. Сформулируйте и запишите формулу теоремы Штейнера. Выведите теорему Штейнера.
6. Найдите момент инерции однородного сплошного цилиндра (однородного тонкого стержня) относительно оси не проходящей через центр тяжести.
7. Сформулируйте и запишите основной закон динамики вращательного движения.
8. Сопоставьте уравнения динамики поступательного движения с уравнениями динамики вращательного движения, прокомментируйте их аналогию.
9. В чем заключается динамический метод определения момента инерции?
10. С использованием каких законов определяется момент инерции в лабораторной работе № 17?
11. Выведите расчетную формулу к лабораторной работе № 17.
12. Что такое мгновенная ось вращения?

ЛИТЕРАТУРА.

19. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 4,6,16,18.
20. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 4,5,8,9,38,39.
21. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.1.4, I.2.4, I.4.1, I.4.2, I.4.3.
22. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО МАЯТНИКА

Цель работы: экспериментальное изучение закономерностей возникающих при трении качения.

Приборы и принадлежности: измерительная установка, набор исследуемых образцов.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Трение качения возникает при перекатывании катка (цилиндра или, в нашем случае, шара) по поверхности твердого тела. Возникновение трения качения объясняется деформацией катка и плоскости. При этом возникают упругие деформации. Из-за деформаций поверхностей линия действия силы реакции опоры Q не совпадает с линией действия силы нормального давления N (рис.18.1), равной весу катка. При небольших деформациях нормальная составляющая Q_n реакции опоры к плоскости практически равна силе, с которой опора действует на каток N, а горизонтальная составляющая представляет собой силу трения F_{TP}. При равномерном качении катка по плоскости сумма моментов сил, действующих на него равна нулю. Момент силы трения качения относительно точки 0 равен произведению силы реакции опоры Q на расстояние k смещения точки приложения сил вследствие деформаций места контакта.

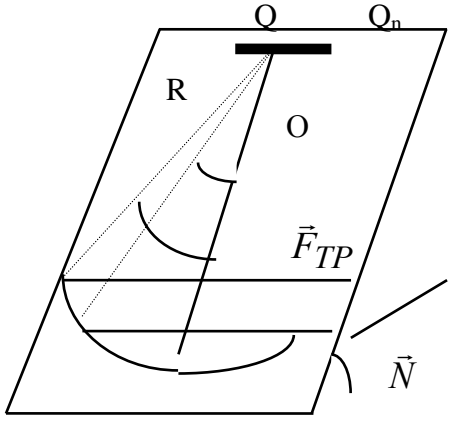


Рис. 18.1

Откуда $F_{TP}R = Q_n k$, /1/

где R- радиус катка или шара, k-плечо вертикальной проекции силы реакции опоры $Q_n \approx N$. Отсюда получаем выражение для силы трения качения

$$F_{TP} \approx kN/R.$$ /2/

Величину k называют коэффициентом трения качения. Следовательно, коэффициент трения качения представляет собой плечо силы реакции опоры и имеет размерность длины.

Для исследования процесса трения в работе используется наклонный маятник. Шар (рис.18.2), под-

вешенный на нити, опирается на наклонную плоскость, угол наклона которой к горизонтальной поверхности β можно изменять.

Если вывести шарик из положения равновесия, он начинает перекатываться по плоскости, причем его движение имеет характер колебаний, затухающих главным образом под действием внешнего трения. Сила N равна вертикальной составляющей силы тяжести

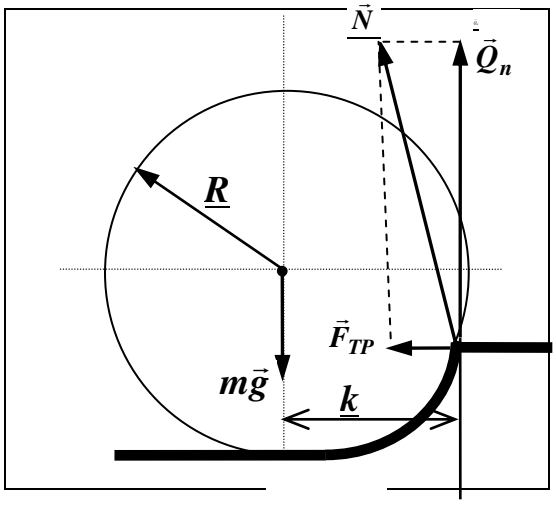


Рис.18.2

$$N = mg\cos\beta, \qquad /3/$$

где m - масса маятника.

Измерение силы трения с помощью наклонного маятника основано на измерении уменьшения амплитуды его колебаний за определенное число циклов. Формулу для расчета коэффициента трения можно получить, приравняв потенциальную энергию, потерянную катком в ходе колебаний, работе сил трения

$$E_p=A+A_1, \qquad /4/$$

где $A=F_{TP}S$ - работа силы трения, A_1 - работа по преодолению сопротивления среды и трения в подвесе маятника, S - путь пройденный шаром. Пренебрегая A_1 ввиду её малости, имеем $mqh=F_{TP}S$. /5/

Из треугольника ABC (рис.18.2) видно, что потеря высоты центром тяжести шара h равна $h=\Delta 1\sin\beta$, где $\Delta 1$=OE-OD. Тогда получаем

$$mq\Delta 1\sin\beta=kmq(S/R)\cos\beta. \qquad /6/$$

Если α_0 - амплитудное значение угла отклонения маятника в начальный момент, α_n - амплитуда отклонения через n колебаний, L -длина маятника, то путь, который проходит центр тяжести маятника за n колебаний, равен: $S=4Lna_{cp}$, где $a_{cp}=(a_0+a_n)/2$. С учетом того, что при малых углах α_0 и $\alpha_п$ $\cos\alpha\approx(1-\alpha^2)/2)$, получаем выражение для коэффициента трения качения

$$\kappa=R(\cos\alpha_n-\cos\alpha_0)tg\beta/(2n(\alpha_0+\alpha_n)) =R(\alpha_0-\alpha_n)tg\beta/(4n). \qquad /7/$$

Экспериментальная установка (рис.18.3) состоит из основания (2) и прикрепленного к нему блока управления. В основании закреплена труба (3), на которой смонтирован корпус (4) с червячной передачей. Посредством оси червячная передача соединена с кронштейном (5), на котором закреплена шкала для определения углов α отклонения катка (шара) и шкала (7) для определения угла β наклона плоскости, по которой движется каток. В кронштейне закреплена колонна (8), на которой подвешен на нити каток (шар) с водилкой (9). В кронштейн (5) по направляющим вставляются листовые образцы материалов поверхностей качения (10). Для наклона маятника используется вороток (11). К кронштейну (12) прикреплен фотоэлектрический датчик.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить испытуемый плоский образец (10).
2. Установить заданный угол β наклона рамы маятника (обратить внимание на то, что шкала (7) указывает угол, дополнительный до 90^0).
3. При помощи опорных винтов поставить маятник в такое положение, чтобы водилка маятника оказалась против нулевого деления шкалы.
4. Отклонить шарик от положения равновесия на угол $\alpha_0=4\div6^o$ по шкале. Записать в таблицу выбранный угол α_0. Затем без толчка отпустить маятник и с этого момента начать отсчет колебаний. После того как маятник совершит n полных колебаний, измерить величину $\alpha_п$.

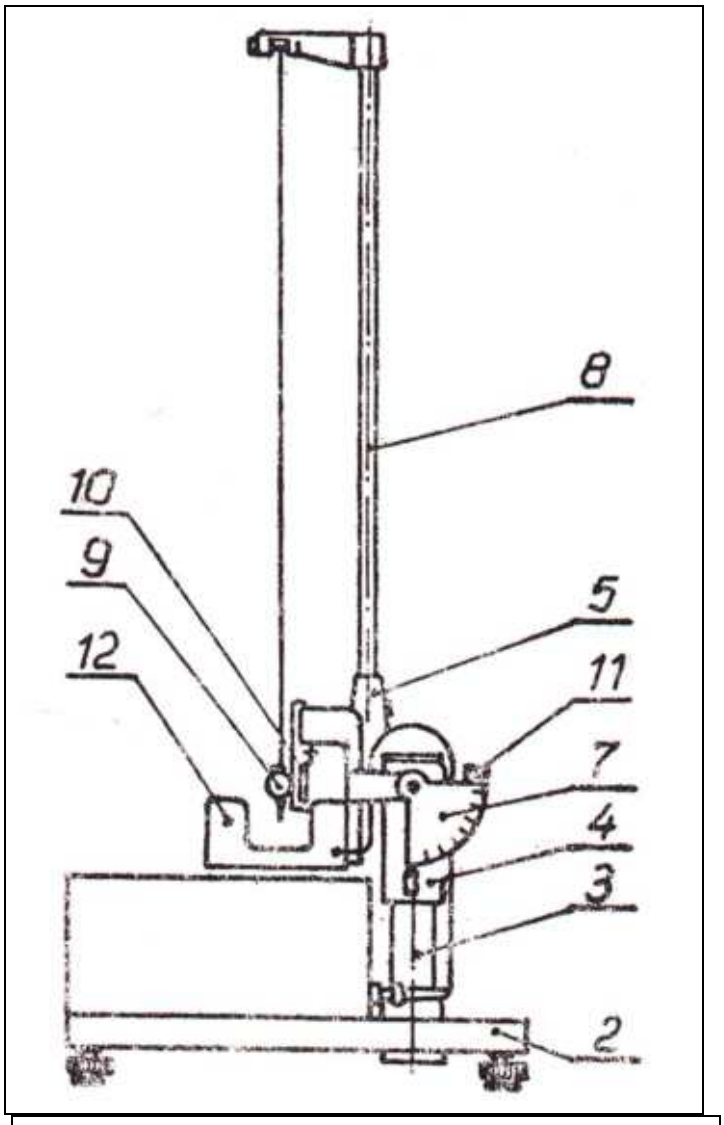


Рис.18.3.

5. Проделать аналогичные измерения для нескольких различных значений n (n=4,5.....10). Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
6. Пункты 3 и 4 проделать для других образцов поверхностей качения.
7. Радиус шарика R измерить штангенциркулем.
8. По формуле /7/ рассчитать к, Используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум» рассчитать среднюю абсолютную и среднюю относительную погрешности по формулам

$$\Delta k = t_{\alpha,n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta k_i^2}{n(n-1)}},$$

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta k_{CP}}{k_{CP}} 100\% .$$

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя. Данные записать в таблицу результатов наблюдений. Записать окончательный результат в виде

$к=(к_{ср}\pm\Delta к_{ср})$ м, $\varepsilon_к =$ %.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

R, м	β,град	n	α_n,рад	α_0,рад	$k_ι$, м	$\Delta k_ι$, м	$(\Delta k_ι)^2$, м^2	Δk/k	$k_{ср}$,м

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды трения.
2. Укажите единицу измерения коэффициента трения скольжения, коэффициента трения качения.
3. Каков физический смысл коэффициента трения качения?
4. От чего зависит коэффициент трения качения?
5. От чего зависит коэффициент трения скольжения?
6. Как можно объяснить возникновение трения качения?
7. Выведите формулу силы трения качения.
8. При каком условии справедлива теория к лабораторной работе № 18?
9. Как зависит коэффициент трения качения от радиуса шара, амплитуды колебаний, числа колебаний, угла наклона маятника?

ЛИТЕРАТУРА.
23. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 8,12,13.
24. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 15,20,21,22,24.
25. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.1, I.3.3, I.3.4.
26. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18а
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ МЕТОДОМ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Цель работы: экспериментальное изучение закономерностей трения скольжения и определение значений коэффициентов трения покоя и скольжения тел и семян сельскохозяйственных культур.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка в виде наклонной плоскости с различными материалами покрытий (дерево, сталь, прорезиненная ткань транспортера и др.), бруски из различных материалов, семена сельскохозяйственных культур.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При движении соприкасающихся твердых тел друг относительно друга между ними возникают силы внешнего трения. В результате действия таких сил кинетическая энергия относительного движения тел уменьшается.

Различают два вида такого внешнего трения - трение скольжения и трение качения. В каждом случае возможно сухое трение и трение со смазкой из какой-либо жидкости (обычно масла). В последнем случае силы трения значительно меньше.

Силы трения складываются из:

- упругих сил, возникающих при взаимодействии неровностей поверхностей двух тел;
- сил, возникающих при взаимодействии молекул поверхностных слоев соприкасающихся тел;
- сил, возникающих вследствие молекулярных неоднородностей на поверхностях соприкасающихся тел;
- сил, возникающих вследствие явления сваривания материалов в точках контакта при больших давлениях, изменения структуры поверхности вследствие износа.

Все эти силы имеют электрическую природу.

Согласно закону Амонтона - Кулона для явления внешнего трения справедливы следующие закономерности:

- имеет место сила трения покоя $F_{TP.П}$ - тело начинает двигаться, если сила тяги $F_T \geq F_{TP.П}$;
- сила трения не зависит от площади соприкасающихся тел;
- сила трения не зависит от относительной скорости тел при малых скоростях;
- сила трения покоя и сила трения скольжения прямо пропорциональны силе нормального давления $F_{TP.П} = K_П F_{ДАВЛ}$ и $F_{TP} = K_C F_{ДАВЛ}$. /1/

Поскольку по третьему закону Ньютона силы нормального давления и реакции опоры равны по абсолютной величине, то

$$F_{TP.П} = K_П N \text{ и } F_{TP.C} = K_C N. \qquad /2/$$

Здесь $K_П$ и K_C - коэффициенты трения покоя и скольжения.

Сила трения качения равна: $$F_{TP.K} = K_K \, {}^{N}\!/_{R}, \qquad /3/$$

где K_K - коэффициент трения качения, R - радиус тела.

При высоком качестве обработки поверхностей соприкасающихся тел и больших давлениях начинают проявляться силы межмолекулярного притяжения и сила трения скольжения описывается законом Амонтона - Кулона - Дерягина $F_{TP.C} = K_C(N + SP_O)$, /4/

где S - площадь контакта между телами, а P_O - добавочное давление, обусловленное силами межмолекулярного притяжения.

Коэффициенты трения зависят от:

- вида трения ($K_П \geq K_C \geq K_K$);
- материала соприкасающихся поверхностей;
- качества обработки (класса чистоты) соприкасающихся поверхностей;
- состояния соприкасающихся поверхностей (температуры, влажности, наличия загрязнений и смазки).

Экспериментальная установка по определению коэффициентов трения покоя и скольжения, представленная на рис.18а.1, состоит из основания (1), наклонной плоскости (2), транспортира для определения угла наклона плоскости (3), электромагнита (4), концевого микровыключателя (5) и электронного блока управления с кнопками «Электромагнит» и «Пуск».

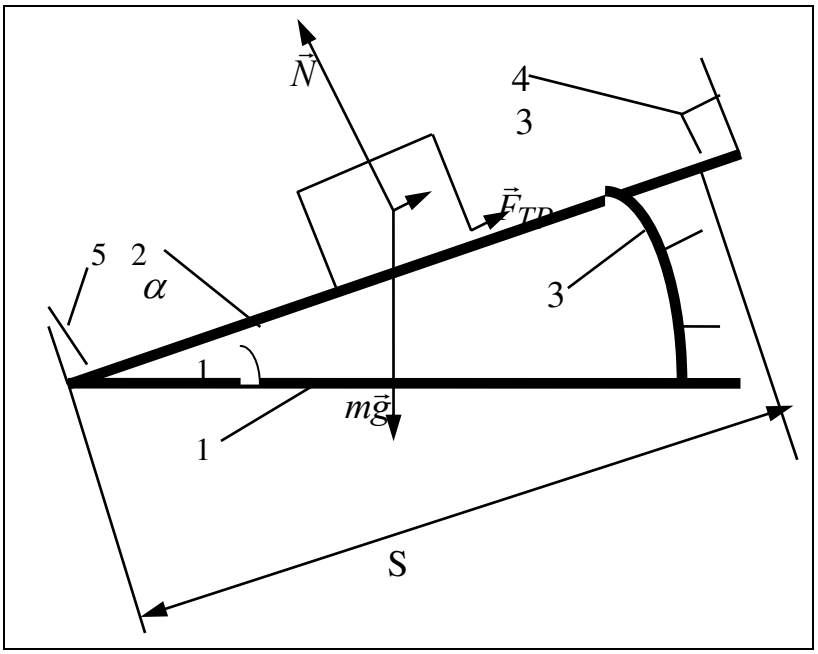


Рис.18а.1

На тело, находящееся на наклонной плоскости, действуют, как показано на рис.18а.1, следующие силы:

- сила тяжести - $\overline{F_T} = m\bar{g}$;
- сила реакции опоры $\overline{N}$;
- сила трения - $\overline{F_{TP}}$

Следствие из второго закона Ньютона имеет вид:

$m\bar{a} = m\bar{g} + \overline{N} + \overline{F}_{TP}$ /5/

или в проекциях на направления параллельно (OX) и перпендикулярно (OY) наклонной плоскости получим

$$\begin{aligned} OX &: ma = mg\sin\alpha - F_{TP} \\ OY &: 0 = mg\cos\alpha - N. \end{aligned} \quad /6/$$

Если геометрическая сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю, то тело находится в покое и его ускорение равно нулю. С учетом того, что $F_{TP.П} = K_П N$, получим:

$$K_{TP.П} = tg\alpha_o, \quad /7/$$

где α_o - максимальный угол, при котором тело еще остается в покое на наклонной плоскости. В таблице 1 приведены значения коэффициента трения покоя $K_{TP.П}$ для некоторых материалов.

При $\alpha \triangleright \alpha_o$ геометрическая сумма всех сил, действующих на тело, не равна нулю. Тогда тело движется равноускоренно и из /6/ следует: $K_C = tg\alpha - \dfrac{a}{g\cos\alpha}$. /8/

Величину ускорения a можно определить из зависимости пути S от времени t для равноускоренного движения без начальной скорости $S = \dfrac{at^2}{2}$, /9/

откуда $$K_C = tg\alpha - \frac{2S}{g\cos\alpha t^2}$$ /10

Таблица 1. Значения коэффициента трения покоя для некоторых пар материалов

Материалы	$K_{TP.П}$
Металл по металлу	0,15...0,30
Металл по дереву	0,50
Дерево по дереву	0,65
Кожа по металлу	0,60

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По заданию преподавателя определить коэффициент трения покоя $K_{TP.П}$ для брусков из различных материалов и семян растений (3-4 варианта) на различных покрытиях (транспортерная лента, дерево, металл, пластмасса и т.п.). Для этого положить тело на наклонную плоскость так, чтобы оно находилось в покое и медленно увеличивая угол наклона плоскости до значения α_o, когда тело начинает движение. Результаты занести в таблицу 2 результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

Тело	Материал поверхности наклонной плоскости	α_o гр	$K_{TP.П}$

2. Для определения коэффициента трения скольжения для указанной преподавателем пары тело
3. брусок) - покрытие наклонной плоскости установить угол наклона плоскости $\alpha \triangleright \alpha_o$, где α_o берется из таблицы результатов наблюдений 2.
4. Включить кнопку «Электромагнит» и закрепить тело на наклонной плоскости. Электрический секундомер установить на ноль.
5. Измерить длину наклонной плоскости S от нижнего края бруска до микровыключателя.
6. Нажать кнопку «Пуск». При этом отключается электромагнит, включается секундомер и тело движется по наклонной плоскости до микровыключателя. При ударе тела о микровыкючатель секундомер остановится. Результаты измерения α, S и t занести в таблицу 3 результатов наблюдений.
7. По формуле /10/ вычислить экспериментальные значения K_C и занести их в таблицу результатов наблюдений 3. Рассчитать среднее значение коэффициента трения скольжения K_C, среднюю абсолютную ΔK_C и среднюю относительную ε_K погрешности, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум» по формулам

$$K_{C.CP} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K_i, \quad \Delta K_C = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum \Delta K_i^2}{n(n-1)}}, \quad \varepsilon_K = \frac{\Delta K_{C.CP}}{K_{C.CP}}.$$

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя. Данные записать в таблицу результатов наблюдений 3. Результат представить в виде $K_C \pm \Delta K_C =$, $\varepsilon_K =$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 3

Тело, покрытие	№	α, град	S, м	t, с	K_{Ci},	ΔK_{Ci}	ΔK_{Ci}^2
	1						
	2						
	3						
	4						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды трения. Приведите примеры возникновения трения в природе и технике.
2. Укажите природу сил трения.
3. Сформулируйте закон Амонтона - Кулона для внешнего сухого трения скольжения.
4. Укажите единицу измерения коэффициента трения скольжения, коэффициента трения качения.
5. От чего зависит коэффициент трения скольжения?
6. Выведите теорию лабораторной работы №18а.
7. Каков физический смысл коэффициента трения качения?
8. От чего зависит коэффициент трения качения?
9. Как можно объяснить возникновение трения качения?
10. Выведите формулу силу трения качения.
11. Как зависит коэффициент трения скольжения от длины наклонной плоскости, угла ее наклона, времени движения бруска, ускорения свободного падения?

ЛИТЕРАТУРА

27. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 8,12,13.
28. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 15,20,21,22,24.
29. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.3.1, I.3.3, I.3.4.
30. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002, - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №21
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Колебания - это процесс, при котором система через определенное время возвращается в некоторое исходное состояние и затем проходит все последующие состояния в определенном порядке. Их отличие от всех других процессов состоит в повторяемости. Простейшими и одними из важнейших видов являются гармонические колебания. Это определяется не только тем, что они часто встречаются в технике, но и тем, что периодические процессы могут быть представлены в виде сумм нескольких гармонических колебаний (методом разложения в ряд Фурье). При гармонических колебаниях величины, описывающие колебательный процесс (при механических колебаниях - смещение маятника из положения равновесия x, скорость и ускорение) изменяются по закону синуса или косинуса. При этом уравнение кинематики имеет вид

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

или

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

где A - амплитуда колебаний, т.е. максимальное значение, которое может принимать величина смещения x, ω-круговая или циклическая частота, т.е. количество колебаний за 2π секунд. Она связана с периодом Т и частотой ν следующими соотношениями: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$. /2/

$\omega t + \varphi_O$ -фаза колебаний, которая определяет координату x в момент времени t, φ_O - начальная фаза, т.е. фаза в момент времени t=0, T - период колебаний - время одного полного колебания, ν- частота, т.е. число колебаний, совершаемых за 1 с. Размерность ν в системе СИ [ν]=1 Гц=1с$^{-1}$. Скорость v колеблющейся материальной точки и ускорение также изменяются по гармоническому закону: $v = \frac{dx}{dt} = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0)$, /3/

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

причем фаза скорости на $\frac{\pi}{2}$, а фаза ускорения на π больше, чем фаза смещения $\omega t + \varphi_O$. Из /1/ и /4/ вытекает, что $a = \omega^2 x$. /5/

Следовательно, при гармоническом колебательном движении ускорение точки прямо пропорционально её смещению из положения равновесия и направлено в сторону, противоположную смещению. Уравнение динамики, описывающее гармонические колебания имеет вид

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad \text{или} \quad m\frac{d^2x}{dt^2} = -m\omega^2 x, \qquad /6/$$

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

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

есть дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний. Решением этого уравнения являются функции вида /1/ или /1а/. Условию /6/ удовлетворяют, например, упругие силы, которые согласно закону Гука, прямо пропорциональны величине абсолютной деформации, т.е. смещению из положения равновесия: $F = kx$. /8/

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

Из /6/ и /8/ следует, что в случае гармонических колебаний, совершаемых под действием упругих сил, например колебание груза, подвешенного на пружине, уравнение динамики имеет вид

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx, \qquad /9/$$

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

и $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, /11/

где k - коэффициент жесткости пружины, а m - масса подвешенного груза. Квадрат периода упругих колебаний пружинного маятника прямо пропорционален массе подвешенного груза

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k}m. \qquad /12/$$

Формула /12/ получена для идеализированного случая, когда пружина невесома. С учетом массы пружины формула /12/ переходит в

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} m + T_0^2, \qquad /13/$$

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

$$T = \frac{t}{n}. \qquad /14/$$

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

3.Построить график зависимости $T^2 = f(m)$, рис.21.1, проведя прямую через экспериментальные точки наилучшим образом. Используя две любые, возможно более далеко стоящие друг от друга, точки на графике, определить коэффициент жесткости пружины по формуле

$$k = 4\pi^2 \frac{m_2 - m_1}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad /15/$$

4.Определить коэффициент жесткости пружины, используя закон Гука /8/ по формуле

$$k = \frac{F_2 - F_1}{\Delta x_2 - \Delta x_1}. \qquad /16/$$

Для этого установить указатель пружины в некоторое положение, принимаемое в дальнейшем за нулевое. Измерить величину абсолютной деформации Δx пружины, нагруженной грузами различной массы m. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. По полученным данным построить график зависимости $\Delta x = f(F)$, рис.21.2, и рассчитать среднее значение k по формуле /16/

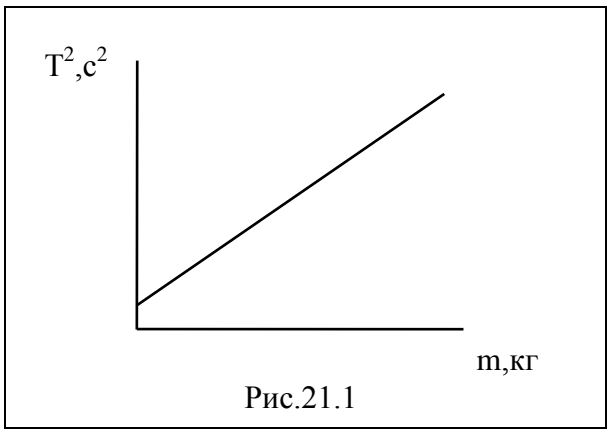


Рис.21.1

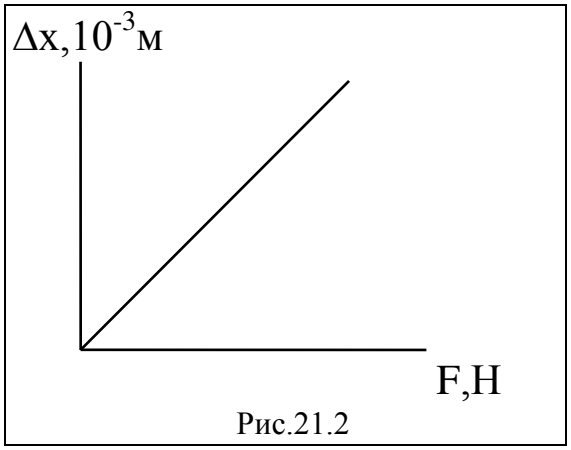


Рис.21.2

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называются периодическим?
2. Какое движение называется колебательным (колебанием)?
3. Что такое гармоническое колебательное движение? Запишите уравнения кинематики и динамики гармонически колеблющегося тела?
4. Как зависят от времени скорость и ускорение при гармоническом колебательном движении?
5. Что называется периодом, частотой, фазой, амплитудой колебаний? В каких единицах измеряются эти величины?
6. Какому условию должна удовлетворять возвращающая сила, чтобы колебания, совершаемые под действием этой силы, были гармоническими. Приведите примеры таких сил.
7. Запишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний.
8. Что такое коэффициент жесткости пружины? В каких единицах измеряется коэффициент жесткости пружины?
9. От каких параметров зависит коэффициент жесткости пружины?
10. Какие закономерности использованы в лаб. раб. N21 для измерения коэффициента жесткости пружины?

ЛИТЕРАТУРА.

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

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

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

Колебания физического маятника описываются основным законом динамики вращательного движения $$\mathcal{E} = \frac{M}{J}, \qquad /1/$$

где $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ - угловое ускорение, φ - угол отклонения; M - суммарный момент внешних сил; J_O - момент инерции маятника относительно оси вращения O.

Возвращающей силой в данной системе является сумма двух сил - силы реакции опоры и силы тяжести, приложенных к центру масс.

Вращающий момент, стремящийся вернуть маятник в положение равновесия, создается только силой тяжести и направлен вдоль оси колебаний

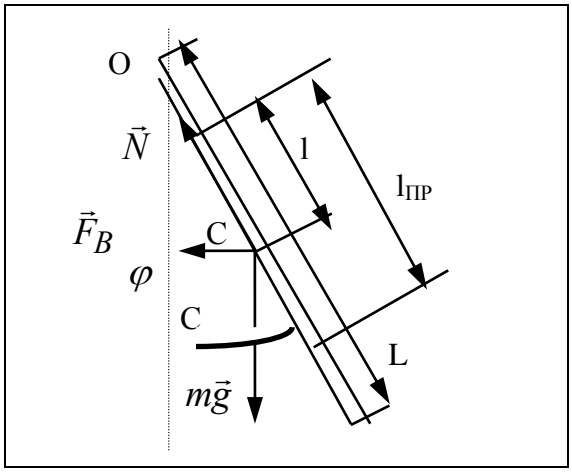


Рис.22.1

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

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

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

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

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

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

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

которое аналогично уравнению динамики гармонических колебаний (см. методические указания к лабораторной работе №21)

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

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

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

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

Уравнение кинематики в этом случае имеет вид

$$\varphi = \varphi_o \sin(\omega t + \alpha_o)\,. \qquad /8/$$

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

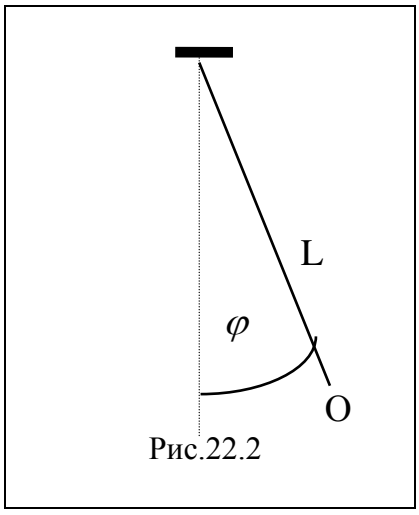


Рис.22.2

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

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

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

Тогда из /9/ и /10/ следует, что период колебаний математического маятника равен $$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\,. \qquad /11/$$

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

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

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

Рассмотрим маятник в виде стержня постоянного сечения. Его момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно стержню, равен

$$J_c = \frac{1}{12} mL^2 . \qquad /13/$$

Используя теорему Штейнера

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

где l - расстояние от оси вращения до параллельной ей оси, проходящей через центр масс, и пренебрегая моментом инерции подвижной опоры, получим $J_0 = \frac{1}{12} mL^2 + ml^2 .$ /15/

Приведенная длина рассматриваемого маятника равна $1_{np} = \frac{L^2}{12l} + l .$ /16/

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

Подставляя /16/ в /12/ и далее в /9/ получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}\left(\frac{L^2}{12l} + l \right)} . \qquad /17/$$

Если период колебаний математического маятника /11/ монотонно возрастает с увеличением длины нити l, то период колебаний стержня зависит от l более сложным образом. В подкоренном выражении формулы /17/ с увеличением расстояния от оси вращения до центра масс первое слагаемое убывает, а второе возрастает так, что T имеет минимум при l_{MIN}, определяемым из выражения

$$\frac{d}{dl}\left(\frac{L^2}{12l} + l \right) = -\frac{L^2}{12l} + 1 = 0, \qquad /18/$$

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

В том случае, если физический маятник представляет собой сплошной диск радиуса R, формулы /13/, /15/, /16/, /17/, /18/ принимают вид /20/, /21/, /22/, /23/, /24/ соответственно:

$$J_c = \frac{1}{2} mR^2 ; \qquad /20/$$

$$J_0 = \frac{1}{2} mR^2 + ml^2 ; \qquad /21/$$

$$1_{np} = \frac{R^2}{2l} + l ; \qquad /22/$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}\left(\frac{R^2}{2l} + l \right)} ; \qquad /23/$$

$$l_{\min} = \frac{R}{\sqrt{2}} . \qquad /24/$$

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

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

3.С помощью секундомера определить время t нескольких n (30...50) полных колебаний. Занести данные в таблицу результатов наблюдений. Определить период колебаний маятника по формуле $T = \frac{t}{n}$. /25/.

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

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

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

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое физический маятник?
2. От чего зависит период колебаний физического маятника?
3. От чего зависит период колебаний физического маятника в случае колебаний с большой амплитудой?
4. Запишите уравнение динамики физического маятника для колебаний большой амплитуды и колебаний малой амплитуды.
5. Что такое приведенная длина физического маятника?
6. При каком условии колебания физического маятника можно считать гармоническими?
7. Вычислите период колебаний диска и кольца, подвешенных на оси, проходящей через окружность.
8. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите ее формулу.
9. Нарисуйте график зависимости периода колебаний от расстояния центр масс - точка подвеса.
10. Выведите формулу периода колебаний физического маятника для стержня, диска.
11. Какой закон используется при выводе рабочей формулы в лаб. раб. N22, и какие делаются при этом предложения?
12. Выведите условия минимума периода колебаний физического маятника.
13. Объясните, почему колебания физического маятника будут гармоническими только при малой амплитуде колебаний?

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: ознакомление с теорией колебаний физического маятника и определение момента инерции тела произвольной формы.

Приборы и принадлежности: штатив со стержнем треугольного сечения, треугольная призма, весы с набором разновесов (гирь), секундомер, уровень, шатун двигателя внутреннего сгорания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В динамике вращательного движения инертность тел зависит не только от массы тела, но и от его размеров и распределения масс в пространстве относительно оси вращения. Мерой инертности в этом случае является момент инерции тела J. Для произвольного тела он определяется как сумма произведений масс материальных точек, слагающих тело, и квадратов расстояний этих материальных точек от оси вращения

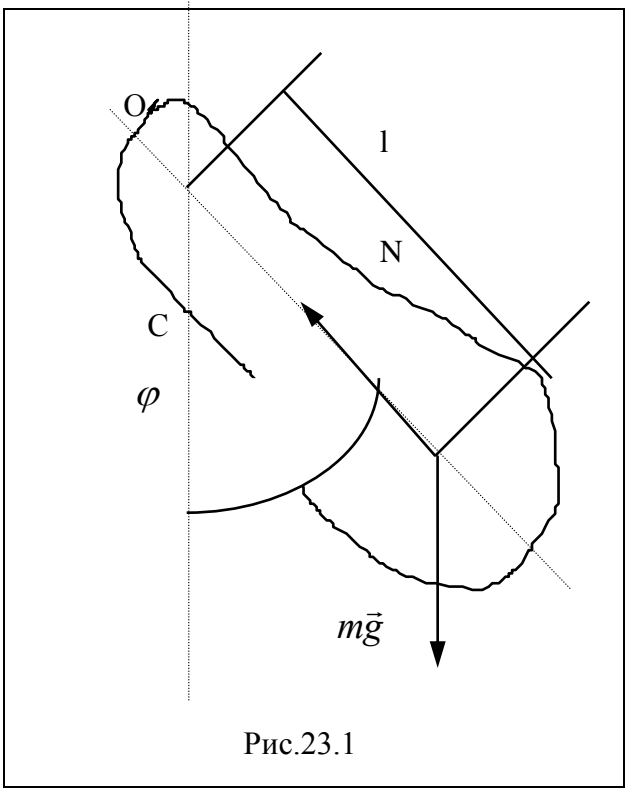


Рис.23.1

$$J = \sum r_i^2 \Delta m_i . \qquad /1/$$

В случае непрерывного распределения массы тела в пространстве задача нахождения момента инерции может быть решена методами интегрального исчисления

$$I = \int r^2 \rho dV , \qquad /2/$$

где ρ - плотность тела в данном элементарном объеме; r - расстояние по перпендикуляру от оси вращения до элемента объема dV. В большинстве случаев нахождение интеграла (2) представляет трудности. Лишь для некоторых тел правильной геометрической формы эта задача может быть решена аналитически. Особенно просто она решается при определении моментов инерции тел симметричных относительно осей, проходящих через центр масс. Если ось не проходит через центр масс, используют теорему Штейнера, согласно которой

$$J = J_O + ml^2 , \qquad /3/$$

где J - момент инерции относительно некоторой оси, J_O - момент инерции относительно оси, параллельной исходной и проходящей через центр масс; m - масса тела, d - расстояние по перпендикуляру между осями.

В настоящей работе для нахождения момента инерции тела произвольной формы (шатуна) относительно оси, проходящей через центр масс, используется метод качаний. Из теории колебаний физического маятника следует (см. Методические указания к лабораторной работе №22), что уравнение динамики его малых свободных колебаний в отсутствие затухания имеет вид

$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -mql\varphi, \qquad /4/$$

где J - момент инерции, относительно оси вращения 0, 1 - расстояние от центра масс С до оси вращения 0, см. рис.23.1, φ - угол отклонения маятника от вертикального положения равновесия, g - ускорение свободного падения, m - масса маятника. Период колебаний T такого маятника, как показано в теории лабораторной работы №22, равен $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mql}}$, /5/

откуда $$J = \frac{mql}{4\pi^2}T^2 \qquad /6/$$

Тогда момент инерции маятника относительно оси, параллельной оси вращения и проходящей через центр масс С, как следует из /3/ и /4/, равен

$$J_c = J - ml^2 = mql\frac{T^2}{4\pi^2} - ml^2 = mql(\frac{T^2}{4\pi^2} - \frac{l}{q}). \qquad /7/$$

Массу шатуна определяют с помощью весов, период колебаний шатуна относительно оси вращения О также может быть измерен непосредственно по времени нескольких качаний. Расстояние *l* от центра масс до оси вращения определяют из условия равновесия тела, имеющего ось вращения $\sum M_i = 0$, где $M_i = r_i F_i$ - момент сил, действующих на тело. Если маятник установлен так, как показано на рис.23.2, то $mqc = Nd$, /8/

где N - реакция опоры (призмы 5, рис.23.2), ($N = F - m_1 g$), где m_1 - масса призмы (2) и

$$c = l - r, \qquad /9/$$

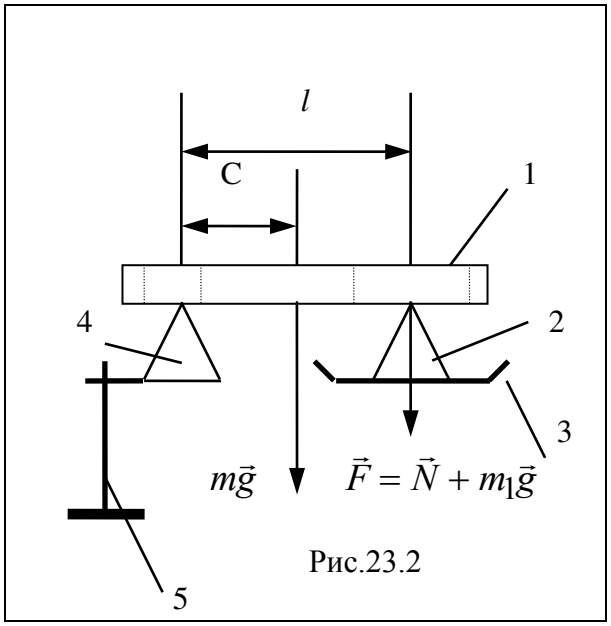


Рис.23.2

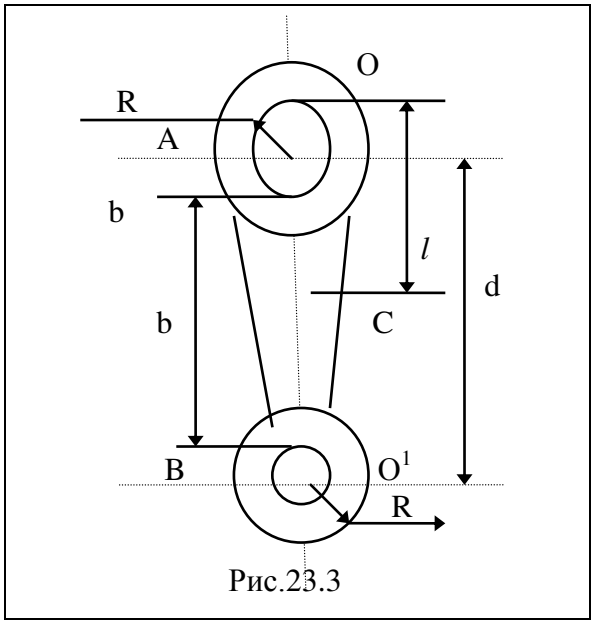


Рис.23.3

$$d = r + b + R, \qquad /10/$$

откуда $$l = \frac{F - m_1 q}{mq}d + r, \qquad /11/$$

если шатун подвешивают на малое «кольцо» радиуса r, а на чашку весов кладут «большое» кольцо. В случае, если подвесить шатун на «большое» кольцо радиуса R, а на чашку весов положить малое «кольцо» радиуса r, формула /11/ приобретает вид

$$l_1 = \frac{F_1 - m_1 q}{mq} d + R. \qquad /12/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Определить массу шатуна взвешиванием на весах.

2.Установить шатун прорезью А на «большом» кольце (см. рис.23.3) на призму (2), положенную на чашку весов (3), а прорезью В на «малом» кольце на стержень треугольного сечения (4), закрепленный в зажиме штатива (5). С помощью уровня, положенного на шатун изменением высоты стержня (4), рис.23.2, добиться того, чтобы шатун находился в горизонтальном положении в том случае, когда чашки весов находятся на одной высоте; т.е. весы уравновешены. После этого уровень снять. Помещая на правую чашку разновесы, уравновесить весы и определить силу F, действующую на левую чашку.

3.Определить массу m_1 призмы (2) взвешиванием на весах.

4.Штангенциркулем измерить R, r и d (см. рис.23.3.) и рассчитать l по формуле /11/. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Повесить шатун на треугольный стержень, укрепленный на штативе так, чтобы ось вращения проходила через точку О «малого» кольца (см. рис.23.3). Отклонить маятник на небольшой угол, предоставив ему возможность совершать колебательное движение. Определить период T колебаний за время t нескольких (N= 50...100) колебаний по формуле $T = t/N$. Опыт повторить три раза и определить среднее значение периода. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

6.Определить момент инерции шатуна по формуле /7/. Проделать измерения по п.п. 2...5 для случая, когда ось вращения проходит через точку O^1 «большого» кольца (см. рис.23.3). Результаты сравнить.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ.

m, кг	F, Н	m_1, кг	r, 10^{-2}м	R ,10^{-2}м	в, 10^{-2}м	1,10^{-2}м	n	t, с	T, с

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое физический маятник?
2. От чего зависит период колебаний физического маятника?
3. От чего зависит период колебаний физического маятника в случае колебаний с большой амплитудой?
4. Запишите уравнение динамики физического маятника для колебаний большой амплитуды и колебаний малой амплитуды.
5. Что такое приведенная длина физического маятника?
6. При каком условии колебания физического маятника можно считать гармоническими?
7. Вычислите период колебаний диска и кольца подвешенных на оси, проходящей через окружность.
8. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите ее формулу.
9. Нарисуйте график зависимости периода колебаний от расстояния центр масс - точка подвеса.
10. Выведите формулу периода колебаний физического маятника для стержня, диска.
11. Какой закон используется при выводе рабочей формулы в лаб. раб. N23, и какие делаются при этом предложения?
12. Объясните, почему колебания физического маятника будут гармоническими только при малой амплитуде колебаний?

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

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

Цель работы: определение ускорения силы тяжести.

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

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

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

$$F_T = \gamma \frac{M_3 m}{R_3^2}, \qquad /2/$$

где F_T - сила тяготения; γ - гравитационная постоянная; M_3 - масса Земного шара; R_3 - средний радиус Земного шара. В этом случае ускорение свободного падения

$$a = g = \gamma \frac{M_3}{R_3^2}. \qquad /3/$$

Используя табличные данные γ = 6,672·10^{-11} м^3 кг$^{-1}$ с$^{-2}$, M_3 = 5, 975·10^{24} кг и R_3 = 6,371·10^6 м можно рассчитать среднее значение g теоретически.

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

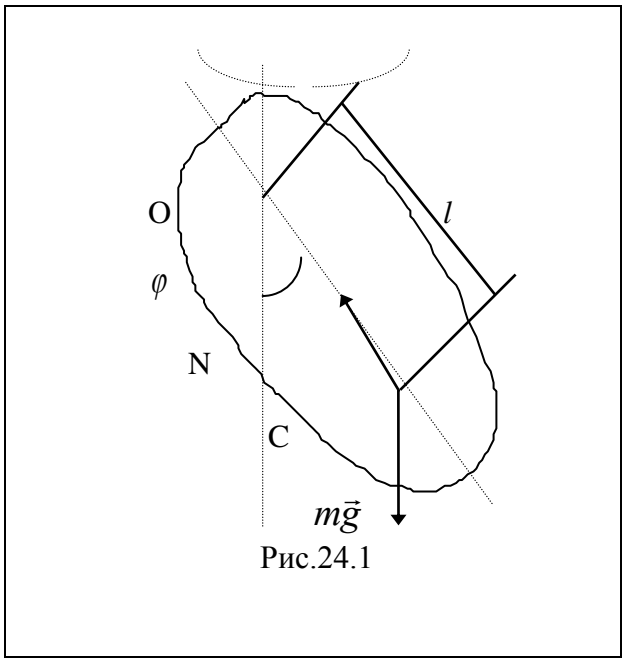


Рис.24.1

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

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

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

где J - момент инерции маятника относительно оси вращения; d - расстояние от центра масс до оси вращения. В случае математического маятника $I = ml^2$ и $d = l$, следовательно

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad /5/$$

Измеряя T и l можно определить ускорение свободного падения. Прямое измерение длины маятника затруднено из-за низкой точности определения абсолютного положения центра шара с помощью треугольника (см. рис.24.2, 24.3) и неудобства определения расстояния от точки подвеса до центра шара ($l_i \approx 2{,}5$ м, рис.24.2). Если положение шара X_i отсчитывать от некоторой произвольно выбранной точки, например нулевого деления вертикальной масштабной линейки, см. рис.24.3, то поскольку

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

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

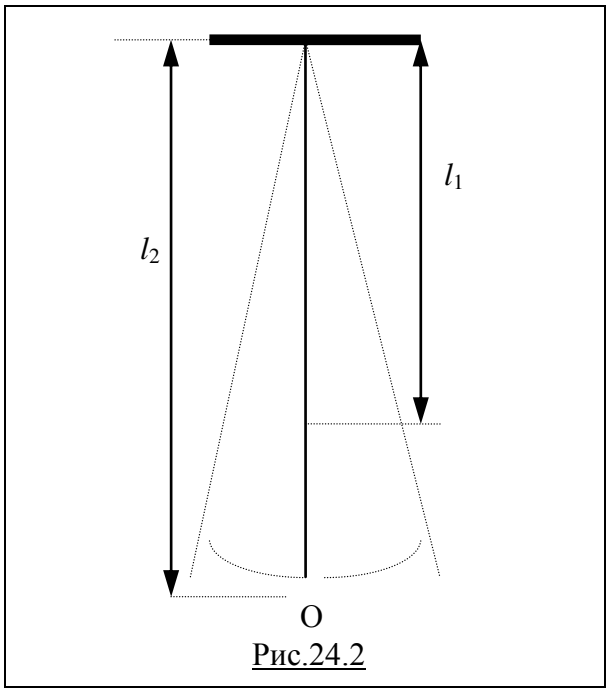


Рис.24.2

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

Ее график представлен на рис.24.4. Тогда для нахождения g может быть использована формула

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

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

Данная лабораторная работа может быть выполнена в варианте №24а с использованием формулы /5/ на настольной установке (рис.24.5). Основание (1) оснащено винтами (2) для регулировки вертикальности колонны (3). Верхний l_O кронштейн для крепления маятника (4) неподвижен. Длина маятника изменяется с помощью воротка (5).

Измерение числа периодов и времени колебаний производится секундомером (6), связанным с фото-электрическим датчиком (7), установленном на нижнем

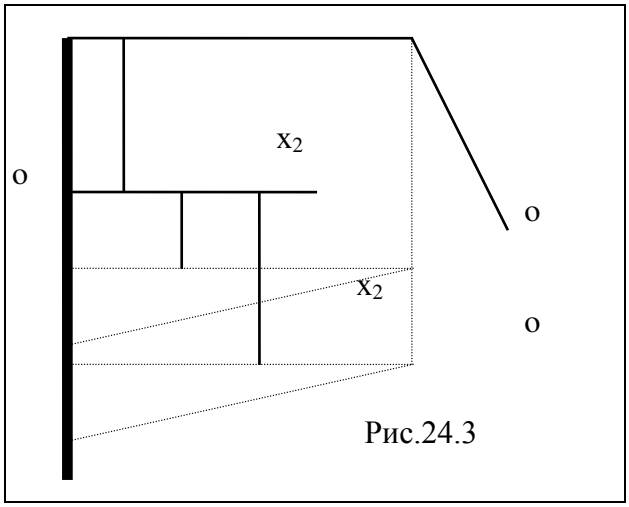


Рис.24.3

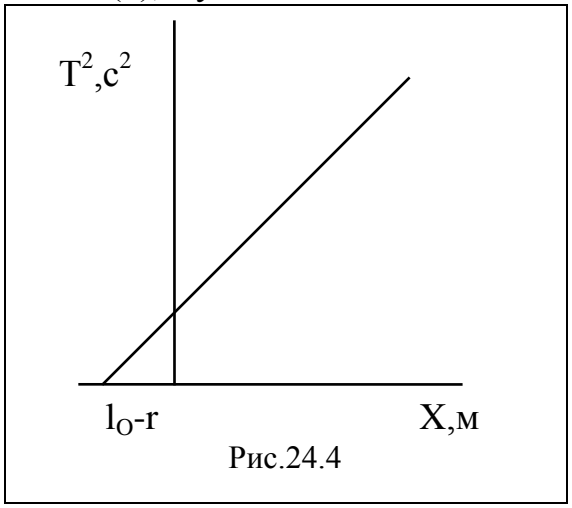


Рис.24.4

кронштейне. Отпуская зажимной винт можно изменять положение нижнего кронштейна до совпадения штрихов на фотоэлектрическом датчике и шаре.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (ВАРИАНТ №24)

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

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

$$T = \frac{t}{n}. \qquad /9/$$

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (ВАРИАНТ №24а)

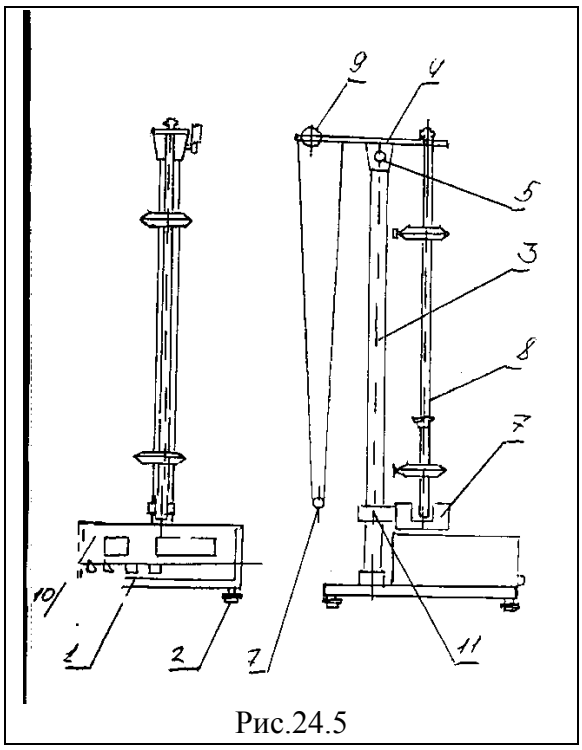


Рис.24.5

1. Установить с помощью винтов (2) колонну (3) в вертикальное положение, рис.24.5.
2. Установить длину маятника ~0,5 м воротком (5).
3. Установить нижний кронштейн с фотодатчиком до совпадения штрихов на датчике и шаре. Измерить длину маятника l линейкой на колонне.
4. Привести маятник в движение, отклонив его на 5...7°. Включить кнопку «сеть». Нажать кнопку «сброс». Нажатием кнопки «стоп» измерить время, соответствующее n = 15...20 колебаниям. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. Рассчитать величину периода колебаний по формуле /9/ Эксперимент повторит 6...8 раз.

Рассчитать величину ускорения свободного падения по формуле $$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \qquad /10/$$

5. Найти среднее значение ускорения свободного падения и среднюю абсолютную погрешность измерений, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», см. формулу /11/ $$\Delta g_{cp} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta g_i)^2}{n(n-1)}}. \qquad /11/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид движения называется свободным падением?
2. От каких факторов зависит ускорение свободного падения?
3. Что такое сила тяготения, сила тяжести и вес тела?
4. Как и почему изменяется ускорение свободного падения с изменением высоты над поверхностью Земли?
5. Как и почему изменяется ускорение силы тяжести с изменением географической широты?
6. Что такое математический маятник?
7. Почему угол отклонения маятника должен быть малым?
8. Выведите формулу для определения периода колебаний математического маятника.
9. Запишите уравнение динамики колебаний и уравнение динамики малых колебаний физического и математического маятников.
10. Нарисуйте график зависимости квадрата периода колебаний от координаты шара и дайте определение характерным элементам графика.
11. Как теоретически вычислить значение g?

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №25
ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: исследование закономерностей изменения амплитуды затухающих колебаний в зависимости от сопротивления среды и определение логарифмического декремента затухания и коэффициента затухания.

Приборы и принадлежности: маятник со сменными дисками различного радиуса, шкала с подвижным рейтером для измерения амплитуды колебаний, секундомер.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В теории работы № 21 показано, что уравнение динамики для свободных гармонических колебаний, совершаемых под действием упругих или квазиупругих внутренних сил системы, имеет вид

$$m\bar{a} = \bar{F}_{упр}, \qquad /1/$$

или

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \qquad /2/$$

Соответствующее дифференциальное уравнение гармонического колебательного движения имеет вид

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0, \qquad /3/$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - частота свободных колебаний системы; k - коэффициент жесткости пружины; m - масса системы.

Решением этого уравнения являются функции вида

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0); \qquad /4/$$

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0^i). \qquad /4a/$$

В реальной колебательной системе, помимо упругих сил, действуют силы сопротивления, на преодоление которых расходуется энергия колебательной системы

$$W = \frac{m}{2}\omega^2 A^2. \qquad /5/$$

Поэтому энергия колебаний уменьшается, а с ней уменьшается и амплитуда колебаний, т.к. энергия колебательной системы пропорциональна квадрату амплитуды. Такие колебания называются затухающими.

Во многих случаях силы сопротивления, возникающие при движении колеблющейся точки в среде, при небольших скоростях движения прямо пропорциональны величине скорости

$$F_{conp} = -rv = -r\frac{dx}{dt}, \qquad /6/$$

где r - коэффициент сопротивления. При наличии сопротивления второй закон динамики поступательного движения запишется в виде

$$m\bar{a} = \bar{F}_{conp} + \bar{F}_{упр}, \qquad /7/$$

или

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -r\frac{dx}{dt} - kx. \qquad /8/$$

Соответствующее дифференциальное уравнение затухающих колебаний имеет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \qquad /9/$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - круговая частота незатухающих колебаний и $\beta = \frac{r}{2m}$ - коэффициент затухания.

Решением уравнения /9/ является функция вида: $x = A_0\ell^{-\beta t}\sin(\omega t + \varphi_0)$, /10/

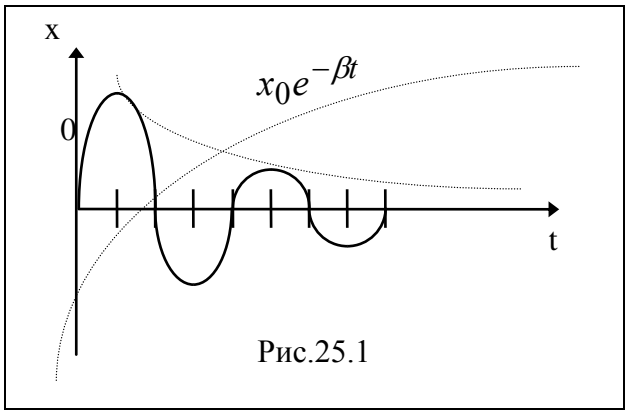


Рис.25.1

где $\omega = \sqrt{\omega_o^2 - \beta^2}$ - круговая частота затухающих колебаний,

$A = A_0\ell^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний, уменьшающихся со временем по экспоненциальному закону; A_O - амплитуда в момент времени t=0. График зависимости смещения X от времени t для затухающих колебаний представлен на рис.25.1.

Натуральный логарифм отношения амплитуд двух последующих колебаний характеризует быстроту убывания амплитуды со временем иназывается логарифмическим декрементом затухания

$$\delta = Ln\frac{A_n}{A_{n+1}}. \qquad /11/$$

Он связан с периодом колебаний T и коэффициентом затухания β соотношением

$$\delta = Ln\frac{A_0\ell^{-\beta t}}{A_0\ell^{-\beta(t+T)}} = \beta t. \qquad /12/$$

В работе необходимо определить логарифмический декремент затухания для маятников в форме дисков различного радиуса, прикрепленных к стержню, способному совершать колебательное движение вокруг оси подвеса.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1.Отклонить маятник из положения равновесия до 50-60 деления по шкале. Это отклонение соответствует начальной амплитуде A_0. Предоставить маятнику возможность совершать колебания, измеряя 5..7 амплитуд колебаний. Для этого необходимо мелом отмечать на шкале деления, против которых останавливается маятник. Данные занести в таблицу результатов измерений.

2.Привести маятник в колебательное движение. Измерить время t нескольких (n=8...10) колебаний. Определить период колебаний по формуле T=t/n.

3.Проделать измерения по п.п. 1,2, установив на маятник сменные диски другого радиуса.

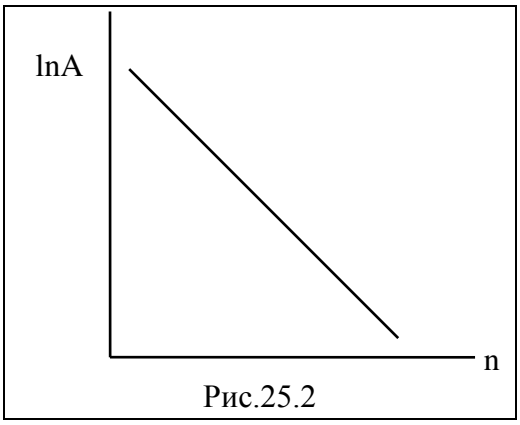


Рис.25.2

4.Для всех случаев по результатам измерений построить (на одном листе миллиметровой бумаги) графики зависимости $LnA_n = f(n)$, (Рис.25.2), где n -порядковый номер амплитуды колебания. Этот график в координатах LnA и n представляет прямую линию, которая проводится через экспериментальные точки так, чтобы они наилучшим образом удовлетворяли этой прямой.

5. Для каждого маятника рассчитать логарифмический декремент затухания по формуле

$$\delta = \frac{LnA_{n1} - LnA_{n2}}{n_2 - n_1} / \qquad /13/$$

По полученным периодам колебаний и значениям логарифмического декремента вычислить величины коэффициентов затухания для каждого маятника по формуле /12/.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

	R_1, м		R_2, м		R_3, м	
n	A, дел	LnA	A, дел	LnA	A, дел	LnA
1						
2						
7						
8						
T, c						
δ						
β, c^{-1}						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое колебательное движение?
2. Запишите уравнение динамики гармонических колебаний, уравнение скорости и уравнение ускорения гармонических колебаний.
3. Что такое период, частота, фаза, амплитуда колебаний?
4. Запишите уравнение динамики затухающих колебаний.
5. Запишите уравнение кинематики затухающих колебаний и нарисуйте его график.
6. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний.
7. Что такое коэффициент и логарифмический декремент затухания? В каких единицах они измеряются?
8. Как связаны между собой коэффициент и логарифмический декремент затухания?

9. Что такое добротность системы? В каких единицах они измеряются?
10. Как связаны добротность с логарифмическим декрементом затухания при малом затухании?
11. Как выражаются через параметры колеблющейся системы коэффициент и логарифмический декремент затухания?
12. Как связаны частоты собственных гармонических и затухающих колебаний?

ЛИТЕРАТУРА

15. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 140,141,142,146.
16. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 49,50,52,53,54,58;
17. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § , § I.V.1.2, IV.1.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 28
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: экспериментальное определение моментов инерции тел относительно различных осей.

Приборы и материалы: экспериментальная установка «Крутильный маятник», куб, квадратный и разносторонний прямоугольные параллелепипеды.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Одной из основных характеристик твердого тела является его момент инерции – мера инертности тел при вращательном движении. Момент инерции твердого тела равен

$$J = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 \Delta m_i , \qquad /1/$$

а при непрерывном распределении масс

$$J = \int_V \rho r^2 dV , \qquad /2/$$

где ρ - плотность вещества в элементе объема dV, находящемся на расстоянии r от оси вращения; V – объем тела.

Формулу /2/ используют для вычисления моментов инерции тел правильной формы относительно оси симметрии. Для тел неправильной формы используют экспериментальные методы.

Установим связь между величинами моментов инерции тела относительно осей вращения, пересекающихся в одной точке.

Выберем начало координат в точке О твердого тела на оси вращения ОА (рис.28.1). С осями координат X,Y,Z ось вращения ОА образует углы α, β, γ соответственно.

Момент инерции тела относительно оси ОА равен

$$J = J_x \cos^2\alpha + J_y \cos^2\beta + J_z \cos^2\gamma - \\ - 2J_{xy}\cos\alpha\cos\beta - 2J_{xz}\cos\alpha\cos\gamma - 2J_{yz}\cos\beta\cos\gamma , \qquad /3/$$

где $J_x = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i (y^2 + z^2)$, $J_y = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i (x^2 + z^2)$, $J_z = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i (y^2 + x^2)$ - моменты инерции тела относительно осей координат; а $J_{xy} = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i xy$,

$J_{xz} = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i xz$, $J_{zy} = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i zy$ - центробежные моменты инерции тела.

Оси, для которых справедливо соотношение

$$J = J_x \cos^2 \alpha + J_y \cos^2 \beta + J_z \cos^2 \gamma, \qquad /4/$$

называются главными осями инерции в точке А. Если точка А выбрана в центре масс тела, то такие оси называются главными центральными осями инерции. Для однородных симметричных тел главные центральные оси инерции являются осями симметрии тела.

В лабораторной работе экспериментальное определение момента инерции производится методом крутильных колебаний. Уравнение динамики колебаний крутильного маятника имеет вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} J = -f\varphi, \qquad /5/$$

откуда период колебаний крутильного маятника равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{f}}, \qquad /6/$$

где J – момент инерции тела; а f – модуль кручения нити подвеса. Из формулы /6/ вытекает, что отношение момента инерции к квадрату периода для случая колебаний рамки, рамки с кубом и рамки с телом - постоянная для данного прибора величина

$$\frac{J_P}{T_P^2} = \frac{f}{4\pi^2}, \quad \frac{J_{PK}}{T_{PK}^2} = \frac{f}{4\pi^2}, \quad \frac{J_{PT}}{T_{PT}^2} = \frac{f}{4\pi^2}. \qquad /7/$$

Из этих формул с учетом того, что момент инерции куба относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно грани равен $J = (m_K a_K^2)/6$, где m_K - масса куба, a_K - его ребро, а так же того факта, что момент инерции системы равен сумме моментов инерции ее частей, следует

$$J_T = \frac{m_K a_K^2}{6} \frac{(\frac{T_{PT}^2}{T_P^2} - 1)}{(\frac{T_{PK}^2}{T_P^2} - 1)}. \qquad /8/$$

Экспериментальная установка для определения моментов инерции тел представляет собой крутильный маятник (рис.28.2). На ее основании, имеющем четыре регулируемых по высоте ножки (2), установлен электронный блок управления с секундомером (1). К основанию прикреплена колонна (3) с тремя кронштейнами (4), (5), (6). Верхний и нижний кронштейны имеют зажимы для закрепления стальной проволоки, на которой подвешена рамка (7). На среднем кронштейне закреплены фотоэлектрический датчик (9), электромагнит (10) и угловая шкала (11). Положение электромагнита на плите можно изменять и фиксировать относительно фотоэлектрического датчика по угловой шкале.

Конструкция рамки позволяет закрепить грузы (12) в виде призм при помощи подвижной балки, которая перемещается по направляющим между неподвижными балками. Подвижная балка фиксируется неподвижно путем затягивания гаек на зажимных втулках, установленных на подвижной балке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Установить электромагнит в заданном положении, зафиксировав его гайкой.

2.Нажать кнопку “Сеть” блока управления. При этом наблюдается свечение цифровых индикаторов, и включается ток в обмотке электромагнита.

3.Для определения периода крутильных колебаний рамки прибора T_P повернуть ее до фиксации стрелки на электромагните. Включить секундомер нажатием кнопки “Пуск”. Произвести измерение времени t и числа n колебаний (удобно выбирать 10 колебаний) и остановить секундомер нажатием кнопки “Стоп” после того, как на цифровом индикаторе числа колебаний появляется цифра n-1. После снятия результатов измерения нажать кнопку “Стоп”. Повторить измерения 5

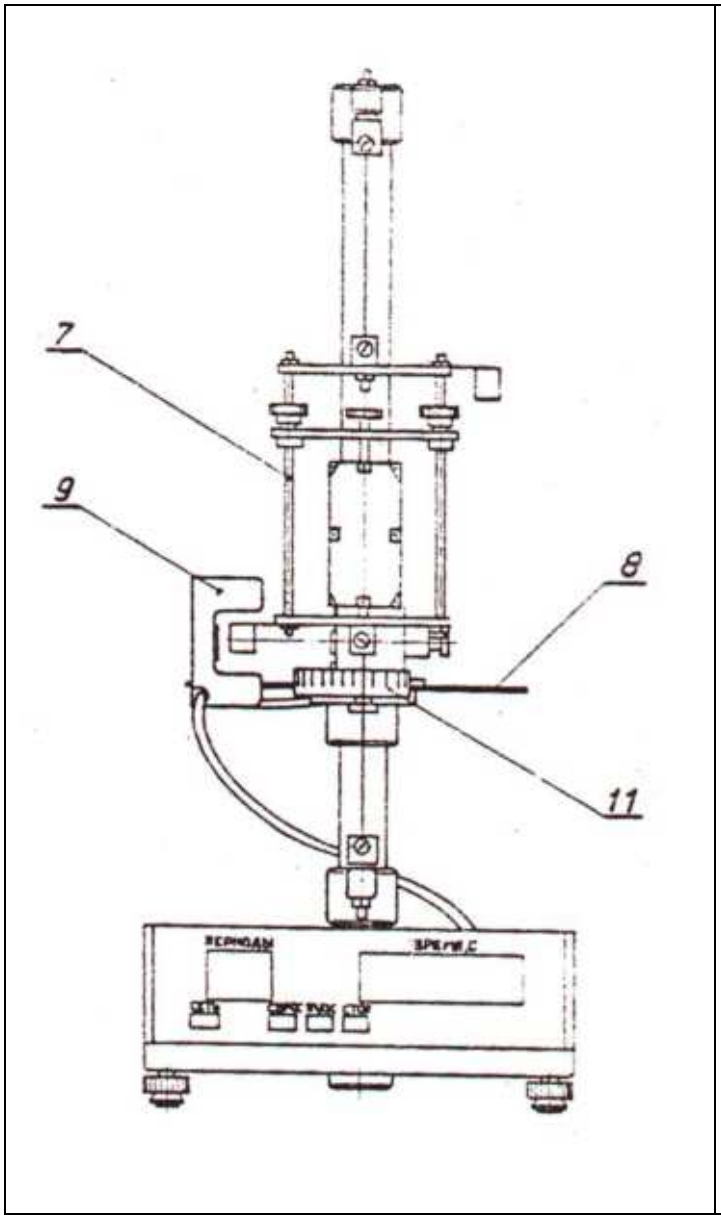


Рис.28.1

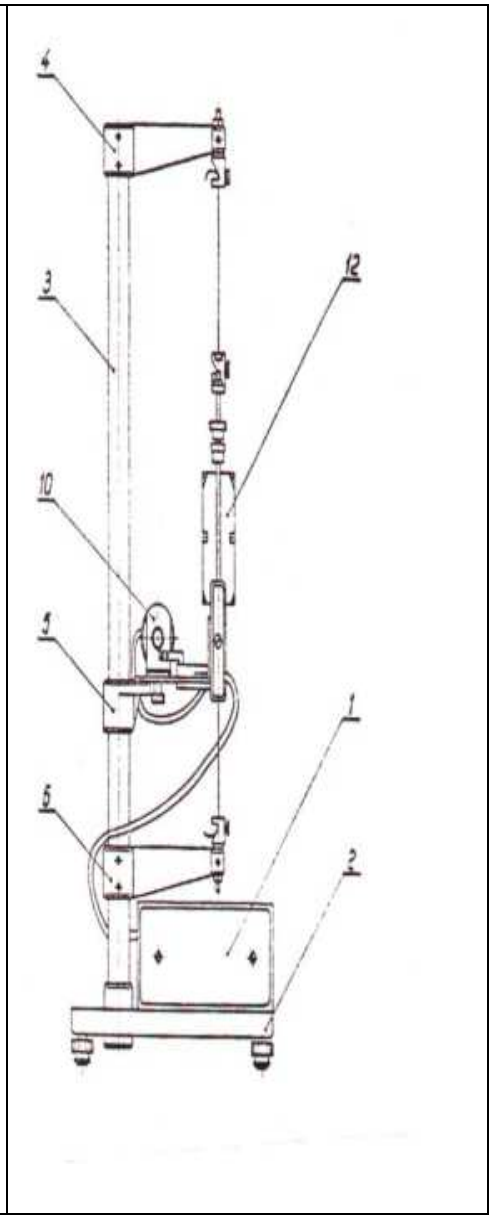


Рис.28.2

раз. Определить период колебаний рамки T_p по формуле $T = t/n$. Результаты занести в таблицу результатов измерений.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Установить электромагнит в заданном положении, зафиксировав его гайкой.

2.Нажать кнопку “Сеть” блока управления. При этом наблюдается свечение цифровых индикаторов, и включается ток в обмотке электромагнита.

3.Для определения периода крутильных колебаний рамки прибора T_P повернуть ее до фиксации стрелки на электромагните. Включить секундомер нажатием кнопки “Пуск”. Произвести измерение времени t и числа n колебаний (удобно выбирать 10 колебаний) и остановить секундомер нажатием кнопки “Стоп” после того, как на цифровом индикаторе числа колебаний появляется цифра n-1. После снятия результатов измерения нажать кнопку “Стоп”. Повторить измерения 5

раз. Определить период колебаний рамки $T_р$ по формуле $T = t/n$. Результаты занести в таблицу результатов измерений.

4.Закрепить в рамке относительно главной центральной оси куб и произвести измерения и вычисления периода колебаний рамки с кубом $T_{рк}$ по п.3. Результаты занести в таблицу результатов измерений.

5.Вставить в рамку параллелепипед (по заданию преподавателя) относительно каждой из трех его главных центральных осей инерции и относительно одной-трех осей /4,5,6/, рис.28.3 (по заданию преподавателя). Произвести измерения и последующие вычисления периодов колебаний рамки с телом $T_{рт}$ относительно каждой из осей по п.3. Результаты занести в таблицу результатов измерений.

6.Записать в рабочий журнал значение массы куба m (указана на кубе) и измерить штангенциркулем величины ребер куба a_K и параллелепипеда a, b, c.

7.По формуле /8/ рассчитать главные центральные моменты инерции $J_{T1}=J_z$, $J_{T2}=J_x$, $J_{T3}=J_y$ и один из моментов инерции J_{T4}, (J_{T5}, J_{T6}) параллелепипеда относительно заданной преподавателем оси.

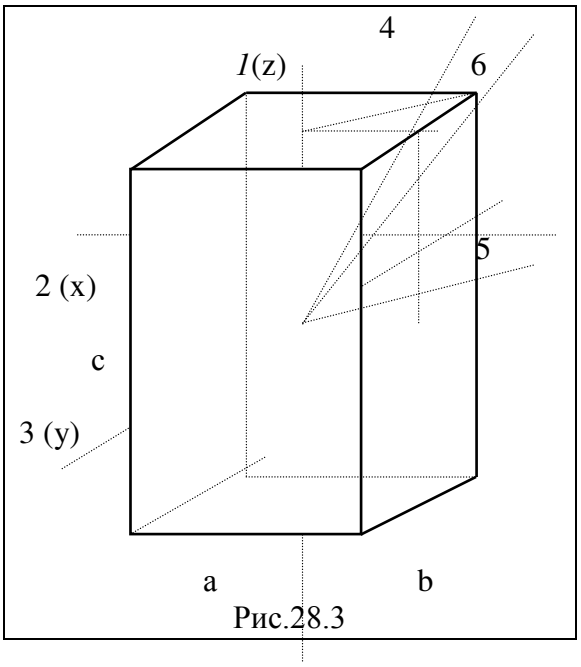


Рис.28.3

8.Вычислить значение момента инерции параллелепипеда относительно выбранной оси через главные центральные моменты инерции параллелепипеда по формуле /4/, которая, с учетом величин направляющих косинусов для соответствующей оси (рис.28.3), приобретает вид

$$J_4 = J_x \frac{a^2}{a^2 + c^2} + J_y \frac{0}{a^2 + c^2} + J_z \frac{c^2}{a^2 + c^2}$$ /9/

$$J_5 = J_x \frac{a^2}{a^2 + b^2} + J_y \frac{b^2}{a^2 + b^2} + J_z \frac{0}{a^2 + b^2}$$ /10/

Величины, рассчитанные по формулам /9/, /10/, /11/ сравнить с аналогичными, полученными по формуле /8/.

$$J_6 = J_x \frac{a^2}{a^2 + b^2 + c^2} + J_y \frac{b^2}{a^2 + b^2 + c^2} + J_z \frac{c^2}{a^2 + b^2 + c^2}.$$ /11/

9.Рассчитать модуль кручения нити по формуле

$$f = \frac{2\pi^2 m_K a_K^2}{3(T_{PK}^2 - T_P^2)}.$$ /12/

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Рамка			Куб				Параллелепипед					
n	t, с	T, с	n	t, с	T, с	J,кгм^2	Ось	n	t, с	T, с	$J_Э$,кгм^2	J_T,кгм^2

m= кг, a_K= 10^{-2}м, a= 10^{-2}м, b= 10^{-2}м, c= 10^{-2}м.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое момент инерции? В каких единицах он измеряется? Запишите общую формулу для вычисления момента инерции твердого тела.
2. Запишите формулу для вычисления моментов инерции стержня, диска, шара, куба.
3. Как связаны моменты инерции тела относительно осей, пересекающихся в одной точке?
4. Что такое главные, центральные и главные центральные оси инерции?
5. Запишите уравнение динамики крутильных колебаний.
6. Запишите формулу периода крутильных колебаний.
7. Запишите формулу для определения момента инерции произвольного тела в лабораторной работе N28.
8. Запишите формулу для определения модуля кручения нити.
9. Что такое оси свободного вращения?

ЛИТЕРАТУРА.

18. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 16, 20, 142.
19. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 38,39, 40, 53, 54;
20. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § I.4.2, IV.1.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

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

где m - масса газа , M - его молярная масса, R - универсальная газовая постоянная (R = $8{,}31695\cdot10^{3}$ Дж·$К^{-1}$·$кмоль^{-1}$) .

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

массе газа с достаточно большим числом молекул, можно считать, что внутреняя энергия идеального газа равна: $$U = \frac{i}{2} NKT = \frac{i}{2}\frac{m}{M} N_A KT = \frac{i}{2}\frac{m}{M} RT, \qquad /2/$$

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

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

откуда вытекает, что температура есть мера внутренней энергии газа.

Согласно закону сохранения энергии в термодинамике количество теплоты ΔQ, подводимое к газу, идет на увеличение его внутренней энергии ΔU и на совершение газом работы A против внешних сил: $$\Delta Q = \Delta U + A. \qquad /4/$$

Молярная теплоемкость газа есть количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля газа на 1 К. Эта величина зависит от рода газа и характера процесса. В том случае, если процесс идет при постоянном объеме (изохорно), A=0, и, как это следует из (3) и (4) в предположении, что m=M, $$C_v = \frac{i}{2} R. \qquad /5/$$

Если процесс в газе изобарный, то исходя из того, что работа равна $A = P\Delta V$. /6/

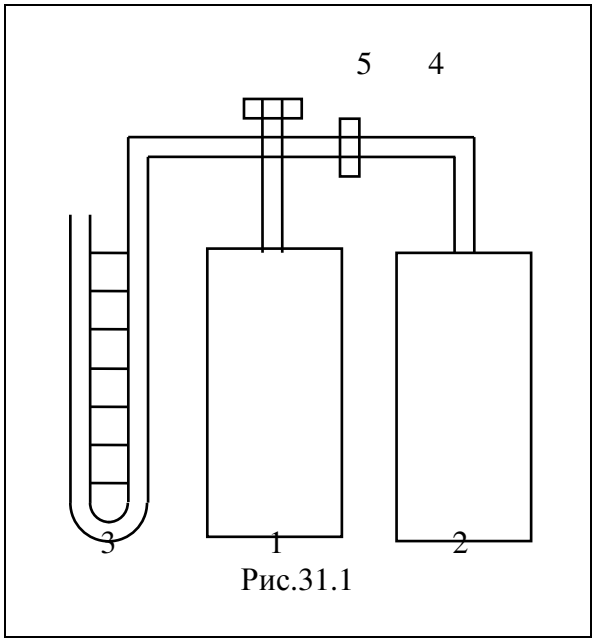


Рис.31.1

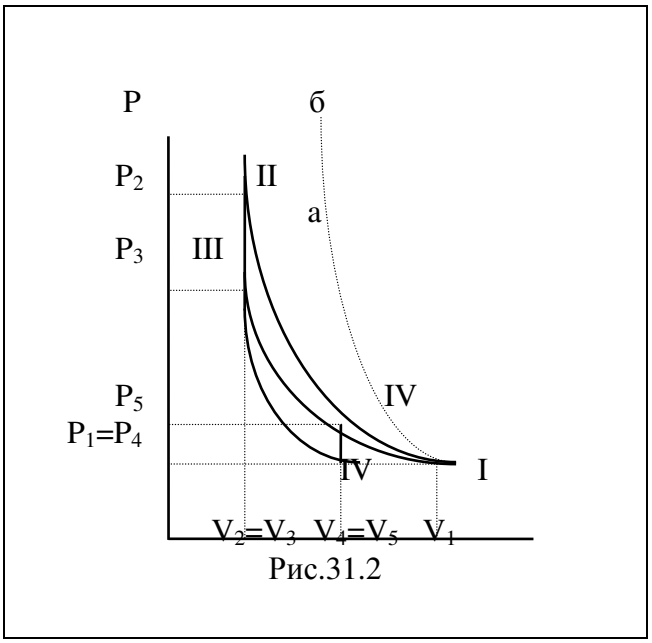


Рис.31.2

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

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

Для воздуха, состоящего практически полностью из кислорода O_2 и азота N_2, молекулы которых состоят из двух атомов, число степеней свободы равно i=5 (3 поступательных и 2 вращательных степени свободы). Откуда γ=1,400. Более точная теория дает для O_2 γ =1,401 и для N_2 γ=1,403, а для воздуха с учетом концентрации O_2 и N_2 γ=1,403.

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

В осях P,V графики газовых процессов, протекающих при работе установки, изображены на рис.31.2. В начальном состоянии I давление газа, его объем и температура равны соответственно P_1, V_1, T_1. Накачка газа в баллон с бесконечно малой скоростью происходит изотермически, т.е. изменение параметров состояния P,V,T описывается кривой (а) на рис.31.2. Если накачка газа производится с бесконечно большой скоростью, т.е. адиабатно, то изменение параметров описывается кривой (б). Практически накачка производится с конечной скоростью и изменение параметров состояния при этом политропном процессе описывается кривой I-II. Переход из состояния II в III является изохорным процессом. Возникающая разность давлений фиксируется манометром. $$P_3 - P_1 = \rho g \Delta h_1 . \qquad /9/$$

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

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

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

$P_3V_3 = P_5V_5$ - изотермический процесс /12/

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

$V_4 = V_5$ - изохорный процесс. /14/

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

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

где P_1 - атмосферное давление. Отсюда вытекает

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

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

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

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

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое идеальный газ? Какие предположения делаются при введении такой модели описания газа?
2. Запишите уравнения связи термодинамических величин и нарисуйте графики изопроцессов идеального газа.
3. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона состояния идеального газа.
4. Сформулируйте закон сохранения энергии в термодинамике и запишите его выражения в общем случае и при различных процессах в идеальном газе.
5. Что такое теплоемкость тела, удельная и молярная теплоемкость вещества? В каких единицах они измеряются?
6. От чего зависит молярная теплоемкость идеального газа?
7. Запишите выражения для молярных теплоемкостей при изохорном и изобарном процессах. Запишите уравнение Майера.
8. Что такое коэффициент Пуассона? Запишите формулу его вычисления.
9. Что такое адиабатный процесс? Как его можно реализовать практически? Запишите выражения для закона сохранения энергии при адиабатном процессе.
10. Запишите уравнения связи термодинамических параметров при адиабатном процессе и нарисуйте его график в осях давление-объем.
11. Зачем выпускное отверстие в лабораторной установке сделано широким?
12. Почему манометр в установке лабораторной работы N 31 наполнен водой, а не ртутью?
13. Нарисуйте графики газовых процессов, происходящих в лабораторной установке.
14. К каким изменениям в результатах измерения коэффициента Пуассона приведет слишком ранний выпуск газа, слишком позднее (слишком раннее) закрытие клапана в установке лабораторной работы N 31?
15. Вычислите коэффициент Пуассона для аргона, водорода, метана, углекислого газа.

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №32
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ

Цель работы: ознакомление с понятием энтропии и определение направления её изменения в реальных системах.

Приборы и принадлежности: калориметр, нагреватель, термометр, весы, тела различной массы из различных материалов.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Наблюдение процессов в природе и технике показывает, что протекание их в противоположных направлениях приводит к существенно различным результатам. Примерами могут служить заряд и разряд аккумуляторов, охлаждение и нагревание тел, смешивание и разделение растворов и т.д.

Важной характеристикой протекания процессов является их обратимость. Обратимым процессом называется такое изменение состояния системы, которое, будучи проведено в обратном направлении, возвращает систему в исходное состояние так, чтобы система прошла через те же промежуточные состояния, что и в прямом процессе, но в обратной последовательности. При этом состояние тел вне системы должно остаться неизменным. Процессы, не удовлетворяющие этому определению, называются необратимыми.

Рассмотрим ряд примеров.

1. Колебания маятника в отсутствие затухания есть полностью обратимый процесс. Если на маятник действуют силы трения, процесс становится необратимым, так как часть механической энергии маятника при каждом колебании переходит в тепловую. Можно искусственно заставить маятник колебаться сколь угодно долго, однако для этого необходимо пополнять энергию системы извне, действуя внешней силой и совершая работу.

2. Пусть в состав изолированной системы входят два тела, нагретых до различной температуры. Тогда в системе самопроизвольно начнется процесс перехода энергии от более нагретого к менее нагретому телу, и никогда не будет происходить самопроизвольно обратный процесс. Передача тепла от менее нагретого к более нагретому телу возможна, и такой процесс протекает в холодильнике. Однако для этого необходимо, чтобы электромотор холодильника совершал работу, но в этом случае система перестает быть замкнутой, т.к. холодильник потребляет энергию извне.

3. При смешивании химического соединения с растворителем наблюдается диффузия растворенного вещества, приводящая к выравниванию его концентрации во всех частях растворителя. Процесс самопроизвольного сбора растворенного вещества в какой-либо части растворителя не наблюдается никогда. Для сбора растворителя необходимо воздействовать на систему извне, совершая при этом работу.

Можно утверждать, что все чисто механические или макроскопические процессы обратимы, а процессы в системах с большим количеством частиц (микроскопических или термодинамических), в которых часть механической энергии переходит в тепловую, необратимы.

Опыт показывает, что в замкнутых системах невозможны такие процессы, единственным результатом которых является переход тепловой энергии в механическую энергию.

Измерение величин параметров состояния системы (давления P, объема V и температуры T) не позволяет ответить на вопрос, обратим ли процесс, и в каком направлении он может происходить. Невозможно выяснить вопрос об обратимости и возможном направлении протекания процесса и из закона сохранения энергии в термодинамике $\partial Q = dU + \partial A$, /1/

т.к. внутренняя энергия dU есть функция состояния системы (она зависит только от температуры тела), то работа зависит от того, посредством какого процесса система переходит из одного состояния в другое.

Для выяснения вопроса об обратимости и направлении протекания процессов в термодинамике наряду с P, T и V вводится новая величина - энтропия S.

Физический смысл имеет только изменение энтропии: $\partial S = \frac{\partial Q}{T}$ /2/

или для макроскопических изменений: $S_2 - S_1 = \int \frac{\partial Q}{T}$. /3/

За ноль энтропии может быть выбрано ее значение у тела в любом исходном состоянии. Практически за ноль энтропии выбирают ее величину у тела при абсолютном нуле температуры.

Можно показать, что энтропия системы зависит от вероятности реализации данного состояния ω: $S = kLn\omega$, /4/

где к - постоянная Больцмана.

Расчеты и анализ экспериментальных данных позволяют сформулировать второе начало термодинамики: при любых процессах в замкнутой системе энтропия не убывает:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq 0, \qquad /5/$$

где S_1 и S_2 - соответственно энтропии начального и конечного состояний системы.

При обратимых процессах $\Delta S = 0$, а при необратимых - $\Delta S \triangleright 0$

Из сравнения /4/ и /5/ вытекает другая формулировка второго начала термодинамики: в любых процессах в замкнутой системе вероятность конечного состояния не меньше вероятности начального состояния.

Это утверждение не является абсолютным. Оно указывает лишь наиболее вероятное направление протекания процессов. Однако расчеты и опыт показывают, что вероятность протекания процессов в противоположном направлении настолько незначительна, что такую принципиальную возможность просто нет смысла учитывать.

Таким образом, расчет изменения энтропии позволяет выяснить направление протекания процесса в ней. Для определения энтропии системы можно воспользоваться её связью с другими термодинамическими параметрами P ,V, и T, которые могут быть определены в эксперименте.

При передаче тепла от одного тела к другому, когда работа не совершается (например, при изохорном процессе в идеальном газе),

$$dQ = C_{yд} m dt, \qquad /6/$$

где $C_{уд}$ - удельная теплоемкость вещества, m - масса тела. Откуда

$$\Delta S = \int C_{yд} m \frac{dT}{T} = C_{yд} m Ln \frac{T_2}{T_1}. \qquad /7/$$

В работе необходимо определить изменение энтропии замкнутой системы, включающей калориметр, воду, испытуемое тело и термометр, при теплообмене между ними. Калориметр, вода и термометр в начале опыта имеют температуру T_1, испытуемое тело - T_2, а по достижении теплового равновесия устанавливается температура T_0.

Изменения энтропии колориметра $\Delta S_{К,}$ воды ΔS_B, тела ΔS_T и термометра ΔS_{TM} равны соответственно:

$$\Delta S_K = C_K m_K Ln \frac{T_0}{T_1},, \qquad \Delta S_B = C_B m_B Ln \frac{T_0}{T_1},$$

$$\Delta S_T = C_T m_T Ln \frac{T_0}{T_2}, \qquad \Delta S_{TM} = C_{TM} Ln \frac{T_0}{T_1}, \qquad /8/$$

где C_{TM} - теплоемкость термометра, а изменение энтропии системы ΔS -

$$\Delta S = \Delta S_K + \Delta S_B + \Delta S_T + \Delta S_{TM}. \qquad /9/$$

Установившуюся температуру T_0 можно рассчитать с помощью уравнения теплового баланса

$$\Delta Q_K + \Delta Q_B + \Delta Q_T + \Delta Q_{TM} = 0, \qquad /10/$$

или

$$C_K m_{ж}(T_0 - T_1) + C_B m_B(T_0 - T_1) + \\ + C_T m_T(T_0 - T_2) + ,,_{TM}(T_0 - T_1) = 0.' \qquad /11/$$

откуда

$$T_0 = \frac{C_T m_T T_2 + C_K m_K T_1 + C_B m_B T_1 + C_{TM} T_1}{C_K m_K + C_B m_B + C_T m_T + C_{TM}}. \qquad /12/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать в таблицу результатов наблюдений значения теплоемкостей воды, материала калориметра (алюминия) и материала тела из таблицы 1.
2. Определить массу испытуемого тела взвешиванием на весах (может быть указана преподавателем) и занести ее в таблицу результатов наблюдений.
3.Определить массу калориметра $m_к$ взвешиванием на весах (может быть указана на калориметре) и массу налитой в него воды $m_в$ путем измерения ее объема мерным цилиндром (масса воды в граммах равна объему в $см^3$). Занести эти величины в таблицу результатов наблюдений. Величина теплоемкости термометра указывается преподавателем.

ТАБЛИЦА 1. УДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВЕЩЕСТВ

Вещество	Алюминий	Вода	Латунь	Медь	Сталь	Бронза
С, 10^3 $Джкг^{-1}К^{-1}$	0.896	4.187	0.387	0.390	0.467	0.377

4. Поместить испытуемое тело в стакан с водой и включить нагреватель. После того, как вода закипит, выдержать тело в ней ≈5 мин. до достижения теплового равновесия. Температуру T_2 определить по таблице 2 и занести ее в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА 2. ТЕМПЕРАТУРА КИПЕНИЯ ВОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Р, мм. рт. ст.	740	745	750	755	760	765	770	780
Т, К	372.3	372.4	372.6	372.8	373.0	373.2	373.4	373.7

5. Поместить калориметр с водой в полиэтиленовый стакан, что сделает систему почти адиабатически изолированной. Измерить термометром установившуюся через некоторое время температуру воды в калориметре T_1, а следовательно, и температуру калориметра, и занести ее в таблицу результатов наблюдений. Калориметр держать вдали от нагревателя.
6. Поместить нагретое тело в калориметр, и после установления теплового равновесия (3....5 мин.) измерить температуру системы T_0. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
7. Рассчитать ΔS системы по формулам /8/ и /9/. Натуральные логарифмы вычислять до четвертого знака после запятой.
8. Рассчитать T_0 с помощью уравнения теплового баланса и сравнить рассчитанное значение T_0 с измеренным в эксперименте.

ТАБЛИЦА 3. ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Тело, материал	С,10^{-3} Дж $кг^{-1}К^{-1}$	m, кг	T_1, К	T_2, К	T_0, К	ΔS $ДжК^{-1}$
Калориметр						
Вода холодная						
Тело						
Термометр						
						∑ ΔS

9. Опыты по п.п.1-7 произвести с другими телами из различных материалов (по заданию преподавателя). В качестве тела может быть выбрана и кипящая вода. Ее масса может быть определена путем измерения объема горячей и холодной воды и вычитания объема последней.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы называются обратимыми? Какие процессы называются необратимыми?
2. Сформулируйте и запишите уравнение закона сохранения энергии в термодинамике.
3. Сформулируйте первое начало термодинамики.
4. Что такое энтропия? Как энтропия связана с вероятностью состояния.
5. Запишите формулу для вычисления энтропии в общем виде. В каких единицах измеряется энтропия?
6. Выведите формулу для измерения энтропии при изохорном, изобарном, изотермическом или адиабатном процессах.
7. Сформулируйте второе начало термодинамики.
8. Как изменяется энтропия при обратимых и необратимых процессах?

ЛИТЕРАТУРА

35. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 51, 52, 54, 57, 58.
36. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 83,84,103, 104, 107.
37. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.2.3, II.2.5, II.4.3, II.4.4, II.4.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 33
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЕГО МОЛЕКУЛ

Цель работы: изучение явления внутреннего трения в газе.

Приборы и принадлежности: баллон с капилляром и сливной трубкой, манометр, мерный цилиндр, секундомер, стакан.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Внутренним трением в газах и жидкостях называется обусловленное тепловым движением молекул выравнивание скоростей движущихся с различными скоростями слоев газа или жидкости. Молекулы из слоя, движущегося с большей скоростью, попадают при тепловом движении в слой, движущийся с меньшей скоростью, и передают ему часть своего дополнительного импульса. Этот процесс переноса импульса количественно описывается уравнением Ньютона

$$F = \eta \frac{\partial u}{\partial x} \Delta S = \eta q r a d u \Delta S, \qquad /1/$$

где F - касательная сила внутреннего трения, $F = \frac{\Delta(mu)}{\Delta t}$ - сила, действующая на площадку ΔS соприкасающихся слоев, u - скорость направленного движения слоя, η - коэффициент внутреннего трения (вязкость) (рис.33.1).

Молекулярно-кинетическая теория дает для вязкости газа следующее выражение:

$$\eta = 0.5 u_A \lambda \rho, \qquad /2/$$

где u_A- средняя арифметическая скорость молекул, λ - средняя длина их свободного пробега, ρ-плотность газа.

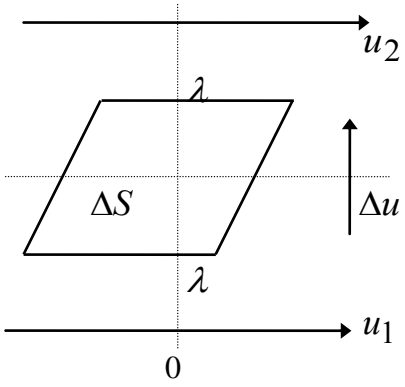


Рис.33.1

Средняя арифметическая скорость теплового движения молекул равна:

$$U_A = \sqrt{\frac{3RT}{\pi\mu}}, \qquad /3/$$

где R - универсальная газовая постоянная, Т - абсолютная температура, μ - молярная масса. Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}, \qquad /4/$$

где Р - атмосферное давление. Средняя длина свободного пробега молекул согласно молекулярно-кинетической теории равна:

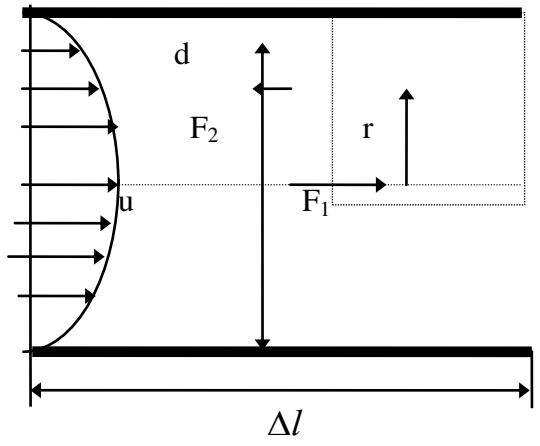


Рис.33.2

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma\sqrt{2}}, \qquad /5/$$

где n - концентрация - количество молекул в единице объема, σ - эффективное сечение молекул. Тогда, используя следствие из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа

$$n = \frac{P}{kT}, \qquad /6/$$

где к - постоянная Больцмана, получим

$$\eta = \sqrt{\frac{k\mu}{N_A\pi\sigma^2}}\sqrt{T}, \qquad /7/$$

где N_A - число Авогадро, т.е. $\eta \approx \sqrt{T}$.

Значения вязкости воздуха при различных температурах приведены в таблице 1.

Измерения вязкости газа позволяют определить длину свободного пробега его молекул

$$\lambda = \frac{\eta}{P}\sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}. \qquad /8/$$

В работе определяется вязкость воздуха и длина свободного пробега его молекул. Для их определения воспользуемся формулой Пуазейля, описывающей ламинарное течение газа по узкой трубе.

Ламинарным называют течение газа (жидкости), при котором слои движутся параллельно и не перемешиваются. В противном случае течение является турбулентным.

При выводе формулы Пуазейля предполагается, что диаметр трубы много больше длины свободного пробега молекул, так что они, переходя в соседний слой, успевают передать импульс его молекулам. Такой характер поток имеет в том случае, если безразмерная величина, называемая числом Рейнольдса, равна:

$$R_\ell = \frac{\rho\bar{u}d}{2\eta} \le 10^3, \qquad /9/$$

ТАБЛИЦА 1. ВЯЗКОСТЬ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Т, К	273	291	313	327	343
η, 10^{-5} кгм$^{-1}$с$^{-1}$	17.05	18.27	19.04	19.58	21.02

где $\overline{u}$ - средняя по сечению трубы скорость потока, d - диаметр трубы.

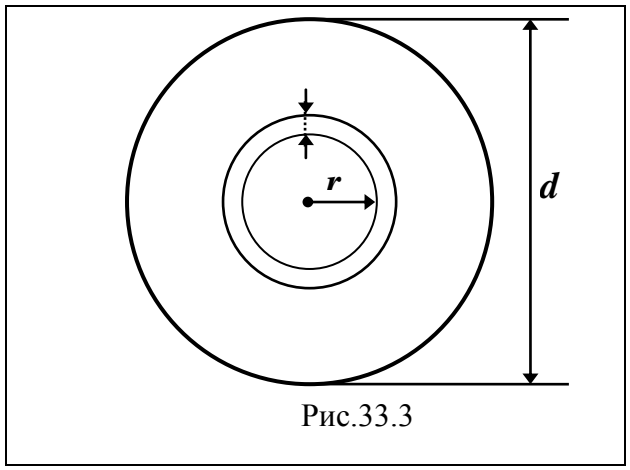


Рис.33.3

Рис.33.3 Рис.33.3Кроме того, предполагается, что поток стационарный, т.е. не изменяется во времени.

Выделим мысленно в потоке газа в трубе круглого сечения цилиндр радиуса r, ось которого совпадает с осью трубы (рис.33.2). В установившемся потоке на него действует сила давления F_1, за счет которой газ движется:

$$F_1 = \Delta PS = \Delta P\pi r^2, \qquad /10/$$

где ΔP - разность давлений на концах трубы, а также сила внутреннего трения F_2, распределенная по поверхности цилиндра:

$$F_2 = \eta Srqadu = 2\pi r\Delta l\,\eta\, du/dr, \qquad /11/$$

где Δ1 - длина трубы. Из условия стационарности (равномерности движения) потока (ускорение a=0) следует: $F_1=F_2$, /12/

или $$\pi r^2\Delta P - 2\pi r\Delta l\,\eta\frac{du}{dr} = 0. \qquad /13/$$

Откуда $$du = -\frac{\Delta P}{2\eta\Delta l}rdr. \qquad /14/$$

Интегрируя /14/ в предположении, что на поверхности трубы при r=d/2 скорость слоя равна u=0, т.к. молекулы жидкости, смачивающей поверхность трубы, «прилипают» к ее стенкам, получим

$$u = \frac{\Delta Pd^2}{16\eta\Delta l}(1 - \frac{4r^2}{d^2}). \qquad /15/$$

Непосредственное измерение скорости газа с целью определения η из /15/ затруднено. Определим количество газа (объем V), проходящего через трубу (капилляр диаметром d) длиной Δ1 за время Δt при разности давлений на концах трубы ΔP при стационарном движении газа):

$$V = \int_S u\Delta t dS, \qquad /16/$$

где u - скорость газа в цилиндрическом слое радиусом r и толщиной dr, рис.33.3. Тогда, подставляя в /16/ значение u из /15/, получим формулу Пуазейля

$$V = \int_0^{d/2}\frac{\Delta P\pi d^2\Delta t}{16\Delta l\,\eta}(1 - \frac{4r^2}{d^2})2rdr = \frac{\Delta Pd^4\Delta t}{128\Delta l\,\eta}. \qquad /17/$$

Откуда $$\eta = \frac{\pi d^4\Delta P\Delta t}{128\Delta lV}. \qquad /18/$$

Т.к. $\Delta P = q\rho\Delta h$, то $$\eta = \frac{\pi d^4 q\rho\Delta h\Delta t}{128\Delta lV}. \qquad /19/$$

Установка для проведения измерений (рис.33.4) состоит из баллона с водой (1), в нижней части которого имеется труба (2) для слива, перекрываемая зажимом (3). Через пробку,

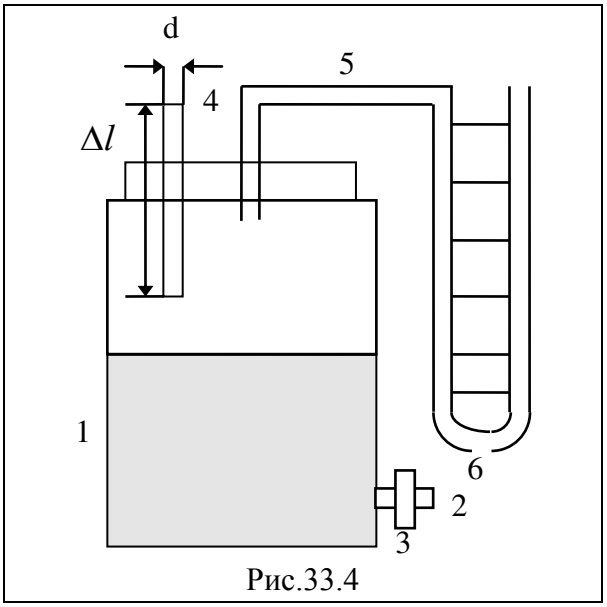


Рис.33.4

закрывающую горловину баллона, пропущен капилляр (4) и трубка (5) для подсоединения U-образного водяного манометра (6).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать данные капилляра, указанные на установке, температуру и давление воздуха во время проведения опыта.
2. Вынув пробку из горловины, залить воду в баллон до 0.5-0.7 его объема. Горловину закрыть и замазать пластилином для обеспечения герметичности.
3. Подставить стакан под сливную трубу (2) и снять с нее зажим (3). Из трубы начнет выливаться вода.
4. После установления стационарного режима вытекания воды, когда разность высот уровней воды в манометре (6) почти перестанет изменяться, вместо стакана подставить мерный цилиндр и одновременно включить секундомер.
5. Во время набора воды в мерный цилиндр зафиксировать разность высот уровней воды в манометре Δh (в начале и конце опыта) и занести в таблицу результатов наблюдений среднее значение Δh.
6. По прошествии $\Delta t \approx 10^2$ с, когда количество воды в мерном цилиндре будет 8....10 10^{-5} м^3, цилиндр отставить, одновременно выключив секундомер. Занести в таблицу результатов наблюдений время Δt и объем вытекшей воды V, равный объему прошедшего газа. В промежутках между опытами трубу (2) не перекрывать зажимом (3), а подставлять стакан. Опыт по п.4....6 повторить 5...6 раз.
7. Рассчитать $(\frac{\Delta h \Delta t}{V})cp$, а затем коэффициент вязкости по формуле $\eta_{CP} = A(\frac{\Delta h \Delta t}{V})cp$, /20/

где A - постоянный множитель, $A = \frac{\pi d^4 q \rho}{128 \Delta l}$ (см. формулу /19/).

8. Используя значения коэффициента вязкости $\eta_{ср}$, температуры T и атмосферного давления P, рассчитайте среднюю длину пробега молекул воздуха λ по формуле (8) где μ - молярная масса воздуха.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

V,10^{-5} м^3	Δt ,с	Δh ,10^{-1} м	$\frac{\Delta h_i \Delta t_i}{V_i}$ с*м$^{-2}$

d_1= ,10^{-4}м. Δ1= ,10^{-2}м. T, = К. P= ,10^5Па.

μ, =29 10^{-3} кг моль$^{-1}$. R=8.31,Дж моль$^{-1}$К$^{-1}$. ρ=1,00 10^3 кгм$^{-3}$. q=9.807,мс$^{-2}$.

$A = \frac{\pi d^4 q \rho}{128 \Delta l} =$,м кг с$^{-2}$. $(\frac{\Delta h \Delta t}{V})cp =$ с м$^{-2}$.

$\eta_{ср}$= 10^{-5}кгм$^{-1}$с$^{-1}$. λ= 10^{-8} м

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое внутреннее трение?
2. Каков молекулярный механизм внутреннего трения в газах?
3. Запишите уравнение Ньютона для внутреннего трения в газе.
4. Дайте определение коэффициента внутреннего трения (вязкости). В каких единицах он измеряется?
5. От каких параметров газа зависит коэффициент внутреннего трения?
6. Почему коэффициент внутреннего трения газа возрастает при увеличении температуры?
7. Выведите зависимость вязкости идеального газа от температуры.
8. От чего зависит средняя длина свободного пробега молекул? Запишите формулу для средней длины свободного пробега молекул.
9. При каких условиях справедлива теория лабораторной работы N 33?
10. Выведите закон распределения скорости газовых слоев от расстояния до оси круглой трубы. Нарисуйте график этой зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

38. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 31, 32, 46, 48.
39. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 75, 76, 77, 78, 128, 129, 132.
40. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.3.5, II.3.8, II.4.7.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 34
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: изучение явления внутреннего трения в жидкости.

Приборы и принадлежности: цилиндрическая труба, наполненная жидкостью (глицерином, касторовым или трансформаторным маслом), шарики, секундомер, микрометр, штангенциркуль, линейка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Явление внутреннего трения в жидкости, как и внутреннего трения в газе (см. методические указания к лаб. раб. № 33), представляет перенос импульса молекул из слоя, движущегося с большей скоростью, в слой, движущийся с меньшей переносной скоростью, при тепловом движении молекул. Существенно большие силы взаимодействия между молекулами жидкости обуславливают большие (на несколько порядков) значения коэффициента внутреннего трения (вязкости) η жидкости по сравнению с аналогичной величиной у газов. Значения вязкости касторового и трансформаторного масла при различных температурах приведены в таблице 1 (сравните их с вязкостью воздуха, лаб. раб. № 33).

Таблица 1

Зависимость вязкости касторового масла от температуры

T, K	278	283	288	293	298	303	308	313
η, кг·м$^{-1}$·с$^{-1}$	3,76	2,418	1,514	0,950	0,621	0,451	0,312	0,231

Зависимость вязкости трансформаторного масла от температуры

T, K	253	293	323	343	363
η, 10^{-3} кг·м$^{-1}$·с$^{-1}$	225,4	15,6	5,4	3,3	2,3

Уменьшение вязкости жидкости при нагревании связано, прежде всего, с ослаблением взаимодействия между молекулами.

В работе вязкость жидкости определяется методом Стокса. На шар радиуса r, движущийся в жидкости (рис.34.1), действуют:

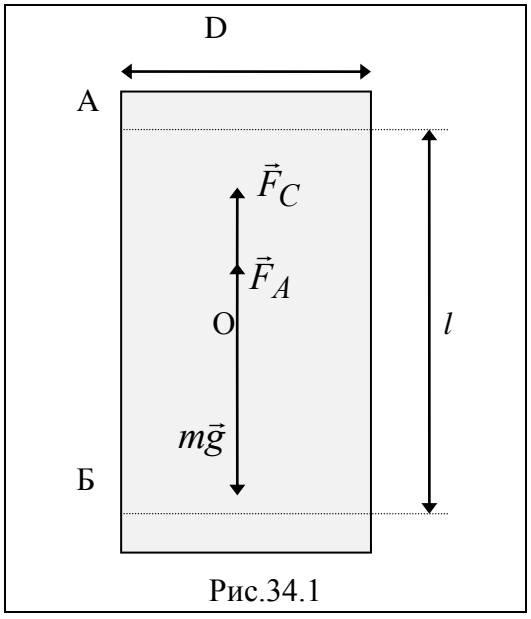


Рис.34.1

- сила тяжести $F_T = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T q,$ /1/

где m - масса тела, $\rho_т$ - плотность материала тела, q – ускорение свободного падения.

- выталкивающая сила (сила Архимеда)

$$F_A = V\rho_{ж} q = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} q \qquad /2/$$

где $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ - объем тела (шара), $\rho_ж$ – плотность жидкости.

- сила сопротивления F_C, которая для шара, движущегося медленно в ламинарном потоке с малой скоростью, т.е. при малых величинах числа Рейнольдса (см. методические указания к лаб. раб. № 33)

$$R_\ell = \frac{\rho \bar{u} d}{2\eta} \le 10^3, \qquad /3/$$

равна $F_c = 6\pi\eta r v,$ /4/

где η - коэффициент внутреннего трения (вязкость), v - скорость тела.

Уравнение динамики (второй закон Ньютона) имеет вид

$$m\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F}_T + \bar{F}_A + \bar{F}_c, \qquad /5/$$

или $$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \left(\rho_T - \rho_{ж}\right) - 6\pi\eta r v. \qquad /6/$$

Введем обозначения $$v_y = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\left(\rho_T - \rho_{ж}\right)}{\eta}, \qquad /7/$$

и $$\tau = \frac{2r^2 \rho_T}{9\eta}, \qquad /8/$$

где v_y - установившаяся скорость, т.е. скорость через бесконечно большое время, когда ускорение равно нулю и шар движется равномерно, τ - время релаксации (установления) равномерного движения. Тогда решение уравнения /5/ имеет вид

$$v(t) = v_y - \left(v_y - v_0\right) e^{-t/\tau}, \qquad /9/$$

где v_0 – скорость шарика в начальный момент времени (при вхождении шарика в жидкость).

На рис.34.2 показаны зависимости скорости шарика от времени для случая, когда $v_0 = 0$ (а) и $v_0 < v_y$ (б).

Вязкость жидкости удобно определять путем измерения установившейся скорости шара v_y при равномерном его движении, когда $\frac{dv}{dt} = 0$. В этом случае уравнение /5/ приобретает вид

$$\bar{F}_T + \bar{F}_A + \bar{F}_c = 0. \qquad /10/$$

Это условие выполняется при $t >> \tau$ (для касторового масла $\tau = 0{,}1$ с,

$v_y \approx 10^{-1}$ м·с$^{-1}$). Расстояние, проходимое шаром за время релаксации $v_y\tau \approx 10^{-2}$ м.

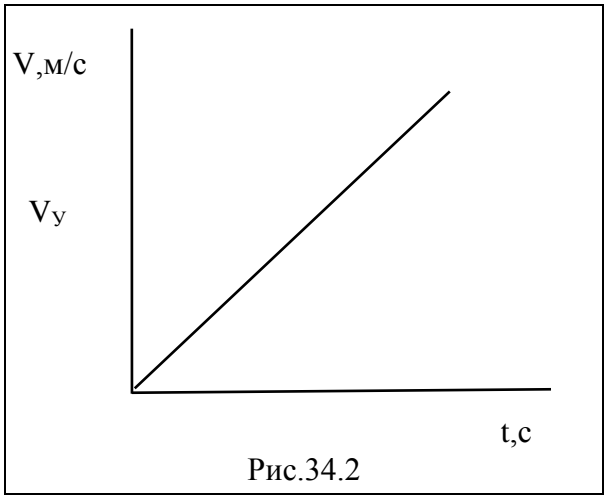


Рис.34.2

В этом случае $$\eta = \frac{2gr^2(\rho_T - \rho_{ж})}{9v_y}.$$ /11/

Формула /11/ справедлива для движения шара в безграничной жидкости. В случае если труба установки имеет конечные размеры, в /11/ необходимо ввести поправочный коэффициент

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho_T - \rho_{ж})}{9\left(1 + 2{,}4\frac{r}{R}\right)v_y}.$$ /12/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить внутренний диаметр трубы D=2R штангенциркулем и шара d=2r микрометром.
2. Измерить линейкой расстояние l между двумя метками А и Б, см. рис.34.1. При этом АВ должно быть не менее 0,2 м.
3. Опустить шар в жидкость как можно ближе к оси трубы. Опустить шар в масло и включить секундомер в момент прохождения шара напротив метки А и выключить секундомер в момент прохождения шара напротив метки Б. Измерения времени произвести не менее 3 раз. Величины расстояния l и времени движения t занести в таблицу результатов наблюдений.
4. Повторить опыт по п.п. 2-3 не менее 5 раз при различных расстояниях l между метками А и Б.

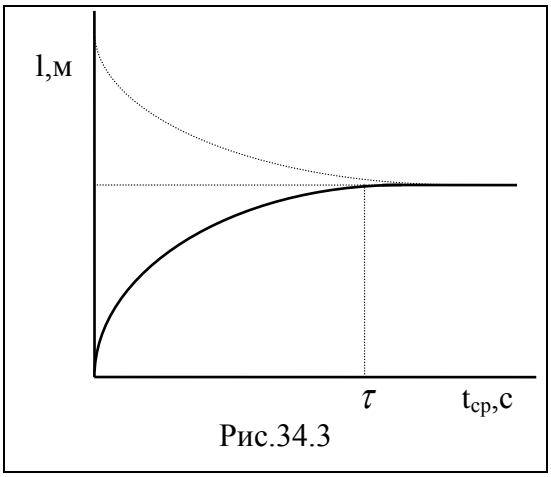


Рис.34.3

5. Построить график зависимости $l = f(t_{ср})$, рис.34.3. По двум точкам на графике, расположенным как можно дальше друг от друга, вычислить скорость движения шара

$$v_y = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1}.$$ /13/

6. Рассчитать $\underline{\eta}$ по формуле /12/ сравнить рассчитанное значение $\underline{\eta}$ с табличным.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

l, м	t_i , с			$t_{ср}$, с

$\rho_т$= ,10^3 кг м$^{-3}$, r= ,10^{-3} м$^{-3}$, $\rho_ж$= ,10^3 кг ·м$^{-3}$, R= ,10^{-2} м, g=9,81, м·с$^{-1}$, t= К.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление внутреннего трения?
2. Каков молекулярный механизм внутреннего трения?
3. Что такое коэффициент внутреннего трения? В каких единицах он измеряется?
4. Почему коэффициент внутреннего трения в жидкости больше, чем в газе?
5. Как изменяется коэффициент вязкости при нагревании?

6. Почему коэффициент внутреннего трения в жидкости уменьшается при увеличении температуры?
7. Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости? Запишите уравнение Ньютона для внутреннего трения.
8. От чего зависит сила внутреннего трения (сила Стокса), действующая на шарик в жидкости?
9. Запишите уравнение динамики (второй закон Ньютона) для движения шарика в жидкости.
10. Нарисуйте график зависимости скорости шарика от времени.
11. При каких условиях выводится формула для вычисления коэффициента внутреннего трения?
12. Нарисуйте график зависимости пути от времени для шарика в лаб. работе N 34.
13. Что такое время релаксации?
14. Почему, начиная с некоторого времени, шарик в жидкости будет двигаться равномерно?

ЛИТЕРАТУРА

41. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 31, 32, 46, 48.
42. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 75, 76, 77, 78, 128.
43. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.3.5, II.3.8, II.4.7.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 35
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ СТОКСА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

Рассмотрим жидкость, имеющую свободную поверхность (границу раздела фаз жидкость - газ). Молекулы, находящиеся внутри жидкости, окружены соседними со всех сторон симметрично (рис.35.1а). Молекулы, находящиеся в слое толщиной h≈3R вблизи границы раздела фаз жидкость - газ, окружены соседними несимметрично, и на них действуют не скомпенсированные силы, направленные внутрь жидкости (рис.35.1б,в).

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

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

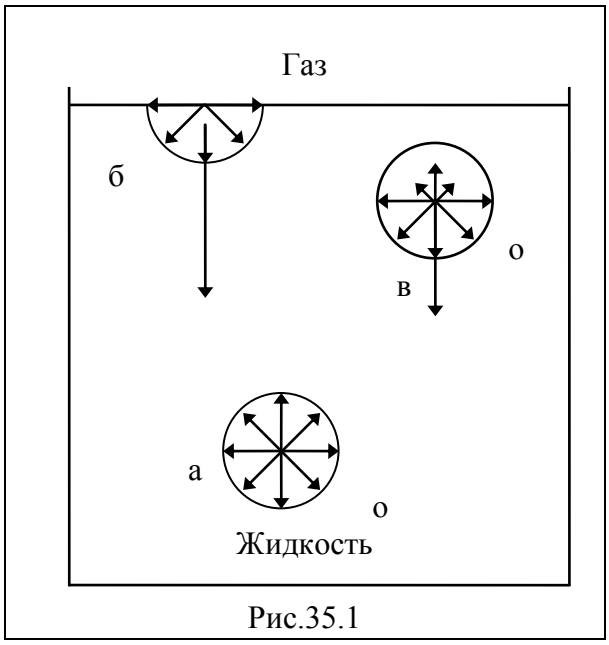


Рис.35.1

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

Следовательно, поверхность жидкости обладает избыточной по сравнению с остальной массой жидкости свободной (потенциальной) энергией. Стремясь к минимуму энергии, система предоставленная самой себе, будет уменьшать свою поверхность до минимально возможной величины (сокращать поверхность). Это означает, что существуют направленные по касательной к поверхности силы поверхностного натяжения $F_н$, стремящиеся сократить (уменьшить) поверхность жидкости, причем

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

где dl - длина контура, ограничивающего жидкость.

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

При увеличении температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается вследствие уменьшения сил межмолекулярного взаимодействия $\sigma = B\left(T_k - T - T_0\right)\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{\frac{2}{3}}$, /3/

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

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

Таблица 1

Коэффициент поверхностного натяжения воды при различных температурах

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

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

Сила тяжести равна: $F_T = mg = \rho_{ж} V_0 g$, /4/

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

Сила поверхностного натяжения $F_н$ приложена перпендикулярно контуру поперечного сечения шейки капли в момент отрыва. $F_{,H} = 2\pi r\sigma$, /5/

где r - радиус шейки капли в момент отрыва. Измерение r затруднено, поэтому σ определяют методом сравнения. Если известен коэффициент поверхностного натяжения одной жидкости, (в нашем случае воды), то из равенства /4/ и (5) следует: $\rho_B V_{0B} g = 2\pi r\sigma_B$. /6/

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

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

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

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

Таблица 2

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

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

9. Используя полученные значения плотности и коэффициента поверхностного натяжения воды, а также средние значения количества капель N_1 и N_2, определить коэффициент поверхностного натяжения испытуемой жидкости по средним значениям N_1 и N_2 .
10. Формулы для средней абсолютной погрешности /10/

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

и средней относительной погрешности определения коэффициента поверхностного натяжения /11/

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

можно получить, пользуясь методическими указаниями «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум». При этом погрешностями табличных значений можно пренебречь ввиду

ду их малости. Значение надежности выбирается α=0,95 или по заданию преподавателя. Результат записать в виде: $\sigma \pm \Delta\sigma$ =……±……10^{-2} Н/м

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 60, 66,67,68,69.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 115,116, 117, 118,119.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.5.1, II.6.1, II.6.4.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум. Под ред. Леонтьева Н.Г.// Зерноград, АЧГАА - 2002, 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 36
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

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

В твердых или кристаллических телах (реальных кристаллах) имеет место как ближний, так и дальний порядок, т.е. структурные единицы, расположенные упорядоченно на расстоянии 10^5.....10^7 межатомных расстояний. При этом структурные единицы, обладающие энергией $\varepsilon_{РК}$ (рис.36.1), совершают колебательные движения вокруг упорядоченно расположенных положений равновесия.

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

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

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

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

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

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

причем $m > n$, несимметрична относительно r_0 и $(r_{\min} - r_0) \neq (r_{\max} - r_0)$. Поэтому среднее расстояние между молекулами

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

и нагревании изменяется (это изменение показано пунктирной кривой б на рис.36.1). Следовательно, длина твердого тела, складывающаяся из расстояний между молекулами, при нагревании изменяется. При фазовом переходе, вследствие изменения структуры и межатомных расстояний, длина твердого тела также изменяется.

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

Поэтому измерения теплового расширения позволяют судить об изменении межатомных расстояний и структуры кристаллических тел.

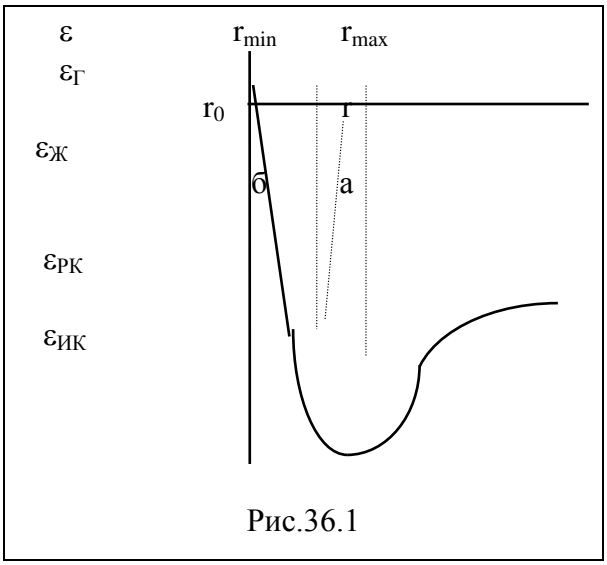


Рис.36.1

У большинства веществ в температурной области существования одной фазы длина образца зависит от температуры линейно и обычно увеличивается $L = L_0 + L_0\alpha(T - T_0)$, /5/

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

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

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

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

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

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

Т.к. все измерения проводятся один раз, то за абсолютные погрешности измерения длины стержня, абсолютного удлинения стержня и температуры принимается половина цены деления соответствующего прибора:

$\Delta L = 5\ 10^{-4}$ м, $\Delta l = 5\ 10^{-6}$ м, $\Delta T = 0.25$ К. Абсолютная погрешность измерения коэффициента линейного расширения находится по формуле

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение твердого тела (реального кристалла).
2. Нарисуйте зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними.
3. Объясните с помощью зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними причины расширения тел при нагревании.
4. Напишите формулу зависимости длины тела от температуры.
5. Дайте определение коэффициента линейного расширения тела. В каких единицах он измеряется?
6. От чего зависит коэффициент линейного расширения тела?
7. Дайте определение коэффициента объемного расширения тела. В каких единицах он измеряется?
8. Как меняется кинетическая энергия молекул, когда расстояние между ними приближается к r_{min}, r_{max}? На каком расстоянии эта энергия максимальна?

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 37
ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОЙЛЯ – МАРИОТТА

Цель работы: изучение связи термодинамических величин при изотермическом процессе в идеальном газе.

Приборы и принадлежности: пластиковый сосуд, медицинский манометр, шприц с оцифрованной шкалой, зажимы, соединительные трубки, тройники.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При небольших плотностях и средних температурах газы можно рассматривать как совокупность хаотически движущихся частиц малого размера (материальных точек), взаимодействующих при столкновениях как абсолютно-упругие шары и не взаимодействующих между столкновениями (потенциальной энергией взаимодействия молекул пренебрегаем). Такая модель молекулярной системы называется идеальным газом.

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

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

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

Процессы, протекающие в газах при неизменном значении одного из параметров, называют изопроцессами. Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют изотермическим. Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплотой с большой системой – термостатом. Иначе при сжатии или расширении температура газа будет меняться. Термостатом может служить атмосферный воздух, если его температура заметно не меняется на протяжении времени проведения эксперимента.

Закон Бойля – Мариотта: для данной массы газа при постоянной температуре, произведение давления газа на его объем постоянно.

$$m = const\ ,\ \ T = const\ ,\ \ \ PV = const\ . \qquad /2/$$

Закон Бойля – Мариотта справедлив для любых газов и газовых смесей. Лишь при давлениях в сотни атмосфер отклонения от этого закона становятся существенными.

При расширении или сжатии газ совершает работу, что связано с изменением его внутренней энергии. Геометрически работа газа численно равна площади фигуры ограниченной графиком изменения давления P и осью объемов V.

Лабораторный набор «Исследование процессов в газах» Компании ЭДУСТРОНГ представляет собой пластиковый сосуд объемом 40 мл. соединенный длинной трубкой ПВХ (внутренний диаметр 4 мм. длина 25 см.) через тройники и короткие трубки ПВХ (внутренний диаметр 4 мм., длина 4 см) с медицинским манометром и шприцом.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Снимите оба зажима, и выдвините поршень шприца до отметки 10 мл., что соответствует общему, начальному объему V_0 = 55 мл.

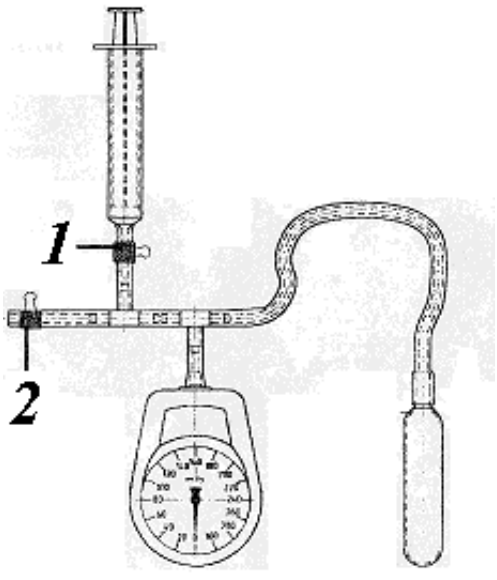


Рис. 37.1

1. Определите атмосферное давление P_0 по барометру- анероиду.
2. Поставьте зажим (2) и, медленно вдвигая поршень, уменьшайте объем системы с интервалом 2 мл.. Фиксируйте изменение давления с помощью манометра, занося данные измерений в таблицу результатов наблюдений. Поршень необходимо придерживать в каждом положении.
3. Вычислите значения P_n и V_n по формулам:

$$V_n = V_0 - \Delta V_n\ ; \quad P_n = P_0 + \Delta P_n\ . \qquad /3/$$

При вычислениях учитывайте, что 1мм.рт.ст. – 133,3 Па. Результаты занесите в таблицу результатов наблюдений.
4. Проверьте, выполняется ли соотношение:

$$P_1V_1 = P_2V_2 = ... = P_nV_n \qquad /4/$$

выражающее закон Бойля-Мариотта.
5. Постройте график изотермического процесса в координатах: P = f (V).
6. Вычислите относительную погрешность измерений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{P_{n\,cp}} + \frac{\Delta V}{V_{n\,cp}} \qquad /5/$$

где ΔP = 1 мм.рт.ст.= 133,3 Па , $\Delta V = 1 \cdot 10^{-6}\, м^3$ - абсолютные погрешности измерения давления и объема.

7. Вычислите абсолютную погрешность измерения произведения давления на объем по формуле:

$$\Delta(PV) = (P_n V_n)_{ср} \cdot \varepsilon \qquad /6/$$

8. Запишите окончательный результат в виде:

$$PV = (P_n V_n)_{ср} \pm \Delta(PV); \quad \varepsilon = ...\%$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

ΔV_n, 10^{-6} м^3	V_n, 10^{-6} м^3	ΔP_n, Па	P_n, Па	$P_n V_n$,

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

16. Что такое идеальный газ? Какие предположения делаются при введении такой модели описания газа?
17. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона состояния идеального газа.
3. Дайте определение изотермического процесса и запишите закон Бойля - Мариотта.
4. Нарисуйте график изотермического процесса в координатах PV, PT, VT.
5. По шкале Цельсия температура газа равна 123^0C. Чему равна температура этого газа по шкале Кельвина?
6. Температура газа изменилась на 45^0C, каково изменение температуры газа по шкале Кельвина?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: ВШ, 1985, - § 31, 32, 46, 48.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т.1. - М.: Наука, 1987, - § 75, 76, 77, 78, 128.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - § II.3.5, II.3.8, II.4.7.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

Электроемкостью конденсатора называется величина, численно равная отношению заряда q, находящегося на одной из обкладок, к разности потенциалов между этими обкладками

$$C = \frac{q}{U}. \qquad /1/$$

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

При последовательном соединении емкость батареи рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}. \qquad /3/$$

В данной работе емкость конденсатора определяется баллистическим гальванометром - прибором, предназначенным для измерения протекающего через него электрического заряда. В процессе измерения на рамку действует момент силы, пропорциональный силе тока

$$M_{в\text{р}} = k_1 \cdot I. \qquad /4/$$

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

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

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

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

где B - постоянная баллистического гальванометра.

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

$$q = B\alpha, \qquad /8/$$

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

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

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

Заменив эталонную емкость C неизвестной емкостью C_x, получим:

$$C_x U_x = B\alpha_x. \qquad /10/$$

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

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

Если измеряемые емкости незначительно отличаются по величине, конденсаторы удобно заряжать при одном и том же напряжении. В этом случае формула для расчета неизвестной емкости принимает вид

$$C_x = C\frac{n_x}{n}. \qquad /13/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

2.Подключить эталонный конденсатор С. Движок реостата установить в таком положении, чтобы в цепи было минимальное напряжение. Все ключи разомкнуты.

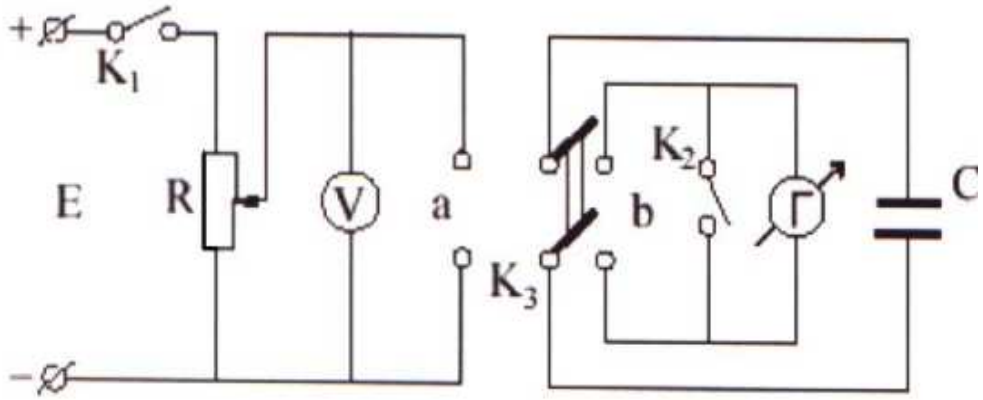


Рис.42.1

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

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

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

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

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№	Измеряемые емкости	Отклонение луча				$C_{изм.}$, мкф	$C_{вычисл.}$, мкф
		1	2	3	Средн.		
1	Эталон						
2	C_1						
3	C_2						
4	Паралл.соед.						
5	Последов. соед						

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42а.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА И БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: определение ёмкости конденсатора и батареи из двух конденсаторов при их параллельном и последовательном соединении.

Приборы и принадлежности: лабораторный модуль «Определение емкости конденсаторов» УНЦ "Физтехприбор", источник питания (ИП), стрелочный микроамперметр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика и расположенных на малом расстоянии друг от друга так, что электрическое поле заключено только в пространстве между проводниками, называется конденсатором. Простейшим является плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных друг другу проводящих пластин (обкладок), разделенных тонким слоем диэлектрика.

Для количественной характеризации конденсаторов вводят физическую величину электроемкость. Электроемкость конденсатора численно равна отношению заряда q, находящегося на одной из обкладок, к разности потенциалов между этими обкладками

$$C = \frac{q}{U}. \qquad /41.1/$$

В большинстве случаев электроемкость не зависит ни от заряда обкладок, ни от разности потенциалов между обкладками. Электроемкость зависит от формы, размеров конденсатора, материала диэлектрика и его температуры.

Так емкость плоского конденсатора можно вычислить по формуле

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \qquad /41.2/$$

где S – площадь обкладок, а d – расстояние между обкладками, причем предполагается, что выполняется соотношение $\sqrt{S} >> d$.

Электроемкость цилиндрического конденсатора вычисляют по формуле:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \ell}{\ln(r_2/r_1)}, \qquad /41.3/$$

где ℓ - длина образующей цилиндра; r_1 и r_2 – радиусы соответственно внутренней и внешней обкладок;

Несколько конденсаторов можно соединить в батарею. При параллельном соединении емкость батареи равна сумме емкостей каждого из конденсаторов

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i \,. \qquad /41.4/$$

При последовательном соединении емкость батареи рассчитывают по формуле

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i} \,. \qquad /41.5/$$

Электрическая схема лабораторного модуля производства НПФ «Эклус» изображена на его передней панели (рис. 42а.1). Внутри лабораторного модуля смонтированы: поляризационное реле типа РПС-32А и два конденсатора. Конденсаторы подключаются к источнику питания с помощью гибких выводов со штекерами. К гнездам *"PA"* подключается микроамперметр. Один из гибких выводов подключён через поляризационное реле, а второй - непосредственно к источнику тока. Переменное питание от источника на реле подается через тумблер "РПС" и кнопку "К" с нормально разомкнутыми контактами.

В первую половину периода замыкаются контакты реле, через которое подается напряжение на гибкие выводы, и конденсатор заряжается. Контакты, в цепь которых включен микроамперметр, разомкнуты. Во вторую половину, периода размыкаются контакты реле, через которые подается напряжение на конденсатор, и замыкаются контакты, через которые к заряженному конденсатору подключается измерительный прибор. Этот процесс проходит с частотой питания обмотки поляризационного реле, равной 50 Гц.



Рис. 42а.1

За период Т перезарядки конденсатора, через микроамперметр пройдёт заряд *Q,* величина которого благодаря подбору параметров конструктивных элементов измерительной схемы определяется по формуле

$$Q = IT = \frac{I}{\nu} \qquad /41.6/$$

Откуда $$C = \frac{I}{U\nu} \qquad /41.7/$$

где ν=50 Гц - частота перезарядки конденсатора, равная частоте питания поляризационного реле.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подсоедините к гнездам "*PA"* микроамперметр.
2. Подключите к лабораторному модулю источник питания ИП.'
3. Включите в сеть лабораторный модуль и источник питания.
4. Включите тумблер "РПС" на лицевой панели модуля.
5. Установите на источнике питания ИП напряжение *U*= 5 В - 10 В.
6. С помощью гибких выводов на панели лабораторного модуля подсоедините конденсатор емкостью C_1 к гнёздам 1 и 2 (рис. 42а.1).
7. Нажав и удерживая кнопку "К" в течение 3 - 4 с, измерьте среднее значение тока разряда конденсатора C_1.
8. Присоединить гибкие выводы к конденсатору C_2 (гнезда 2 и 3) и измерьте его ток разряда.
9. Присоедините гибкие выводы к гнездам 1 и 3 и измерьте ток разряда последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2.
10. Закоротите гнезда 3 и 4 перемычкой, подсоедините гибкие выводы к гнездам 1 и 2 и измерьте ток разряда параллельно соединенных конденсаторов C_1 и C_2.
11. Результаты измерений занесите в таблицу результатов наблюдений.

12. Повторить пункты 1 - 6, изменяя напряжение на источнике ИП в диапазоне 5 - 10 В с шагом в 1 В.
13. По формуле /41.7/ рассчитайте ёмкости конденсаторов C_1 и C_2 и по формулам /41.4/ и /41.5/ их параллельного и последовательного соединений. Ёмкость вычисляйте с точностью до четвертой значащей цифры после запятой. Результаты расчета занесите в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U, В	***I, C***	C_1	C_2	$C_{пос}$	$C_{пар}$
5	***I***, мкА				
	C, мкФ				
6	***I***, мкА				
	C, мкФ				
7	***I***, мкА				
	C, мкФ				
8	***I***, мкА				
	C, мкФ				
9	***I***, мкА				
	C, мкФ				
10	***I***, мкА				
	C, мкФ				

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ

N	*C ,мкФ*	ΔC_i , мкФ	$(\Delta C_i)^2$, мкФ^2
1			
2			
3			
4			
5			
6			

14. Рассчитайте среднее значение одной из измеряемых емкостей, абсолютную и относительную погрешности определения одной из ёмкостей по формулам /41.8/ и /41.9/. Результаты расчета занесите в таблицу результатов вычислений.

$$\Delta C_{ср.} = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta C_i^2}{n(n-1)}} \qquad /41.8/ \qquad \varepsilon_c = {\Delta C_{ср.}}/{C_{ср.}} \cdot 100\% \qquad /41.9/$$

C = (±)·мкФ, ε_c = %.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение электроёмкости конденсатора. В каких единицах измеряется электроёмкость?
2. От чего зависит электроёмкость конденсатора?
3. Запишите формулу электроёмкости плоского конденсатора.
4. Запишите формулу электроёмкости цилиндрического конденсатора.

5. Запишите формулу для вычисления суммарной ёмкости батареи конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.
2. Выведите формулу для вычисления суммарной ёмкости батареи конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43.
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ КИРХГОФА

Цель работы: проверить справедливость правил Кирхгофа для разветвленной цепи.

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

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

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

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

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

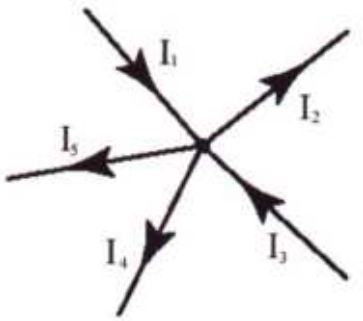


Рис.43.1

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

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

$$\begin{aligned} I_1R_1 &= \phi_B - \phi_A + E_1. \\ -I_2R_2 &= \phi_c - \phi_B - E_2. \qquad /2/ \\ -I_3R_3 &= \phi_D - \phi_C. \\ -I_4R_4 &= \phi_A - \phi_D. \end{aligned}$$

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

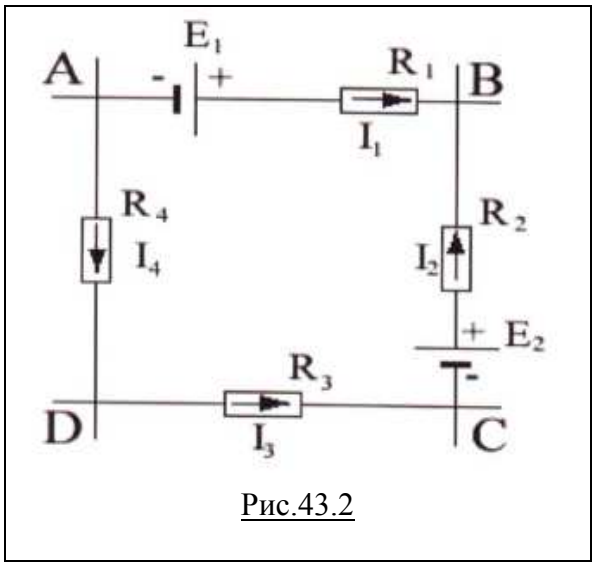


Рис.43.2

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

При сложении уравнений /2/ получаем:

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

В общем случае получаем уравнение

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

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

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

4.Вычислить абсолютные погрешности измеренных значений напряжений и Э.Д.С. по классу точности прибора ε и пределу его измерения $U_{пред}$. $\Delta U(\Delta E) = <\varepsilon> \cdot U_{пред}$ /3/

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

5.Используя закон Ома, рассчитать значения сил токов на каждом участке цепи. Вычислить относительные погрешности измерения токов по формуле $\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_u^2 + \varepsilon_R^2}$ /5/

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

Данные занести в таблицу 1 результатов наблюдений.

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

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

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

Таблица 1 результатов наблюдений

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

Погрешности сумм определяются выражениями

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

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

Таблица 2. Результаты проверки первого правила Кирхгофа

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

Таблица 3. Результаты проверки второго правила Кирхгофа

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Сопротивление однородного проводника постоянного поперечного сечения можно определить по формуле $$R = \rho \frac{l}{S}, \qquad /1/$$

где ρ - удельное сопротивление материала проводника, l - длина проводника, S – площадь поперечного сечения проводника. Измерив сопротивление, длину и площадь поперечного сечения проводника, можно рассчитать его удельное сопротивление $$\rho = \frac{RS}{l}. \qquad /2/$$

Сопротивление в данной работе определяется с помощью моста постоянного тока. Мост постоянного тока предназначен для измерения сопротивления методом сравнения. Схема простейшего моста изображена на рис.44.1. Он состоит из четырех сопротивлений, образующих замкнутый четырех- угольник:

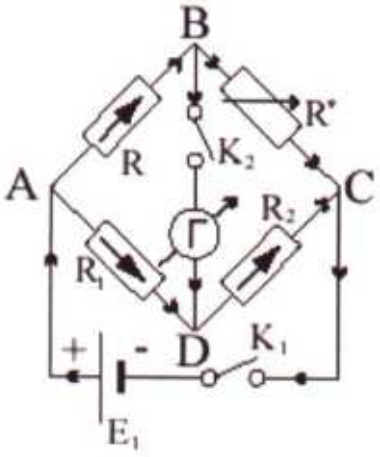


Рис.44.1

R – искомое сопротивление; R^* - магазин сопротивлений, с помощью которого можно набирать различные значения сопротивления в широком диапазоне; R_1 и R_2 - известные сопротивления. В одну диагональ моста (AC) включен источник тока, в другую (BD) - чувствительный гальванометр Г. Если замкнуты ключи K_1 и K_2, то по параллельным ветвям ABC, ADC и в цепи гальванометра пойдут токи, показанные на рисунке. Падения напряжения на всех четырех сопротивлениях определяются из закона Ома

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

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

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

В этом случае потенциалы точек B и D будут одинаковы ($\varphi_B = \varphi_D$)_ и ток в цепи гальванометра $I_г$ будет равен 0. Отсюда по первому правилу Кирхгофа $I = I^*, \quad I_1 = I_2$ /5/

Такое состояние моста называется уравновешенным. Из равенств (4) и (5) следует

$$\frac{R}{R^*} = \frac{R_1}{R_2}. \qquad /6/$$

Зная величины сопротивлений R^*, R_1, R_2 можно определить неизвестное сопротивление

$$R = \frac{R_1}{R_2} \cdot R^*. \qquad /7/$$

Равновесия моста можно добиться, изменяя R^*, а также R_1 и R_2. Обычно задаются не значения сопротивлений R_1 и R_2, а их отношение $n = \frac{R_1}{R_2}$. /8/

Тогда $R = n \cdot R^*$ /9/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью моста постоянного тока измерить сопротивление R реостата. Измерения производить согласно инструкции, данной на рабочем месте.
2. Измерить внешний диаметр витка D штангенциркулем и длину намотки реостата L линейкой.
3. Подсчитать число витков N. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
4. Определить диаметр проволоки по формуле $d = \frac{L}{N}$ /10/
5. Определить средний диаметр витка $D_{cp} = D - d$. /11/
6. Площадь поперечного сечения провода равна $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi L^2}{4N^2}$. /12/
7. Длина проволоки равна $l = \pi D_{cp} N$. /13/
8. Определить удельное сопротивление проводника, из которого изготовлен реостат по формуле

$$\rho = \frac{RL^2}{4D_{cp}N^3} \qquad /14/$$

9. Формулу относительной погрешности $\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho}$ можно вывести из выражения /15/. При выводе формулы относительной погрешности воспользуемся соотношением

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

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

10. Рассчитать относительную погрешность измерения удельного сопротивления по формуле /16/ и абсолютную погрешность измерения удельного сопротивления по формуле $\Delta\rho = \rho\varepsilon_\rho$. При вычислении относительной погрешности измерения удельного сопротивления принять:

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

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

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

$K_\alpha = 2$ - коэффициент Гаусса при надежности $\alpha = 0{,}95$;
$\Delta N = \pm 1$ виток.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 45
ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: экспериментальная проверка зависимости сопротивления металлического проводника от температуры и определение температурного коэффициента сопротивления.

Приборы и принадлежности: термостат, проводник в виде катушки, измерительный мост, термометр, нагреватель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Сопротивление металлов возрастает с увеличением температуры. В классической электронной теории проводимости металлов это явление объясняется следующим образом. При нагревании металлов возрастает средняя скорость хаотического движения электронов. Это приводит к увеличению частоты столкновений свободных электронов с ионами, уменьшению средней скорости направленного движения электронов и к увеличению сопротивления.

Зависимость сопротивления металлов от температуры в первом приближении может быть выражена линейной функцией $R = R_0 (1+\alpha t)$, /1/

где R – сопротивление проводника при температуре t^0C; R_0 - сопротивление при 0^0C; α - температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления при нагревании проводника на 1 К $\alpha = \frac{dR}{RdT}$. /2/

Размерность температурного коэффициента сопротивления в системе СИ $[\alpha]=K^{-1}$.

В данной работе с помощью измерительного моста постоянного тока определяется сопротивление металлической проволоки при различной температуре (принцип работы моста постоянного тока и метод измерения изложены в теории лабораторной работы № 44). Используя измеренные значения сопротивления R и температуры t, строят график зависимости R= f(t). При этом прямую проводят через экспериментальные точки таким образом, чтобы она наилучшим

образом соответствовала этим точкам. На прямой выбирают две точки с координатами (R_1,t_1) и (R_2,t_2). Для этих значений справедливы соотношения:

$$R_1 = R_0(1+\alpha t_1) \quad \text{и} \quad R_2 = R_0(1+\alpha t_2), \qquad /3/$$

из которых вытекает

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \qquad /4/$$

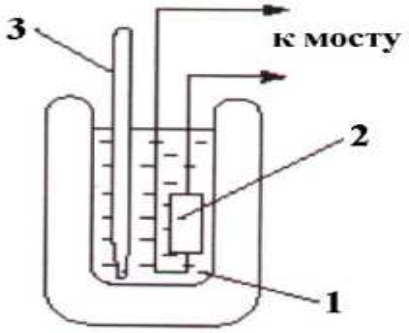


Рис.45.1

Установка для проведения эксперимента, рис.48.5, представляет собой термостат (1) с погруженной в него катушкой проволоки (2) из исследуемого проводника и термометр (3).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Опустить в термостат исследуемый проводник и термометр. Когда показания термометра перестанут изменяться, измерить мостом сопротивление проводника при данной температуре. Значения сопротивления проводника и температуру записать в таблицу результатов наблюдений.
2. Включить нагреватель и поднять температуру в термостате на 5-10^{0}C. Измерить вновь сопротивление и температуру. Повторить измерения 7-8 раз.
3. Построить график зависимости R = f(t).
4. Рассчитать величину температурного коэффициента сопротивления по формуле /4/ по координатам двух точек, взятых на графике.

Таблица результатов наблюдений

№ п.п	1	2	3	4	5	И т.д.
t^0,C						
R, Ом						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сопротивление проводника? В каких единицах оно измеряется?
2. Запишите формулу для вычисления сопротивления однородного проводника постоянного сечения?
3. Что такое удельное сопротивление материала? В каких единицах оно измеряется?
4. Запишите формулы и нарисуйте графики зависимости сопротивления и удельного сопротивления металлических проводников от температуры.
5. Каков физический смысл температурного коэффициента сопротивления? В каких единицах измеряется температурный коэффициент сопротивления?
6. От чего зависит удельное сопротивление проводника?
7. От чего зависит отрезок, отсекаемый графиком зависимости сопротивления от температуры на оси сопротивлений. Какими технологическими приемами его можно увеличить, уменьшить?
8. От чего зависит угол наклона графика зависимости сопротивления металла от температуры? Как его можно изменить?
9. Объясните причины зависимости сопротивления металлов от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - §98.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §34.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §V11,2.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 46
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО ДИОДА

Цель работы: получить экспериментальные характеристики вакуумного диода и исследовать закономерности прохождения электрического тока в вакууме.

Приборы и принадлежности: вакуумный диод, миллиамперметр, два вольтметра, два реостата, два ключа, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В современной технике находят широкое применение электровакуумные приборы - электронные лампы, электронно-лучевые трубки и т.д. Их действие основано на использовании термоэлектронной эмиссии - явления испускания электронов нагретыми металлами. Физическая сущность этого явления заключается в следующем. В металлах имеется большое число свободных электронов, совершающих непрерывное хаотическое тепловое движение и обладающих определенной кинетической энергией. Однако электроны не могут свободно выйти из металла. Этому противодействуют силы притяжения, действующие на электрон со стороны положительных зарядов, расположенных в узлах кристаллической решетки. Благодаря взаимодействию с положительно заряженными ионами электроны в металле обладают отрицательной потенциальной энергией, т.е. находятся в потенциальной яме.

Для выхода электрона из металла необходимо совершить определенную работу, называемую работой выхода. При любой температуре имеется некоторое количество электронов, кинетическая энергия которых превышает работу выхода, однако при комнатной температуре это количество очень невелико. Для того, чтобы получить значительный поток электронов из металла, его необходимо нагреть до температуры 1000 – 2000 К.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в вакуумных электронных лампах для получения потока электронов, которые являются носителями электрического тока в вакууме между электродами лампы. Простейшей электронной лампой является двухэлектродная электронная лампа - диод. Он представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Внутри баллона расположены два металлических электрода: анод, выполненный в форме цилиндра, и катод в виде тонкой нити, расположенной по оси цилиндра и подогреваемой электрическим током от специального источника накала. Схема включения диода в цепь показана на рис.46.1 ($E_н$ – батарея накала, E_A - анодная батарея).

Вокруг катода, разогреваемого током накала $I_н$, образуется «облако» вылетевших электронов. Под действием электрического поля, создаваемого между катодом и анодом анодной батареей, электроны устремляются к аноду и создают в цепи анодный ток I_A.

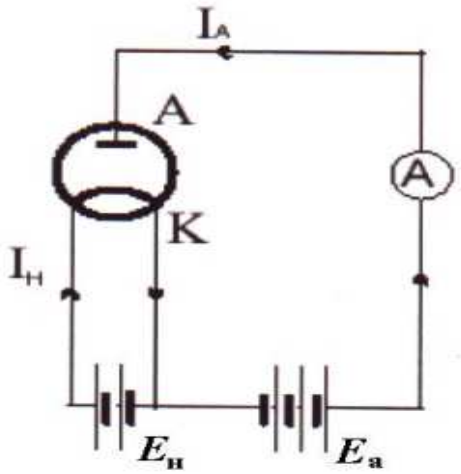


Рис.46.1

С увеличением напряжения между катодом и анодом анодный ток будет возрастать, так как будет увеличиваться количество электронов, отрываемых электрическим полем от «облака». График зависимости анодного тока от анодного напряжения представлен на рис.46.2. В режиме прохождения тока, далеком от насыщения (участок ОС на графике), зависимость силы анодного тока от анодного напряжения выражается формулой Богуславского - Легмюра (закон трех вторых)

$$I_A = B \cdot U_A^{\frac{3}{2}}, \qquad /1/$$

где В - коэффициент, зависящий от формы, расположения и размеров электродов.

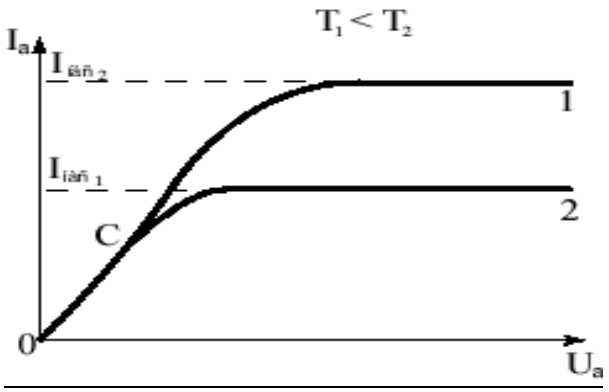


Рис.46.2

С увеличением анодного напряжения анодный ток достигает насыщения. Насыщение обусловлено тем, что все электроны, испускаемые за некоторый промежуток времени катодом, достигают за то же время анода. Если повысить

пературу катода, увеличив ток накала, то сила тока насыщения возрастает. Зависимость плотности тока насыщения от температуры выражается формулой Ричардсона – Дэшмана:

$$j_{нас} = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}} \qquad /2/$$

где Т - температура катода; А - работа выхода электрона из катода; С - постоянная величина, теоретически одинаковая для всех металлов. Катоды многих ламп покрываются слоем оксида бария или тория. Такие катоды обладают меньшей работой выхода и позволяют получать большую электронную эмиссию уже при температурах 600...800^0 С.

Если поменять полярность подключения катода и анода к анодной батарее, ток через вакуумный диод проходить не будет, т.е. он обладает свойством односторонней проводимости. Поэтому вакуумные диоды используются для выпрямления переменного тока.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать цепь согласно схеме (рис.46.3).

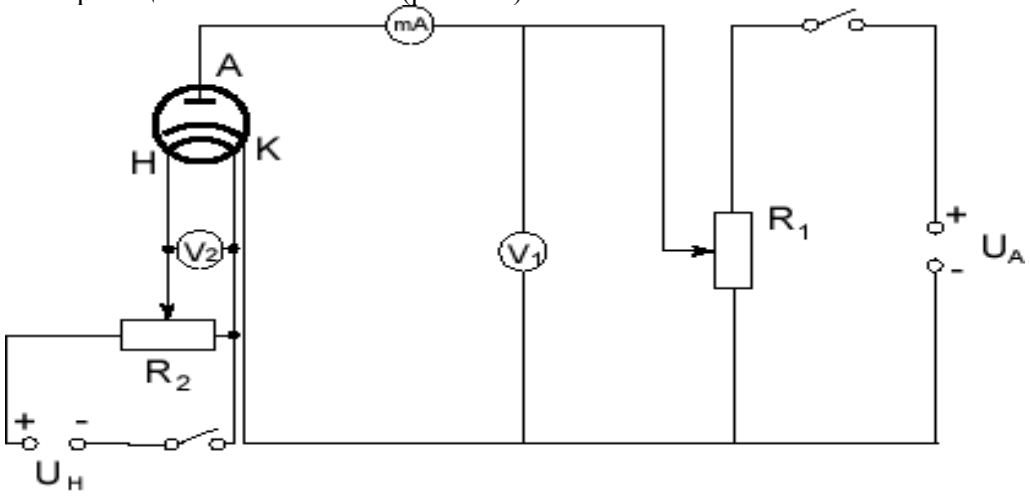


Рис.46.3

Примечание: В исследуемом диоде, как в большинстве электронных ламп, используется косвенный канал; ток накала непосредственно на катод не подается, а проходит по специальной нити накала, подогревающей катод. На схеме нить накала изображена отдельно от катода.

2.Снять две-три анодные характеристики при различных напряжениях накала от 1,5 до 3,0 В (по заданию преподавателя). Значения анодного напряжения изменять при этом от 0 до 12...15 В. Данные занести в таблицу 1 результатов наблюдений.

3.Построить графики зависимости $I_A = f(U_A)$ и сделать вывод: как изменяется сила тока насыщения в зависимости от температуры катода.

4.Снять зависимости I_A от U_A при номинальном напряжении накала $U_н = 6$ В. Данные занести в таблицу 2 результатов наблюдений. Построить график зависимости I_A от $U_A^{3/2}$ и убедиться в справедливости закона Богуславского - Ленгмюра при значениях силы анодного тока, далеких от насыщения.

ТАБЛИЦА 1 РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U_A, В									
$U_{н1}$=	I_A,мА								
$U_{н2}$=	I_A,мА								
$U_{н3}$=	I_A,мА								

ТАБЛИЦА 2 РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U_A,В									
$U^{3/2}$									
I_A, мА									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое работа выхода электрона из металла? В каких единицах она измеряется?
2. От чего зависит работа выхода электрона из металла?
3. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии?
4. Опишите принцип работы вакуумного диода.
5. От чего и как зависит анодный ток при малых напряжениях на аноде?
6. Что такое ток насыщения. От каких параметров он зависит?
7. Назовите технические применения вакуумных диодов.
8. Запишите формулу закона Богуславского - Ленгмюра.
9. Запишите формулу Ричардсона - Дэшмана. От чего зависит постоянная в этом законе?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, , §104,105.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987. - §61.

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

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

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

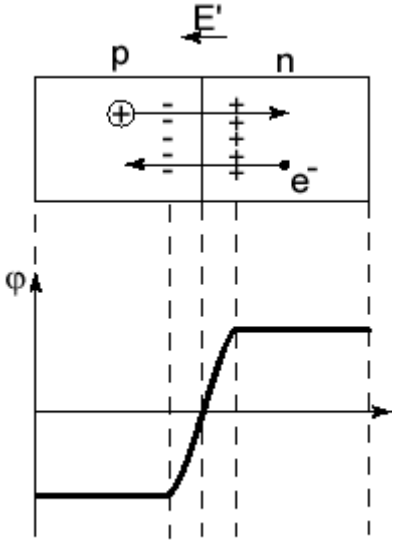


Рис.47.1

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

Через пограничный слой от p- к n- полупроводнику течет ток основных носителей, а в обратном направлении – ток не-

основных носителей. Основными носителями в n-полупроводнике являются свободные электроны, а в p-полупроводнике – дырки. Неосновными носителями в n-полупроводнике являются дырки, в p-полупроводнике – свободные электроны. В отсутствии внешнего поля суммарный ток равен нулю.

Если к p-n переходу приложить внешнее электрическое поле $\overline{E}$ направления, противоположного направлению поля двойного слоя (такое поле называют прямым), подключив к p- полупроводнику «+», а к n-полупроводнику «-» источника тока, то внешнее поле ослабит внутреннее, и высота потенциального барьера уменьшится. Ток основных носителей, текущий через контакт, увеличится, а ток неосновных носителей не изменится. При одном и том же напряжении ток основных носителей во много раз превышает ток неосновных носителей, так как концентрация основных носителей во много раз превышает концентрацию неосновных. Возникнет суммарный ток, называемый прямым током, как показано на рис.47.2.

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

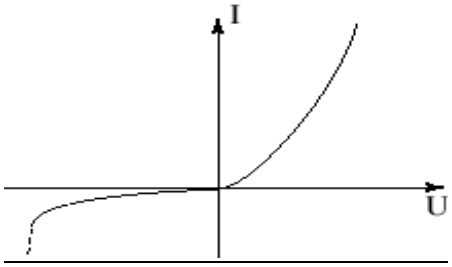


Рис.47.2

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

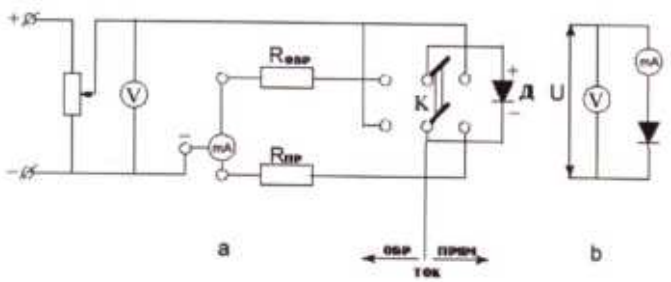


Рис.47.3

1.Собрать схему по рис.47.3а.
На схеме обозначены: R – реостат; V – вольтметр; mA – миллиамперметр; $R_{обр}$, $R_{пр}$ - добавочные резисторы, включаемые для того, чтобы сопротивление миллиамперметра на обоих пределах было равным 1 кОм; К - переключатель для изменения знака напряжения на диоде (стрелками показано его положение для измерения прямого и обратного тока); Д - диод, исследуемый в работе.

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

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

$$U_Д = U - IR_A . \qquad /1/$$

3.Изменив коммутационным ключом К полярность напряжения на диоде, повторить измерения по п.2 для обратной ветви вольт-амперной характеристики.
4.Повторить п.п. 2 и 3, заменив диод на другой.
5.Результаты измерений изобразить графически, откладывая по оси абсцисс напряжение на диоде - $U_д$, а по оси ординат - ток через диод. Прямой ток и прямое напряжение откладывать в положительном направлении осей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 48
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы: исследовать зависимость сопротивления полупроводника от температуры и по результатам эксперимента определить ширину запретной зоны.

Приборы принадлежности: терморезистор (термистор), мост постоянного тока для измерения сопротивления термистора, термостат для стабилизации температуры во время измерений, термометр, электронагреватель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Энергетическая диаграмма чистых полупроводников характерна наличием запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (рис.48.1). Ширина запрещенной зоны - $\Delta\varepsilon$ - величина порядка 0,1 ...1,0 эВ. Уровень Ферми для чистых полупроводников находится посередине запрещенной зоны. Вероятность $p(\varepsilon)$ обнаружить электрон на уровне с



Рис.48.1

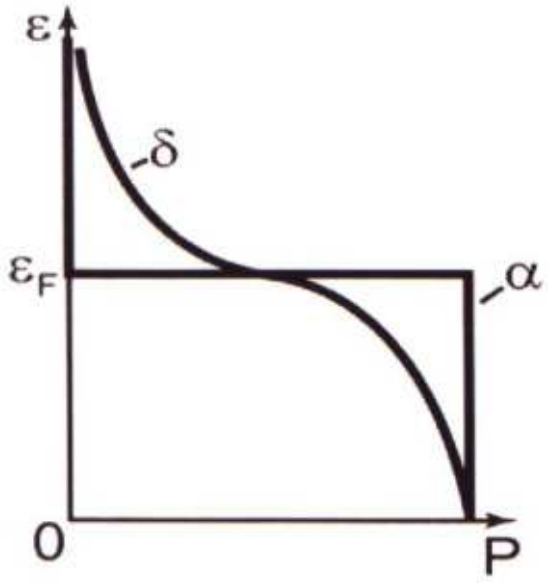


Рис.48.2

энергией ε задается распределением Ферми

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon-\varepsilon_F}{kT}} + 1}, \qquad /1/$$

где: ε_F - значение энергии Ферми; T - абсолютная температура; k - постоянная Больцмана; *e* - основание натуральных логарифмов.

При абсолютном нуле и $\varepsilon<\varepsilon_F$, $p(\varepsilon)=1$, а при $\varepsilon>\varepsilon_F$, $p(\varepsilon)=0$, т.е. все электроны находятся ниже уровня Ферми в валентной зоне, и проводимость отсутствует (рис.48.2), кривая ((δ)). При T>0

К экспонента $e^{\frac{\varepsilon-\varepsilon_F}{kT}}$ в формуле /1/ много больше 1, когда $\varepsilon>\varepsilon_F$. Т.е., при температурах отличных от нуля вероятность обнаружить электрон в зоне проводимости равна

$$p(\varepsilon) = e^{-\frac{\varepsilon-\varepsilon_F}{kT}}, \qquad /2/$$

(рис.48.2, кривая (δ)). Концентрация электронов в зоне проводимости пропорциональна этой вероятности. С учетом того, что $\varepsilon_0-\varepsilon_F=\Delta\varepsilon/2$, получаем зависимость концентрации электронов проводимости от температуры

$$n \approx e^{\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}}. \qquad /3/$$

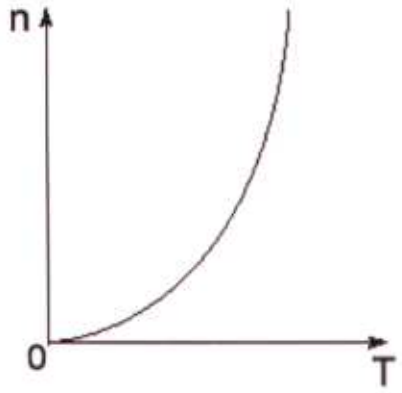


Рис.48.3

График зависимости n(T) представлен на рис.48.3. Таким образом, концентрация электронов проводимости у полупроводников сильно зависит от температуры.

Непосредственное измерение концентрации носителей затруднительно, однако для проверки выражения (3) можно использовать тот факт, что эта концентрация определяет проводимость полупроводника. Действительно, для полупроводников

$$j = e\left(n_n u_n + n_p u_p\right)E, \qquad /4/$$

где j - плотность тока; E - напряженность электрического поля; n_n и n_p - концентрация свободных электронов и дырок; u_n, u_p - подвижности электронов и дырок, соответственно.

Концентрация электронов и дырок в чистом полупроводнике одинаковы, т.к. они генерируются и рекомбинируют только парами. Поэтому $n_n=n_p=n$ и плотность тока равна

$$j=en\,(u_n + u_p)\,E. \qquad /5/$$

Из закона Ома в дифференциальной форме следует, что выражение

$$\sigma=en(u_n + u_p) \qquad /6/$$

представляет собой удельную электропроводность полупроводника, связанную с удельным сопротивлением соотношением $\sigma=1/\rho$. Подвижности носителей не зависят от температуры, поэтому из /3/ и /6/ следует, что

$$\sigma \approx e^{\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}}. \qquad /7/$$

Измерение температурного хода удельной электропроводности, или, обратной ей величины ρ - удельного сопротивления, позволяет проверить приведенные выше теоретические соображения о зависимости концентрации носителей тока в полупроводниках от температуры.

Сопротивление проводника пропорционально его удельному сопротивлению или обратно пропорционально удельной электропроводности. Тогда из /7/ следует

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}}. \qquad /8/$$

Логарифмируя это выражение получим

$$\ln R = \ln\left(R_0\right) + \frac{\Delta\varepsilon}{2kT} \qquad /9/$$

т.е. зависимость логарифма сопротивления полупроводника от величины обратной температуре 1/T является линейной (рис.48.4).

Тангенс угла наклона этой прямой к оси 1/T равен $\dfrac{\Delta E}{2k} = 2k\dfrac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{1}{T_2} - \dfrac{1}{T_1}}$, ***/10/***

откуда ширина запрещенной зоны равна $\Delta\varepsilon = 2k\dfrac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{1}{T_2} - \dfrac{1}{T_1}}$. /11/

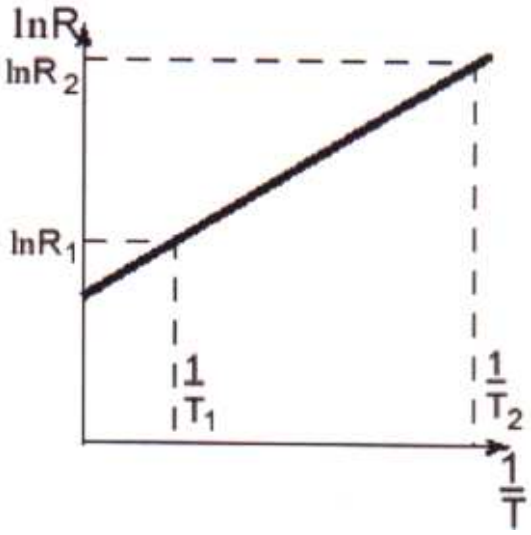


Рис.48.4

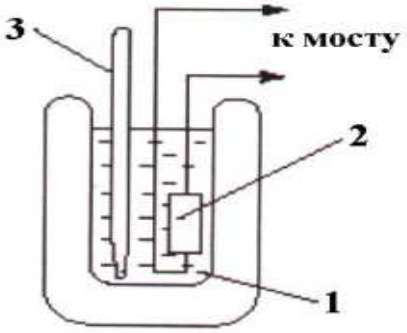


Рис.48.5

Установка для проведения эксперимента (рис.48.5) представляет собой термостат (1). В воду опускают термистор (2), подключенный к измерительному мосту, и термометр (3).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Налить в термостат воду и опустить туда термометр с термистором. Выждав, пока показания термометра не перестанут изменяться, измерить мостом сопротивление термистора. Записать в таблицу значения сопротивления и температуры.
2. Подогреть воду в термостате, включив питание нагревателя. Подняв температуру на несколько (7-10) градусов, отключить нагреватель. Повторить измерения по п.1. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
3. Повторить пункты 2 и 3 6-7 раз, постепенно повышая температуру воды до 70-80 ^{0}C. Температуру измерять с точностью $\pm 0{,}5^0$C, сопротивление - с точностью ± 1 Ом.
4. Вычислить абсолютные температуры, их обратные величины и логарифмы сопротивлений. Построить график зависимости $\ln R = f(1/T)$.
5. На прямой, проведенной через экспериментальные точки наилучшим образом, взять как можно дальше друг от друга две точки. По их координатам с помощью формулы /8/ вычислить ширину запрещенной зоны полупроводника, использованного в качестве материала для термистора. Выразить эту величину в электрон-вольтах. 1 эВ = $1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№ п/п	t,^{0}C	T, K	$\frac{1}{T}$, 10^{-3} K^{-1}	R, Ом	$ln\ R$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель работы и что в ней измеряется?
2. Укажите характерные интервалы значений удельного сопротивления для металлов, полупроводников и диэлектриков.
3. Изобразите графики зависимости удельного сопротивления от температуры для металлов, полупроводников, диэлектриков, электролитов.
4. Используя распределение Ферми, покажите, что при абсолютном нуле в зоне проводимости электронов не бывает.
5. Вывести зависимость сопротивления полупроводников от температуры.
6. Получите расчетную форму для вычисления ширины запрещенной зоны полупроводника.

7. От каких факторов зависит число энергетических уровней в разрешенной зоне.
8. От чего зависит число примесных энергетических уровней?

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 49
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ И КПД В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное исследование зависимости полной, полезной мощности и КПД источника тока от отношения сопротивления нагрузки и источника.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, состоящая из миллиамперметра, вольтметра, источника тока, набора сопротивлений.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Источник тока, нагруженный на внешнее сопротивление (рис.49.1), создает в цепи ток, определяемый по закону Ома для замкнутой цепи

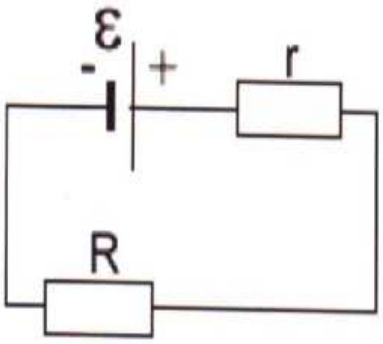


Рис.49.1

$$I = \frac{E}{R + r}, \qquad /1/$$

где Е – ЭДС источника тока; R – сопротивление нагрузки; r – внутреннее сопротивление источника тока.

Для замкнутой цепи постоянного тока характерны следующие закономерности. Полная мощность, выделяемая во всей цепи

$$P = \frac{A}{t} = E \cdot I = \frac{E^2}{R + r}. \qquad /2/$$

В нагрузке, на сопротивлении R выделяется только часть этой мощности, называемая полезной мощностью которая называется полезной мощностью $P_П$.

$$P_n = U \cdot I = I^2 R = \frac{E^2}{(R + r)^2} \cdot R = \frac{E^2}{R + r} \cdot \frac{R}{R + r}, \qquad /3/$$

Отношение полезной мощности $P_П$ к полной мощности, развиваемой источником в цепи, называется коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока η

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{R}{R + r}. \qquad /4/$$

Из формул /2/, /3/, /4/ видно, что P, $P_П$, η зависят от соотношения между сопротивлениями R и r, то есть R/r.

Полная мощность, развиваемая источником тока, максимальна при коротком замыкании (R = 0); в этом случае она равна

$$P_{max} = P_{кз} = \frac{E^2}{r}. \qquad /5/$$

При коротком замыкании вся мощность выделяется в самом источнике и оказывается бесполезной.

Из формулы /3/ следует, что полезная мощность минимальна и равна нулю при R = 0 и R=∞; при некотором соотношении между R и r она достигает максимума. Найдем это соотношение. Для этого продифференцируем формулу /3/ по R и приравняем производную к нулю

$$\frac{dP_n}{dR} = E^2 \frac{(R-r)}{(R+r)} = 0 \ . \qquad /6/$$

Из формулы /5/ следует, что полезная мощность $P_П$ максимальна при R=r и равна $P_{П\,max}=E^2/4r$. Видно, что максимальная полезная мощность в 4 раза меньше максимальной полной мощности. Согласно /4/ КПД в этом случае составляет η = 0,5 (т.е. 50%).

Напряжение на нагрузке $U_н$ определяется выражением $$U = IR = \frac{E}{R+r} R \ . \qquad /7/$$

Из него следует, что U=E при R→ ∞, и U = 0 при коротком замыкании.

Сила тока в цепи максимальна при коротком замыкании $I_{кз}$=E/r и монотонно убывает до 0 при R=∞ (разомкнутая цепь).

Схема установки для исследования цепи постоянного тока представлена на рис. 49.2. Переключателем K_1 источники E_1 и E_2 с различными ЭДС и внутренними сопротивлениями могут быть поочередно подключены к сопротивлению нагрузки R.

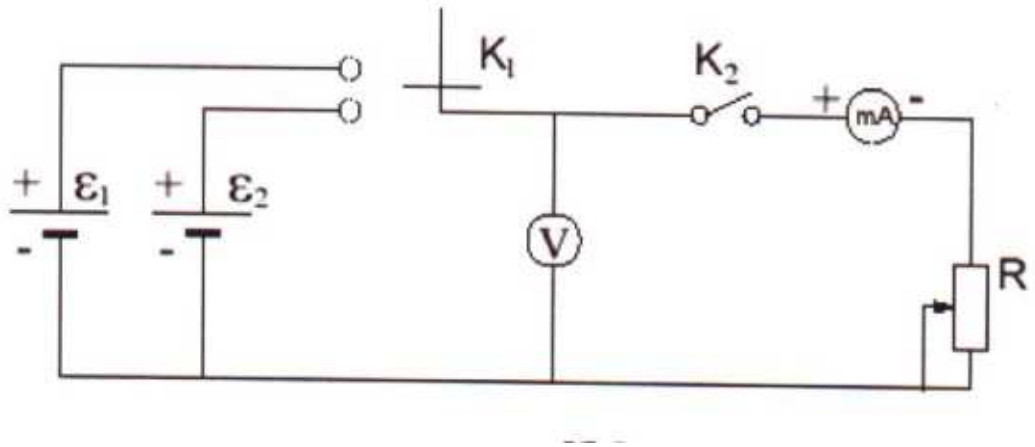


Рис.49.2

Силу тока I и напряжение U на сопротивлении R измеряют миллиамперметром (мА) и вольтметром (V). Режим разомкнутой цепи осуществляется переключателем K_2.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать и проверить схему (рис.49.2).
2. Измерить ЭДС E_1, включив ключ K_1 при разомкнутом ключе K_2.
3. Подключить к источнику ЭДС E_1 нагрузку R и, варьируя R от наименьшего до наибольшего значения, измерять силу тока I и напряжение нагрузки U. Данные записать в таблицу результатов наблюдений.
4. Вычислить для каждого значения силы тока I и напряжения U, значения R по закону Ома (R=U/I), P, $P_П$, и η по формулам /2/,/3/,/4/ и занести их в таблицу.
5. По измеренному значению E и двум произвольным значениям R вычислить внутреннее сопротивление источника тока r с помощью формулы, вытекающей из /1/

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2} \ . \qquad /8/$$

6. Для каждого опыта найти отношение R/r.
7. Построить на одном рисунке зависимости P, $P_П$ и η от отношения R/r.
8. По построенным графикам определить $P_{П\,max}$ и $P_{к.з.}$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U, B	E			
I(A)	0			
R (Ом)	∞			
R/r				
P(Вт)				
$P_П$ (Вт)				
η				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение силы тока, электродвижущей силы источника, падения напряжения, разности потенциалов.
2. Что понимают под сторонними силами, и какова их роль в цепи постоянного тока?
3. Постройте график КПД источника тока от величины внешнего сопротивления. Чему равен предельный КПД источников тока.
4. Напишите выражения для полной и полезной мощности в электрической цепи.
5. При каком условии полезная мощность, выделяемая в цепи, максимальна? Чему она равна?
6. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца и запишите его математическое выражение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985,, § 96-99.
2. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985,, §34,35,37, 38.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.Л.Детлаф - М.: ВШ, 1980, §111.1-2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 49а
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ – АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование вольт–амперной характеристики и зависимости мощности от напряжения лампы накаливания.

Приборы и принадлежности: лампы накаливания различной мощности, амперметр, вольтметр, ЛАТР.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Из закона Ома для однородного участка цепи вытекает, что ток I в лампе накаливания прямо пропорционален приложенному напряжению U

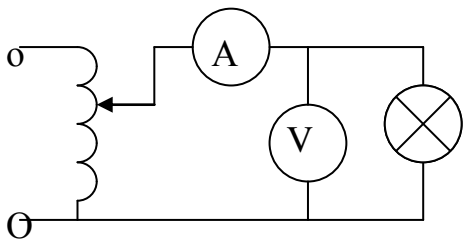


Рис.49а.1

$$I = \frac{U}{R}, \qquad /1/$$

где R – сопротивление лампы накаливания.

Амперметр измеряет не только ток, протекающий через лампу, но и ток, протекающий через вольтметр (рис.49а.1). Истинный ток через лампу вычисляется с учетом сопротивления вольтметра $I_Л = I - \frac{U}{R_V}$. /2/

Вольт–амперная характеристика лампы накаливания нелинейная, что объясняется зависимостью сопротивления от температуры $R=R_0(1+\alpha t)$, /3/
где R – сопротивление при температуре t^oC; R_0 – сопротивление при 0^oC;

α - температурный коэффициент сопротивления. В свою очередь, температура нити лампы накаливания зависит от выделяющейся в ней электрической мощности, а, следовательно, от приложенного напряжения. Поэтому сопротивление должно зависеть от приложенного напряжения. Так, сопротивление лампы накаливания номинальной мощностью 40 Вт изменяется от R=88,6 Ом при комнатной температуре до 1224 Ом при напряжении на лампе 240 В. Сопротивления ламп были вычислены по формуле

$$R_Л = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}. \qquad /4/$$

Из закона Джоуля–Ленца вытекает, что электрическая мощность, выделяющаяся в лампе равна

$$P_Л = \frac{U^2}{R_Л}. \qquad /5/$$

Используя /4/ получим

$$P_Л = U(I - \frac{U}{R_V}). \qquad /6/$$

Зависимость мощности, выделяемой на лампе, от приложенного напряжения также отличается от квадратичной. Причины этого также связаны с изменением сопротивления при увеличении температуры.

Схема установки для исследования цепи постоянного тока представлена на рис.50.1. Она состоит из лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), амперметра (А) и подключенного параллельно лампе накаливания вольтметра (V).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

9. Собрать и проверить схему (рис.49а.1).
10. Определить цену деления амперметра и вольтметра.
11. Изменяя величины подаваемого напряжения ЛАТРом, измерить величину тока и напряжения для 10÷15 значений напряжения. Данные записать в таблицу результатов наблюдений.
12. Вычислить для каждого значения силы тока I и напряжения U значения тока через лампу $I_Л$ по формуле /2/, сопротивления лампы $R_Л$ по формуле /4/ и мощности, выделяемой на лампе $P_Л$ по формуле /6/. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. По полученным данным построить графики $I_Л = f(U)$, $R_Л = f(U)$ и $P_Л = f(U)$. Убедиться в том, что все эти графики нелинейные.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

U, В										
I, А										
R, Ом										
$I_Л$, А										
$R_Л$, Ом										
$P_Л$, (Вт										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение силы тока, падения напряжения, сопротивления. В каких единицах они измеряются?
2. Запишите формулу закона Ома для однородного участка цепи.
3. Запишите формулу электрической мощности.
4. Запишите формулы тока, сопротивления и мощности на лампе с учетом сопротивления вольт .метра..
5. Постройте график КПД источника тока от величины внешнего сопротивления. Чему равен предельный КПД источников тока?
6. Каковы причины нелинейности вольт–амперной характеристики лампы накаливания?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985, - § 96-99.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев Т.2. - М.: Наука, 1987- §34,35,37, 38.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: ВШ, 1980 - §111.1-

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

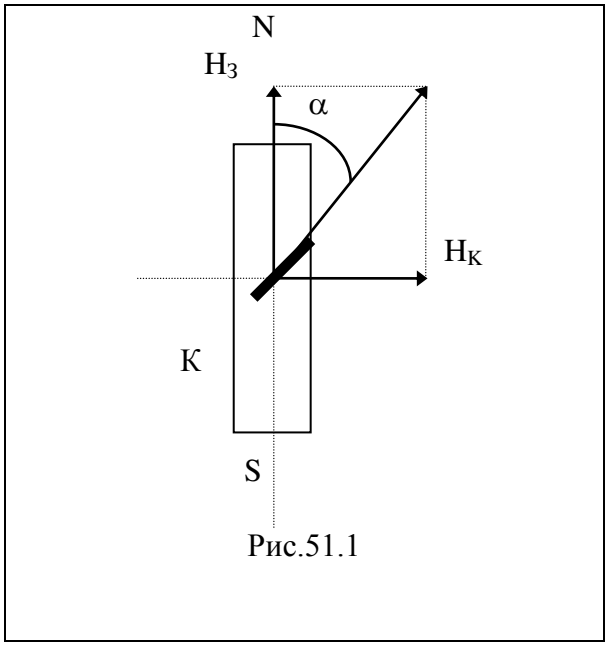


Рис.51.1

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

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

Величина напряженности поля $H_к$, созданного током в центре витка, вычисленная по закону Био-Савара-Лапласа для случая кругового тока, равна: $H_K = \frac{I}{2r}$, /2/

где I - ток, текущий в катушке, r - радиус витка катушки.

Напряженность магнитного поля в катушке с числом витков N вычисляется по формуле /2/ с учетом числа витков. Подставляя значение $H_к$ в формулу /1/, получим:

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис.51.2 и представить её на проверку преподавателю.

2.Поворачивая тангенс-гальванометр, установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана. В этом случае стрелка гальванометра должна ориентироваться на угол 90^o либо 270^o.

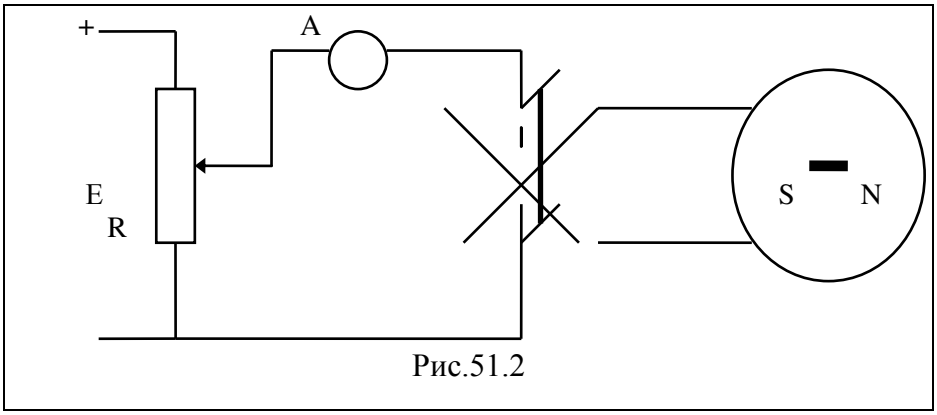


Рис.51.2

3.При помощи движка реостата установить заданное значение тока и измерить значение угла α_1 положения стрелки гальванометра с точностью до половины углового градуса.

4.При помощи переключателя К изменить направление тока в катушке. Определить угол отклонения α_2 при той же величине тока. Величину тока и величины углов α_1 и α_2 занести в таблицу результатов наблюдений.

5.Повторить опыт по п.п.2,3 5-6 раз при различных значениях тока. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

6.Вычислить значения $\alpha_1+\alpha_2$. В случае существенного (на величину более 2 угловых градусов) отличия какого-либо значения такой суммы от остальных, проверить соответствующие величины α_1 и α_2.

7.Построить график зависимости $tg\alpha=f(I)$. Убедиться в том, что $tg\alpha$ зависит от тока прямо пропорционально.

8.Вычислить величины H_3 по формуле /3/ для каждого значения тока. Найти среднее значение $H_{3\,СР}$.

9.Рассчитать средние абсолютную и относительную погрешности измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле

$$\Delta H_3 = t(\alpha, n)\sqrt{\frac{\sum \Delta H_i^2}{n(n-1)}}.$$

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя.

α= , $t_{\alpha,n}$= . Результаты записать в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

10.Окончательный результат записать в виде

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 52
ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Цель работы: используя эффект Холла, определить постоянную Холла, концентрацию свободных носителей тока и среднюю скорость их направленного движения.

Приборы и принадлежности: электромагнит с исследуемой пластиной, источники постоянной ЭДС, два реостата, два миллиамперметра, цифровой вольтметр, переключатель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Если проводник с током в виде пластины поместить в магнитное поле, то между ее боковыми гранями в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции B и направлению тока I, возникает разность потенциалов. Это явление, обнаруженное в 1879 году американским физиком
Э. Холлом, получило название «эффекта Холла», а возникающая при этом поперечная разность потенциалов – ЭДС Холла.

Причиной возникновения ЭДС Холла является действие силы Лоренца $\vec{F}_Л$ со стороны магнитного поля на заряды, совершающие направленное движение в проводнике при протека-

нии электрического тока. В металлах такими зарядами являются электроны, а в полупроводниках электроны и дырки. Тогда

$$\vec{F}_Л = q[\vec{v}\vec{B}], \qquad /1/$$

где q - заряд носителя; $\vec{v}$ - скорость направленного движения носителя заряда; $\vec{B}$ - индукция магнитного поля.

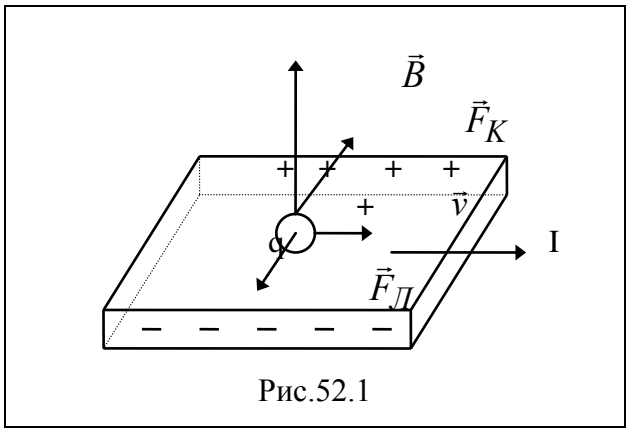


Рис.52.1

В отсутствие магнитного поля разность потенциалов между боковыми гранями пластины равна 0, так как эти точки находятся на одной эквипотенциальной линии. В магнитном поле под действием силы Лоренца носители заряда смещаются к одной из боковых граней пластинки, в результате чего она зарядится отрицательно, а противоположная грань пластинки - положительно. Между ними создается электрическое поле напряженностью $\vec{E}$, которое так же действует на носители заряда с кулоновской силой

$$\vec{F}_K = q\vec{E} \qquad /2/$$

в направлении, противоположном силе Лоренца.

Стационарное распределение зарядов в проводнике установится при равенстве этих сил, откуда в скалярной форме получим $qE = qvB$ /3/

ЭДС Холла можно определить, зная расстояние b между боковыми гранями

$$\varepsilon_н = Eb = vBh. \qquad /4/$$

Из формулы для плотности тока $j = qnv$ определяется скорость направленного движения носителей заряда

$$v = \frac{j}{nq}, \qquad /5/$$

где n - количество свободных носителей заряда в единице объема проводника.

Выразим плотность тока через силу тока $j = \frac{I}{S} = \frac{I}{bd}, \qquad /6/$

где $S = bd$ - площадь поперечного сечения пластины. Тогда скорость направленного движения зарядов равна

$$v = \frac{I}{qnbd} \qquad /7/$$

Подставив это выражение в формулу /4/, получим $\varepsilon_н = \frac{1}{qn}\frac{IB}{d} \qquad /8/$

или окончательно $\varepsilon_н = R_н \frac{IB}{d} \qquad /9/$

Коэффициент пропорциональности в формуле /9/ называется постоянной Холла $R_H = \frac{1}{qn}$. 10/

Эта величина имеет физический смысл объема, занимаемого единичным зарядом свободных носителей тока и измеряется в м^3/Кл.

Постоянная Холла зависит от концентрации носителей и, следовательно, от рода вещества и температуры. Для различных веществ постоянная Холла может иметь как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от знака носителей заряда. По знаку $R_н$ можно определить знак носителей заряда в веществе, обеспечивающее прохождение тока. Значение постоян-

ной Холла для полупроводника позволяет судить о характере его проводимости: при дырочной проводимости $R_н$>0, при электронной $R_н$<0. При наличии обоих типов проводимости знак постоянной Холла говорит о том, какой из них преобладает в данном полупроводнике.

Для большинства металлов постоянная Холла отрицательная, так как они обладают электронной проводимостью. Однако для некоторых металлов она имеет положительный знак. Это означает, что в электропроводности металлов играют роль не только электроны, но и положительные заряды, причем подвижность положительных зарядов больше. Такими положительными зарядами являются незаполненные энергетические связи - «дырки». Зная постоянную Холла можно рассчитать концентрацию свободных носителей заряда в исследуемом материале

$$n = \frac{1}{R_H q} \qquad /11/$$

и среднюю скорость их направленного движения $v = \frac{j}{en} = \frac{R_H I}{bd}$. /12/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Включить цифровой вольтметр. Дать прибору прогреться 5 мин.

2.Подключить ключом K_1 к схеме (рис.52.2) источник питания (указано на рабочем месте).

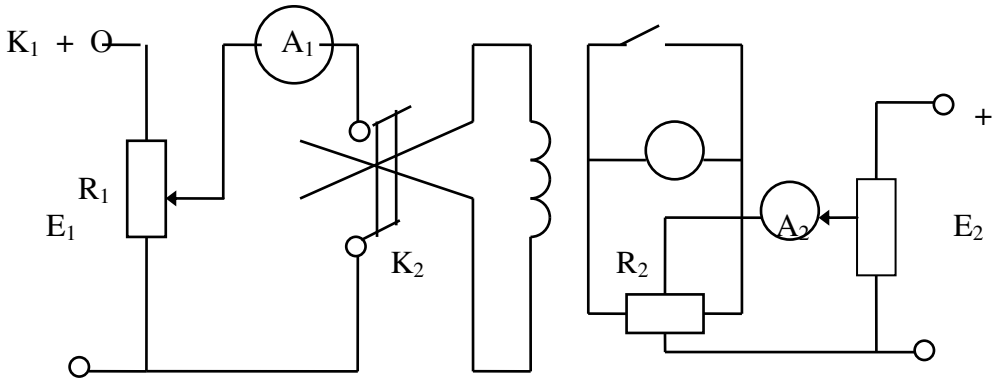


Рис.52.2

3.Изменяя с помощью реостата напряжение U_1, установить по указанию преподавателя в цепи ток через электромагнит $I_м$ (измеряемый амперметром A_1 пластину $I_{пл}$). Произвести отсчет значения ЭДС Холла $U_2=\varepsilon_X$ на цифровом вольтметре. Изменить направление тока в электромагните переключателем K_2 и повторно произвести отсчет значения ЭДС Холла.

4.Измерения проводить одним из двух способов (по указанию преподавателя).

а) Не меняя ток через электромагнит $I_м$ изменять ток через пластину $I_{пл}$. Повторить п.3 измерения 5-7 раз для различных значений тока $I_м$. Результаты измерений занести в таблицу результатов наблюдений.

б) При постоянном токе через пластину $I_{пл}$ изменять ток через электромагнит $I_м$. Повторить п.3 измерения 5-7 раз для различных значений тока $I_м$. Результаты измерений занести в таблицу 1 результатов наблюдений.

5. Значения индукции B для данного тока намагничивания $I_м$ взять из графика зависимости $B=f(I_M)$ (см. на рабочем месте).

6.Рассчитать значения постоянной Холла в соответствии со способом измерения:

а) По способу (а) исследуется зависимость ЭДС Холла от $I_{пл}$ при B= const. Построить график зависимости $\varepsilon_H = f(I_{пл})$. Взять координаты двух точек на прямой и рассчитать постоянную Холла по формуле

$$R_H = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{I_2 - I_1} \cdot \frac{d}{B}, \qquad /13/$$

где d- толщина пластины указана на рабочем месте.

б) По способу (б) исследуется зависимость ЭДС Холла от В при $I_{пл}$=const. Построить график зависимости $\varepsilon_H = f(B)$. Взять координаты двух точек на прямой и рассчитать постоянную Холла по формуле $$R_H = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{B_2 - B_1} \cdot \frac{d}{I_{пл}}. \qquad /14/$$

в) По способу (в) исследуется зависимость ЭДС Холла от произведения $B \cdot I_{пл}$. Построить график зависимости $\varepsilon_H = f(BI_{ПЛ})$. Взять координаты двух точек на прямой и рассчитать постоянную Холла по формуле: $$R_H = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{(I_{ПЛ} B_2) - (I_{ПЛ} B_1)} d. \qquad /15/$$

7.Вычислить концентрацию носителей тока по формуле /11/ и скорость их упорядоченного движения по формуле /12/.

8.Для оценки погрешности измерения постоянной Холла вычислить несколько (4-6) значений постоянной Холла.

10.Расчитать абсолютную и относительную погрешности измерения постоянной Холла используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», с помощью таблицы 2 результатов наблюдений по формулам $\Delta R_1 = t(\alpha, n)\sqrt{\frac{\sum \Delta R_i^2}{n(n-1)}}$ и $\varepsilon_R = \frac{\Delta R_H}{R_H} 100\%$.

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя.

α= , t(α,n)=

11.Окончательный результат следует записать в виде

$$R_H = R_{Hcp} \pm \Delta R_H; \qquad \varepsilon_R = \frac{\Delta R_H}{R_H} 100\%.$$

ТАБЛИЦА 1 РЕЗУЛЬТАТОВ НАБДЮДЕНИЙ

n	$I_{пл}$,А	I_M,А	В,Тл	$I_{пл}$В,АТл	ε_1 В	ε_2 В	$\varepsilon_X = \frac{\lvert\varepsilon_1 - \varepsilon_2\rvert}{2}$, В
1							
2							
7							

ТАБЛИЦА 2 РЕЗУЛЬТАТОВ НАБДЮДЕНИЙ

n_i	R_{Hi}	ΔR_i	ΔR_i^2

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите выражения для силы Лоренца. Как определяется ее направлние?
2. В чем заключается эффект Холла?
3. Выведите формулу для ЭДС Холла.
4. От чего зависит и в каких единицах измеряется постоянная Холла? Объясните физический смысл постоянной Холла.
5. Для каких целей используется эффект Холла?
6. Почему при измерениях ЭДС Холла необходимо переключать направление намагничивающего тока?

ЛИТЕРАТУРА.
1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§114,115,117.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §43,79;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.11.1, III.11.2.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, - 2002. -35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 53
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

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

Индукция магнитного поля в магнетике связанна с напряженностью намагничивающего поля $\overline{H}$ соотношением $\overline{B} = \mu\mu_0\overline{H}$ /2/

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

По магнитным свойствам вещества делятся на:

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

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

3.ФЕРРОМАГНЕТИКИ, которые, как и парамагнетики, намагничиваются по направлению внешнего магнитного поля, но магнитная проницаемость намного больше единицы (μ>>1). Кроме того, магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной, а зависит от напряженности внешнего намагничивающего поля H. С увеличением напряженности внешнего намагничивающего поля магнитная проницаемость сначала быстро возрастает, достигая максимума, причем достигаются значения μ>>1, а затем уменьшается, приближаясь к значению μ=1 при очень сильных полях (рис.53.1).

Поэтому зависимость индукции магнитного поля B от напряженности H не является линейной, как для пара- и диамагнетиков, а носит более сложный характер (рис.53.2). С увеличением напряженности внешнего магнитного поля H индукция поля в ферромагнетике B сначала резко возрастает и достигает

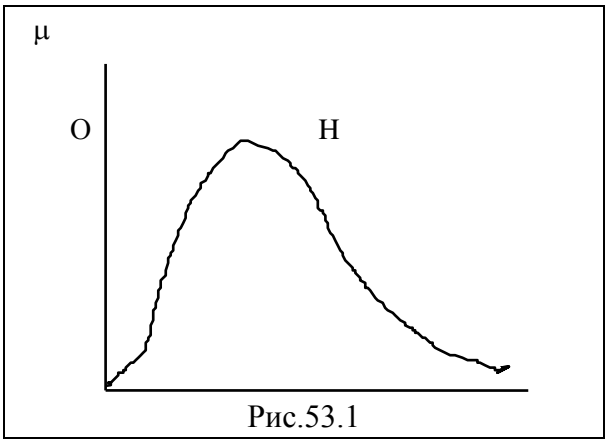


Рис.53.1

значительной величины при сравнительно небольшой величине напряженности внешнего магнитного поля H, а затем изменяется медленно, возрастая пропорционально H, кривая (а) на рис.53.2, называемая основной кривой намагничивания. Это соответствует состоянию насыщения ферромагнетика (при $\mu \to 1$). При насыщении индукция собственного поля ферромагнетика B' перестает расти, и величина суммарной индукции поля B увеличивается только за счет возрастания индукции внешнего поля B_0, которая пропорциональна H.

Если затем в ферромагнетике, намагниченном до насыщения уменьшать напряженность внешнего поля H, то индукция поля внутри ферромагнетика B тоже начнет уменьшаться. Однако при полном исчезновении внешнего поля (H=0) ферромагнетик не размагничивается полностью, в нем сохраняется остаточная индукция $B_{ост}$. Для полного размагничивания ферромагнетика нужно создать магнитное поле противоположного направления напряженностью $H_к$; эта напряженность называется ко эрцитивной силой.

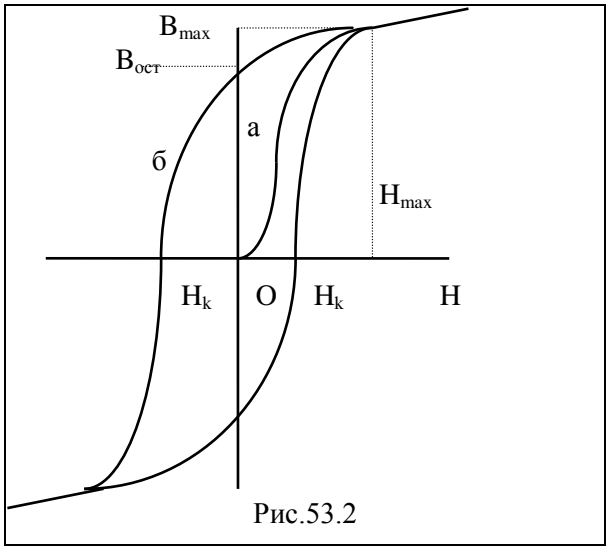


Рис.53.2

При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик начнет перемагничиваться, и при $H=H_{max}$ намагнитится до насыщения в противоположном направлении. Затем намагничивая ферромагнетик в прямом направлении можно вновь достигнуть $B=B_{max}$. Такое явление отставания изменения магнитной индукции от изменения напряженности намагничивающего поля называется магнитным гистерезисом, а замкнутая кривая (б) на рис.53.2 - петлей гистерезиса.

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

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

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

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

Первичная обмотка тороида питается от источника регулируемого переменного напряжения. С резистора R_1, включенного последовательно в первичную цепь, на пластины электронно-

го осциллографа, отклоняющие электронный луч в горизонтальном направлении (вход «X»), подается напряжение

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

Это напряжение пропорционально напряженности магнитного поля $U_m = \frac{R_1 l_{cp}}{N_1} H$. /5/

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

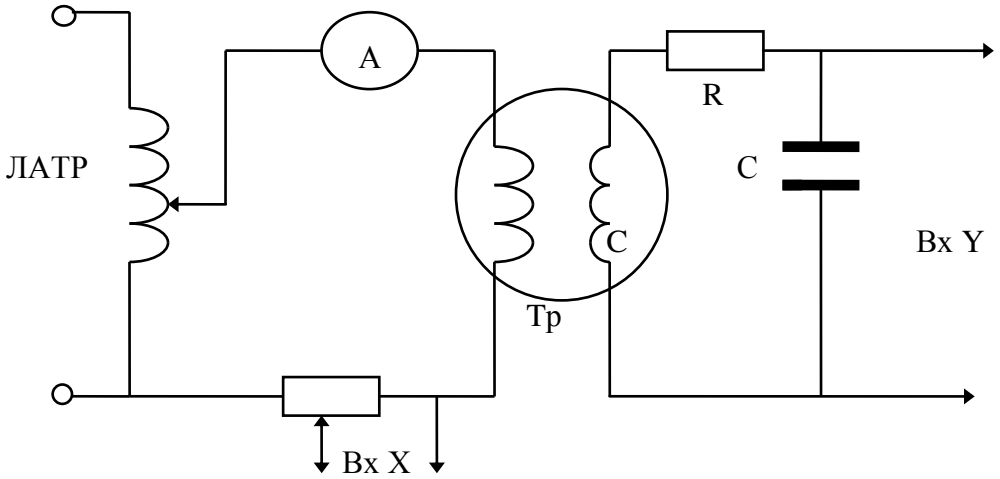


Рис.53.3

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

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

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

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

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

или

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

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

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

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

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

Полный заряд конденсатора в любой момент времени можно найти путем интегрирования

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

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

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

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

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \qquad /12/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

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

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

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

4.Зарисовать в тетради изображение петли гистерезиса.

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

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

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

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение напряженности и индукции магнитного поля. В каких единицах они измеряются? Как они связаны между собой?
2. Что такое ферромагнетики? Какими свойствами они обладают?
3. Что такое домены? Как их можно наблюдать? Какую форму они имеют?
4. Почему возникают домены? Когда прекращается процесс разбиения на домены ?
5. Нарисуйте основную кривую намагничивания ферромагнетиков.
6. Нарисуйте петлю гистерезиса. Что такое коэрцитивная сила и остаточная намагниченность?

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №54
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ КАТУШКИ

Цель работы: ознакомиться с процессами в цепях, содержащих индуктивность, при прохождении по ним постоянного и переменного токов, и измерить коэффициент самоиндукции катушки (соленоида).

Приборы и принадлежности: катушка индуктивности (соленоид) с сердечником, источник постоянной и переменной ЭДС, амперметр и вольтметр электромагнитной или электродинамической системы, реостат, коммутатор, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Ток, протекающий по проводнику, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого пропорциональна силе тока. Если проводник замкнут, линии поля пронизывают площадь контура, ограниченного проводником. Магнитный поток через эту площадь, сцепленный с витками контура, называется потокосцеплением Ψ. Потокосцепление пропорционально силе тока в контуре $\Psi = LI$.

Постоянный для данного контура коэффициент пропорциональности L между током и потокосцеплением называют коэффициентом самоиндукции или индуктивностью контура. Индуктивность имеет смысл меры инертности контура по отношению к изменению электрического тока. Она зависит от формы, размеров контура и магнитной проницаемости среды. Индуктивность контура численно равна потоку, сцепленному с контуром, когда по нему протекает ток 1 А. Единица измерения индуктивности в системе СИ - Генри: [L] = [Ψ]/[I] = Вб/А = (В с)/А= Ом с =Гн.

При изменении тока изменяется и потокосцепление, вследствие чего в контуре возникает ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_S = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\left(Li\right)}{dt} = -L\frac{di}{dt}, \qquad /1/$$

пропорциональная скорости изменения тока i .

Пусть к катушке, имеющей сопротивление R и индуктивность L, приложенно переменное напряжение $u = U_m \cos\omega t$, и в ней течет ток i . В катушке возникает э.д.с. самоиндукции, определяемое формулой /1/. По закону Ома

$$iR = u + \varepsilon_S \qquad /2/$$

или

$$iR = L\frac{di}{dt} = U_m \cos\omega t\,. \qquad /3/$$

Согласно правилу Ленца ЭДС самоиндукции препятствует изменению тока, в связи с чем ток i в катушке отстает от напряжения u по фазе

$$i = I_m \cos(\omega t - \varphi). \qquad /4/$$

Тогда $$\frac{di}{dt} = -I_m \omega \sin(\omega t - \varphi) = I_m \omega \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}). \qquad /5/$$

Подставим в /3/ выражения тока и его производной:

$$I_m R \cos(\omega t - \varphi) + I_m \omega L \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = U_m \cos \omega t \qquad /6/$$

или $$u_R + u_L = u; U_A \cos(\omega t - \varphi) + U_L \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = U_m \cos \omega t. \qquad /7/$$

Последнее равенство должно выполнятся для любого момента времени. Т.к. круговая частота всех членов формул /6/,/7/ одинакова, амплитуда тока I_m и сдвиг фаз φ не изменяются с течением времени и могут быть найдены с помощью векторной диаграммы (рис.54.1).

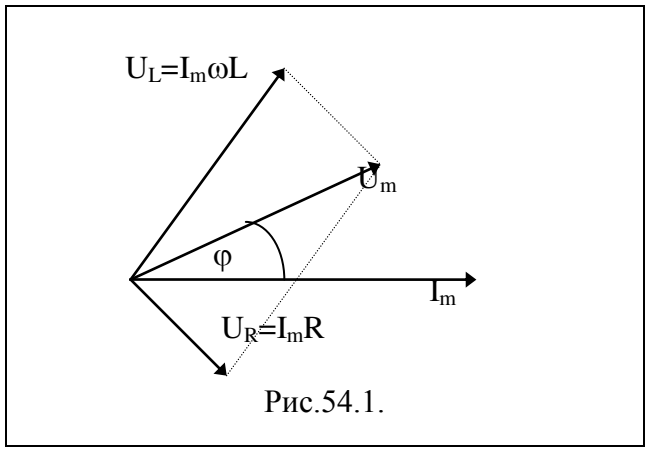


Рис.54.1.

В момент времени t вектор амплитуды напряжения $\overline{U}_m$ составляет с осью проекции угол ωt. Вектор амплитуды напряжения на сопротивлении равен $\overline{U}_R = I_m R$ и отстает от вектора амплитуды суммарного напряжения $\overline{U}_m$ на угол φ, а вектор напряжения на катушке индуктивности $\overline{U}_L = I_m \omega L$ опережает $\overline{U}_R$ на $\pi/2$, причем $\vec{U}_R + \vec{U}_L = \vec{U}_m$. /8/

Модуль вектора суммарного напряжения равен $U_m = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$. /9/

Подставляя в последнее выражение значения $\overline{U}_R = = I_m R$ и $\overline{U}_L = = I_m \omega L$, получим

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \qquad /10/$$

и $$tg\varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega L}{R}. \qquad /11/$$

При протекании по катушке постоянного тока (ω=0)

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{и} \quad R = \frac{U}{I}. \qquad /12/$$

Если же ток переменный (ω≠0), амплитудные значения напряжения и тока на основании закона Ома $I_m = U_m / Z$, откуда полное сопротивление Z цепи переменного тока равно

$$Z = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \qquad /13/$$

Второе слагаемое в подкоренном выражении $X_L = \omega L$ называется индуктивным сопротивлением цепи. Из формулы /13/ вытекает способ измерения индуктивности, используемый в настоящей работе. Для этого необходимо определить активное сопротивление катушки R на постоянном токе по формуле /12/ и полное сопротивление катушки Z на переменном токе по формуле $I_m = U_m / Z$. Тогда индуктивность можно найти по формуле

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi\upsilon}\sqrt{Z^2 - R^2}. \qquad /14/$$

Здесь ν - частота колебаний тока в сети.

Схема лабораторной установки показана на рис.54.2. Источники переменной $\mathcal{E}_1$ и постоянной э.д.с. $\mathcal{E}_2$ можно поочередно подключать к схеме при помощи комутатора К. Напряжение регулируют реостатом R, подключенным по схеме делителя напряжения. Сила тока и напряжения измеряются приборами электромагнитной или электродинамической систем, работающими как на постоянном токе, так и на переменном токе.

Вольтметр показывает суммарное падение напряжения на катушке и амперметре. Поэтому по формуле /8/ мы вычислим сумму индуктивности катушки и амперметра. Тогда

$$L_{KAT} = \frac{1}{2\pi\upsilon}\sqrt{Z^2 - R^2} - L_A. \qquad /15/$$

Индуктивность амперметра L_A указана на шкале прибора для каждого предела измерения. Производя измерения на постоянном токе с сердечником и без него, можно убедится, что в пределах погрешности вычисленные значения R одинаковы .Индуктивность катушки зависит от магнитной проницаемости ее сердечника. Поэтому полное сопротивление Z катушки без сердечника (μ=1=const) также не зависит от силы переменного тока. Если же в катушку ввести ферромагнитный сердечник (μ=f(H)=F(i)), то ее индуктивность и полное сопротивление

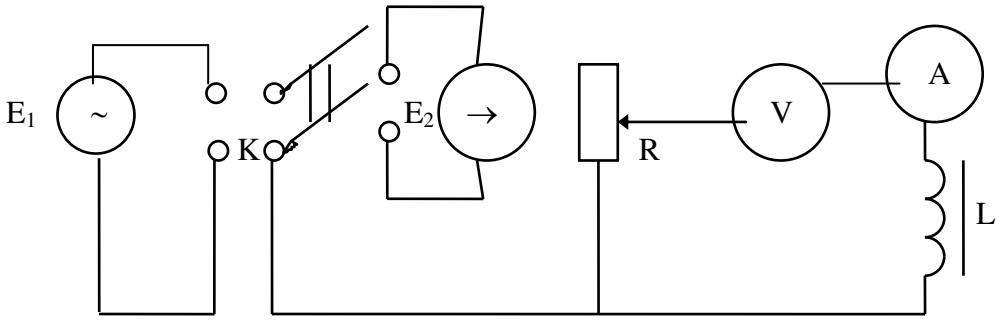


Рис.54.2

будут зависеть от силы тока. Для того чтобы в этом убедится, необходимо повторить несколько раз измерения при нескольких значениях переменного тока и сравнить среднее для каждого тока значение Z. При выполнении эксперимента измерения силы переменного тока необходимо производить на том же пределе измерения амперметра, на котором измерен постоянный ток, так как при смене предела измерения меняется и активное, и индуктивное сопротивление амперметра, и результаты измерений R и Z будут несопоставимы. Предел измерения вольтметра можно менять произвольно.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать схему в соответствии с рис.54.2. После проверки схемы преподавателем подключить источник питания. При этом коммутатор К должен быть в нейтральном (среднем) положении.

2.Подключив к схеме источник постоянной ЭДС, произвести измерения силы тока и напряжения. Измерения повторить 5 раз с сердечником и без него при разных силах тока. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1. Вычислить для каждого опыта значение R по формуле /12/ и сравнить их. Измерения считать удовлетворительными, если значения R_i различаются не более чем на несколько десятых Ома. Если различия велики, повторить измерения.

3.Подключить к схеме источник переменной ЭДС. Вынуть сердечник из катушки и повторить измерения по п.2. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1. Вычислить значения полных сопротивлений по формуле /13/ и убедиться, что Z>R.

4.Вставить в катушку сердечник и повторить измерения по п.3 для значений переменного тока, указанных преподавателем. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 2. Вычислить значения полных сопротивлений по формуле /13/ и убедиться, что полное сопротивление катушки с сердечником больше, чем без него, и что оно изменяется при изменении силы тока.

5.Определить погрешности вычисленных средних значений активного сопротивления и полных сопротивлений, используя методические указания «Лабораторный практикум по физи-

ке. Введение в практикум» по формулам $\Delta R_1 = t(\alpha,n)\sqrt{\frac{\sum \Delta R_i^2}{n(n-1)}}$ и $\varepsilon_R = \frac{\Delta R_H}{R_H}100\%$. Надежность измерений α взять равной 0,95.

6.Расчитать индуктивность катушки без сердечника и с сердечником при различных значениях тока и по формуле /15/ и занести полученные данные в таблицу результатов расчета индуктивности. Расчитать абсолютную погрешность измерения индуктивности катушки по формуле $\Delta L = \Delta Z/(2\pi\nu)$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

Постоянный ток					Переменный ток без сердечника				
U_i, В	I_i, А	R_i, Ом	ΔR_i,Ом	ΔR_i^2	U_i, В	I_i, А	Z_i, Ом	ΔZ_i, Ом	ΔZ_i^2

α= t(α,n)= L_A= $R_{ср}$= $Z_{ср}$= $\Delta R_{ср}$= $\Delta Z_{ср}$=

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

Переменный ток с сердечником											
I_1,A=				I_2,A=				I_3,A=			
U_i,В	Z_i, Ом	ΔZ_i	ΔZ_i^2	U_i,В	Z_i, Ом	ΔZ_i	ΔZ_i^2	U_i,В	Z_i Ом	ΔZ_i	ΔZ_i^2

$Z_{1ср}$ = $Z_{2ср}$= $Z_{3ср}$=
$\Delta Z_{1ср}$= $\Delta Z_{2ср}$= $\Delta Z_{3ср}$=

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ИНДУКТИВНОСТИ

	$L_k \pm \Delta L_k$,Гн	ε_L %
Без сердечника		
L1 С сердечником, I_1=		
L_2 С сердечником, I_2=		
L3 С сердечником, I_3=		

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое индуктивность? Каков её физический смысл? В каких единицах она измеряется?
2. От чего зависит индуктивность контура, соленоида?
3. Зависит ли индуктивность соленоида от температуры?
4. Чему равны индуктивное и полное сопротивления? От каких параметров цепи они зависят?
5. Почему при выполнении работы измерения проводят на одном пределе амперметра?
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Сформулируйте правило Ленца. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется? Как магнитный поток связан с индукцией магнитного поля?
7. Сформулируйте закон самоиндукции.
8. Почему при постоянном токе индуктивное сопротивление равно нулю?
9. Как зависит коэффициент самоиндукции от частоты тока?

10.Как изменится индуктивное и полное сопротивление контура, если увеличить, уменьшить число витков соленоида?

11.Определите коэффициент самоиндукции катушки, если при изменении ток в ней на 1,5 А за 0,5 с возникает ЭДС самоиндукции 0,045 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§126,148,149.

2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §64,66,91,92.

3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.12.2, IV.2.3.

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №55
РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА НЕОНОВОЙ ЛАМПЕ

Цель работы: ознакомиться с принципом работы релаксационного генератора, исследовать зависимость периода релаксационных колебаний от постоянной времени RC и от напряжения источника тока.

Приборы и принадлежности: неоновая лампа, источник постоянной ЭДС, магазин сопротивлений, магазин емкостей, вольтметр, секундомер, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Неоновая лампа представляет стеклянный баллон, заполненный неоном при малом давлении, со впаянными электродами - анодом и катодом. Она является ионизационной камерой, в которой первичная ионизация возникает за счет термоэлектронной эмиссии. Так как работа выхода электронов из катода и анода лампы мала, то эмиссия электронов из катода достаточна для возникновения первичного тока даже при комнатной температуре.

Если электроны за время между двумя столкновениями с атомами неона приобретают энергию большую, чем энергия ионизации неона, возникает вторичная лавинная ионизация газа, приводящая к резкому возрастанию тока через лампу. Такие условия для лампы с параллельными электродами возникают когда

$$\Delta\varphi_A = \frac{U}{l}\lambda \geq \varphi_{ион}\ , \qquad /1/$$

где: $\Delta\varphi_\lambda$ - разность потенциалов, которую проходит электрон между двумя столкновениями; U - напряжение на электродах лампы; l - расстояние между ними, λ - средняя длина свободного пробега электрона; $\varphi_{ион}$- потенциал ионизации газа.

Напряжение зажигания, т.е. напряжение при котором возникает лавинная ионизация

$$U_f = \frac{\Delta\varphi_{ион}}{\lambda} l\,. \qquad /2/$$

Из кинетической теории газов средняя длина свободного пробега равна

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma\sqrt{2}}, \qquad /3/$$

где n - концентрация молекул газа в лампе; σ - эффективное сечение ионов газа. Так как все величины в правой части /2/ постоянны, то напряжение зажигания для каждой лампы - величина постоянная.

Прохождение тока через лампу при вторичной ионизации сопровождается свечением газа, т.к. возбужденные электронами атомы неона отдают избыток энергии путем излучения в видимой части спектра.

При уменьшении тока через лампу вторичная ионизация прекращается при напряжении гашения $U_г$ меньшем, чем $U_з$. Различие напряжений эажигания и гашения позволяет использовать неоновую лампу в схеме релаксационного генератора несинусоидальных колебаний. Причины такого названия генератора становятся ясными из принципа его работы.

Схема релаксационного генератора приведена на рис.55.1. Он состоит из сопротивления R и конденсатора C, образующих RC-цепочку, и неоновой лампы НЛ. При включении источника постоянной ЭДС с напряжением U_0 по цепи начинает идти ток зарядки конденсатора i, причем в любой момент времени:

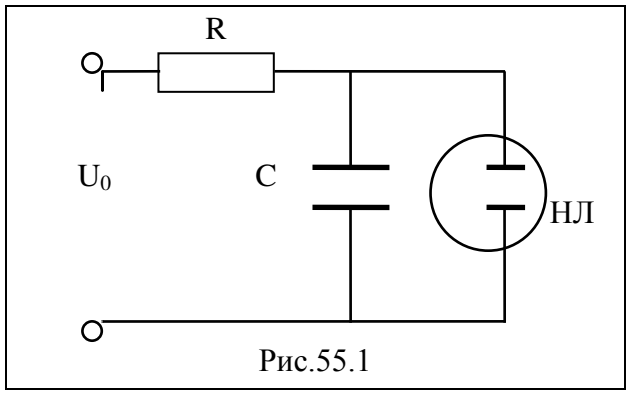


Рис.55.1

$$U_R+U_C=iR+U_C=U_0 \qquad /4/$$

где U_R= iR - падение напряжения на резисторе R, U_C - напряжение на обкладках конденсатора C.

Заряд dq, проходящий по цепи за время dt, вызывает изменение напряжения на обкладках конденсатора dU_C и связан с ним соотношением

$$dq= CdU_C. \qquad /5/$$

Так как сила тока в цепи равна $i = \frac{dq}{dt}$, то из /4/ получим

$$RC\frac{dU_C}{dt} + U_C = U_0. \qquad /6/$$

Решение этого неоднородного дифференциального уравнения первого порядка имеет вид

$$U_C = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \qquad /7/$$

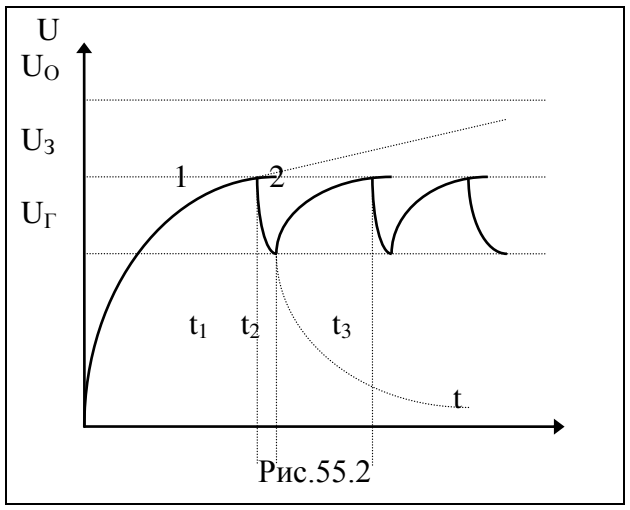


Рис.55.2

График зависимости напряжения на конденсаторе от времени показан на рис.55.2 (кривая 1). В момент времени t_1, напряжение на конденсаторе становится равным напряжению зажигания лампы $U_з$, через лампу течет ток и конденсатор начинает разряжаться. Т.к. лампа подключена параллельно конденсатору, то

$$i_{разр}R_A = U_C, \qquad /8/$$

где $R_л$ - внутреннее сопротивление лампы, $i_{разр}$- ток разряда, который определяется выражением

$$i_{mA,m} = -\frac{dq_C}{dt} = -C\frac{dU_C}{dt}. \qquad /9/$$

Знак «минус» в выражении для $i_{разр}$ стоит потому, что заряд конденсатора уменьшается. Из /9/ следует, что

$$R_Л C\frac{dU_C}{dt} + U_C = 0. \qquad /10/$$

Решение этого однородного дифференциального уравнения 1-го порядка имеет вид

$$u_C = U_з e^{-\frac{t}{RC}} \qquad /11/$$

(см. рис.53.2 - кривая 2). Пока напряжение на лампе больше $U_г$, она светится и течет ток. В момент времени t_2 (рис.55.2) напряжение равно $U_г$, лампа гаснет, и процесс зарядки конденсатора начинается снова. Скорость заряда и разряда конденсатора определяется произведениями RC и

$R_Л C$ в показателях экспонент (см. формулы /7/ и /11/). Эти произведение имеют размерность времени. Их сумма называется постоянной времени схемы.

Напряжение на конденсаторе периодически изменяется от $U_г$ до $U_з$ с периодом $T=t_3-t_1$

В большинстве случаев $R>>R_л$, поэтому время заряда конденсатора много больше времени его разряда и период колебаний практически равен $T=t_3-t_2$, т.е. зависит только от сопротивления RC-цепочки.

Из /7/ следует, что $$t = RCLn\frac{U_0}{U_0 - U_C}. \qquad /12/$$

Подставив в это выражение значение $u_c= U_г$ при $t = t_3$ и $u_c=U_3$ при $t = t_2$, получим формулу периода колебаний релаксационного генератора

$$T = RCLn\frac{U_0 - U_Г}{U_c - U_3}. \qquad /13/$$

При постоянном напряжении источника тока период колебаний зависит только от постоянной времени схемы - RC. В экспериментальной части работы требуется проверить эту зависимость.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Собрать схему генератора (рис.53.2), соблюдая правильную полярность включения приборов. Представить ее для проверки преподавателем.

2.Отключить конденсатор с помощью ручки переключения величины емкости на батарее конденсаторов и, постепенно повышая и понижая напряжение питания, измерить напряжение зажигания и гашения неоновой лампы.

3. Получить у преподавателя режим работы схемы (величину напряжения питания, значения RC и точность измерения периода колебаний). Установить на магазинах минимальное значение RC, подключить источник питания и, установив величину напряжения питания, добиться возникновения генерации (лампа будет периодически вспыхивать). Напряжение питания должно быть таким, чтобы частота следования вспышек была доступной для счета.

4.В момент одной из вспышек включить секундомер и считать число промежутков между вспышками в течение времени, обеспечивающего заданную точность измерения периода.

5.Повторить опыт по п.4 при 5-6 других значениях RC. Время и число вспышек занести в таблицу результатов наблюдений.

6. Вычислить периоды колебаний по формуле $T = \frac{t}{N}$, где N - число колебаний; t - время измерения.

7.По заданию преподавателя повторить опыты по пп.4,5 при другом напряжении на схеме.

8.Произвести измерения величин времени и числа колебаний для одного значения постоянной времени RC и различных значениях напряжения питания U_0. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

9.Построить графики зависимости периода колебаний T от величины постоянной времени RC при постоянных напряжениях U_{01} и U_{02} и график зависимости T от U_0 при одинаковой величине постоянной времени RC.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ.

R, МОм	C, мкФ	RC, с	$U_{01}=$,В			$U_{02}=$,В			RC= ,с			
			t,c	N	T,c	t,c	N	Tc	U_0,В	t,c	N	T,c

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды газового разряда существуют?
2. От каких факторов зависит ток в газовом промежутке?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику газового разряда.
4. Запишите закон сохранения заряда при газовом разряде.
5. Выведите выражение для закона Ома при несамостоятельном разряде, далеком от насыщении? Что такое подвижность ионов? В каких единицах она измеряется?
6. Как влияет величина R ,C, $U_з$, $U_г$, U на процессы заряда и разряда?
7. Какие процессы происходят в релаксационном генераторе?
8. Выведите зависимость от времени напряжения на конденсаторе при его заряде и разряде.
9. Выведите выражение периода колебаний в релаксационном генераторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§80,81,82,85.
2. . Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §106,107;
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §III.9.4, III.9.5.

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

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

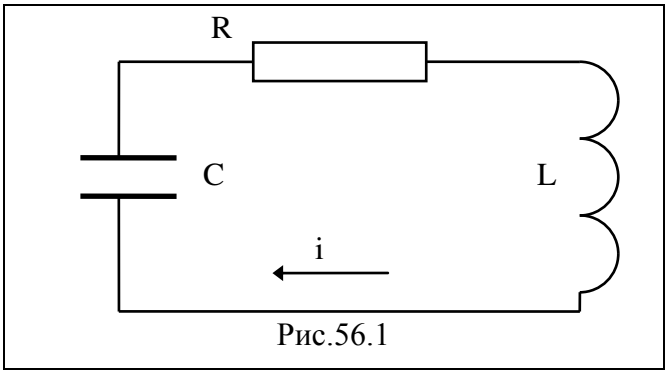


Рис.56.1

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

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

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

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

Здесь q - заряд на конденсаторе. Решение этого обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид $q = q_0 e^{-\beta t}\cos\omega t$. /3/

Уравнение /3/ называется уравнением кинематики затухающих колебаний. Здесь $q_m = q_0 e^{-\beta t}$ - амплитуда затухающих колебаний; $\beta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания, измеряемый в $с^{-1}$. Он равен величине обратной времени, в течение которого амплитуда уменьшается в *e* раз, где *e*=2,7183 – основание натуральных логарифмов. Можно показать, что циклическая частота затухающих колебаний ω связана с собственной циклической частотой (циклической частотой собственных гармонических незатухающих колебаний) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и коэффициентом затухания β выражением

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

График зависимости /3/ показан на рис.56.2.

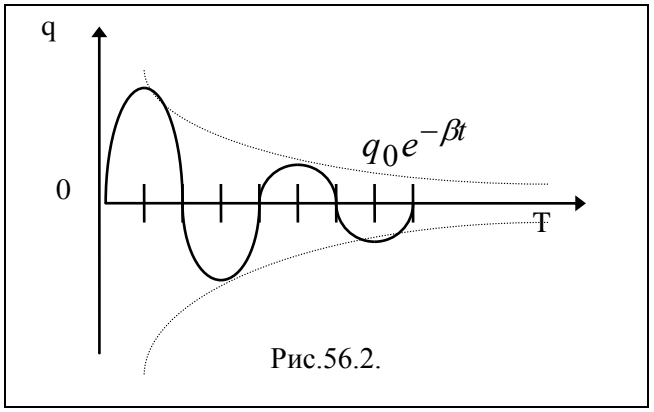


Рис.56.2.

Сила тока в контуре с затуханием равна $I = I_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0)$, т.е. опережает заряд по фазе. Добротностью Q называется безразмерная величина, показывающая во сколько раз умноженная на 2π энергия колебаний W больше энергии, потерянной в контуре за период $-\frac{dW}{dt}$. Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний

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

Тогда можно показать, что добротность равна

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

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

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

По аналогии с /2/ дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\cdot\frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{U_m}{L}\cos\omega t\ . \qquad /8/$$

Через достаточно большой промежуток времени t собственные колебания контура затухают, и решение этого неоднородного дифференциального уравнения имеет вид

$$q = \frac{U_m}{\omega\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}\cdot\cos(\omega t + \varphi_0)\ , \qquad /9/$$

т.е. заряд меняется с частотой внешней ЭДС. Зависимость силы тока от

времени имеет вид $$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}). \qquad /10/$$

Зависимость амплитуды тока от циклической частоты переменной ЭДС ω имеет вид

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

и показана на рис.56.3.

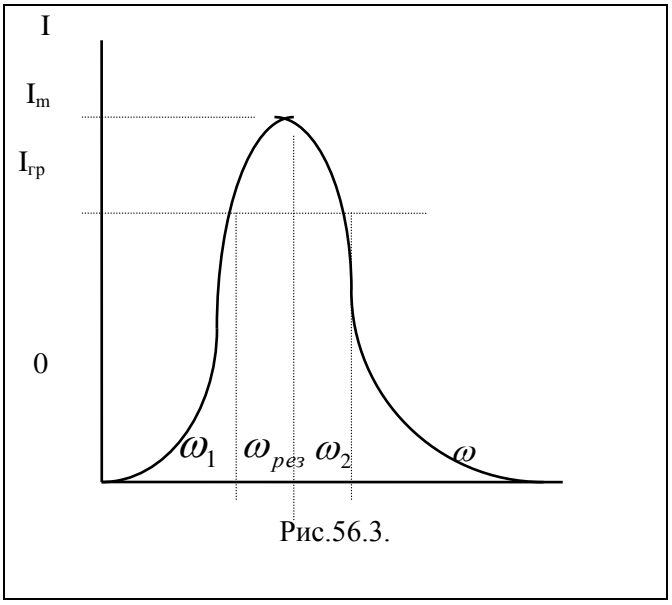


Рис.56.3.

При приближении частоты сигнала к частоте собственных гармонических колебаний контура

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

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

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

Амплитуда тока при резонансе равна

$$I_{рез} = \frac{U_m}{R}. \qquad /14/$$

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

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

Поскольку энергия в колебательном контуре пропорциональна квадрату тока, получим

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

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

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

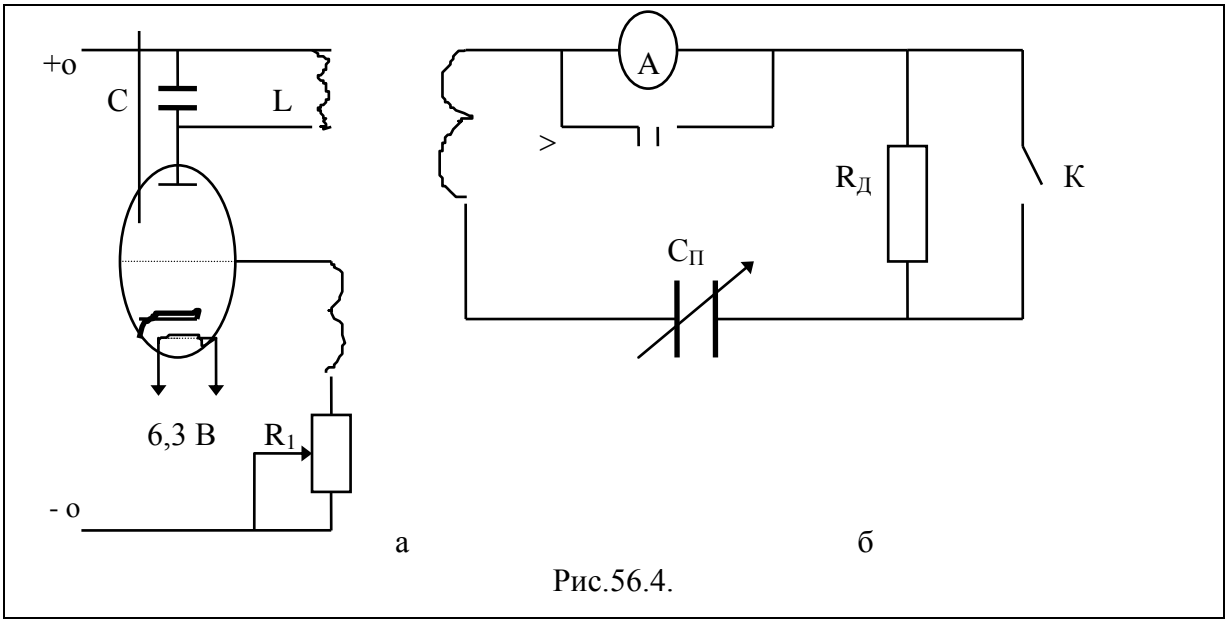
Еще два отрицательных корня отбрасываем, как не имеющие физического смысла. Граничные циклические частоты ω_1 и ω_2 показаны на рис.56.3.

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

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

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

В работе измеряется добротность и коэффициент затухания контура по ширине полосы пропускания. Установка состоит из генератора колебаний, (рис.56.4а) и исследуемого контура, в цепь которого включен микроамперметр А, шунтированный высокочастотным диодом (рис.54.4б).



а б

Рис.56.4.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить к генератору источники питания.
2. Расположить исследуемый контур так, чтобы его катушка оказалась на одной оси с катушкой генератора на расстоянии 15-20 см от последнего. Стрелка ручки управления переменным конденсатором $C_П$ должна стоять примерно на середине шкалы.
3. Вращением ручки переменного резистора R_1 на корпусе генератора добиться возбуждения генератора. Стрелка микроамперметра отклонится от нуля.
4. Изменяя емкость конденсатора, настроить контур в резонанс с генератором, при этом ток в контуре будет максимальным. Перемещением контура относительно генератора добиться отклонения стрелки микроамперметра до значения тока, близкого к максимальному. После этого расположение контура и генератора не изменять.
5. Изменяя емкость контура поворотом ручки подстроечного конденсатора, записать номера 15-20 делений шкалы настройки и соответствующих токов в контуре в таблицу результатов наблюдений 1. Ручку управления подстроечного конденсатора поворачивать на 20 делений вдали от номера деления, соответствующего резонансу, и на 10-5 делений вблизи номера деления, соответствующего резонансу.
6. Повторить п.5, изменив добротность контура подключением добавочного сопротивления $R_Д$ с помощью ключа К. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.

7. Используя градуировочный график, по номерам деления шкалы настройки определить соответствующие частоты ν, а по ним – циклические частоты, используя соотношение $\omega=2\pi\nu$. По результатам измерений построить резонансные кривые (см. рис.56.3). Определить резонансные частоты $\omega_{рез}$, соответствующие максимальным значениям тока на обоих графиках. На каждом графике на уровне $I_{\text{р}} = 1/\sqrt{2} \cdot I_{\text{р max}}$ провести прямую и на ее пересечении с соответствующей резонансной кривой определить граничные частоты полосы пропускания ω_1 и ω_2 (см. рис.56.3).
8. По формуле /16/ вычислить значения коэффициента затухания контура и добротности для каждого из случаев. Результаты по пп.7,8 занести в таблицу результатов наблюдений 2.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

n	ν, МГц	I_1, мкА	n	ν, МГц	I_2, мкА

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА.

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§140, 141, 143, 147, 148.

2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §88, 89, 90,91;

3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.1.1, IV.1.2, IV.1.3, IV.2.1, IV.2.2, IV.2.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 57
ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

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

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

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

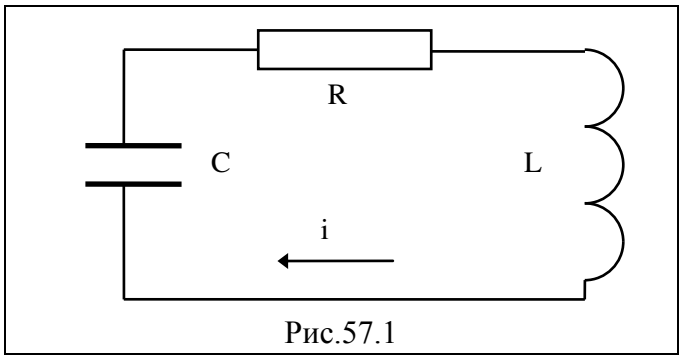


Рис.57.1

Если на обкладках конденсатора имеется заряд q, по цепи идет ток разряда $i = \frac{dq}{dt}$, а в катушке наводится ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_S = L\frac{di}{dt}.$$

В любой момент времени на основании закона Ома для неоднородного участка цепи справедливо уравнение динамики затухающих колебаний

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

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

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

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

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

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

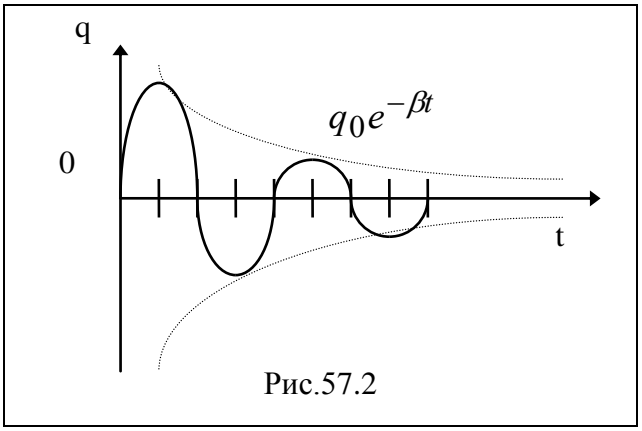


Рис.57.2

Он равен обратной величине времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз. Можно показать, что циклическая частота затухающих колебаний связана с частотой собственных гармонических незатухающих колебаний

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

и коэффициентом затухания выражением $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$. /4/

Сила тока в контуре с затуханием равна $I = I_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$,

т.е. опережает заряд по фазе.

Рис.57.2 Логарифмическим декрементом затухания δ называется натуральный логарифм отношения амплитуд двух следующих друг за другом (через период T) колебаний

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

Можно показать, что $\delta = \beta T$. /6/

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

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

Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды колебаний

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

Тогда можно показать, что при малом затухании добротность равна $Q = \frac{\pi}{\delta}$. /8/

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

Лабораторная установка (рис.57.3) представляет колебательный контур, возбуждаемый импульсами от генератора возбуждения ГВ. В контуре воз никают затухающие колебания, которые подаются на выход «У» электронного осциллографа.

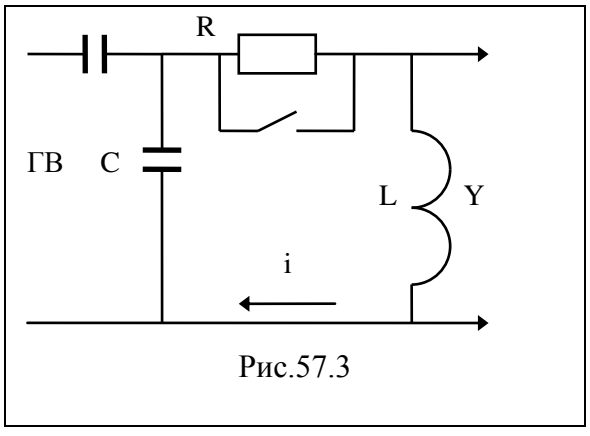


Рис.57.3

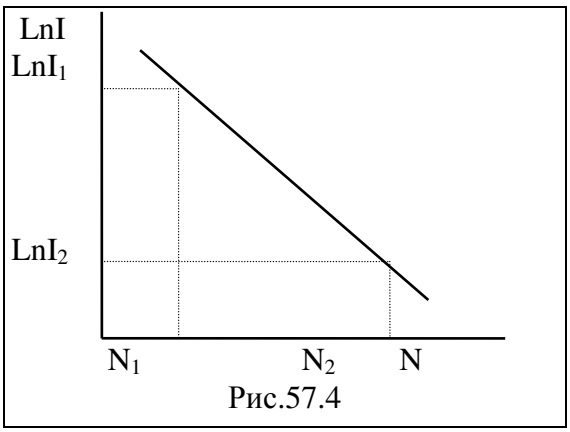


Рис.57.4

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

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Колебательный контур подключить к входу «У» электронного осциллографа. Осциллограф включить в сеть и дождаться появления изображения в виде горизонтальной линии на экране.
2.Подключить контур (рис.57.3) к выходу сигнала «50 Гц» осциллографа, используемого как генератор возбуждения. При этом на экране возникнет изображение затухающих колебаний. Установить размер максимальной амплитуды колебаний в пределах 4-5 см. Длительность развертки подобрать такую, чтобы изображение стало устойчивым, а его «нулевая» линия совпала с горизонтальной осью шкалы на экране.
3.Перемещая изображение по горизонтали, измерить амплитуды 5-8 колебаний. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.
4. Подключить к контуру дополнительное сопротивление $R_Д$=10 Ом и повторить измерения по п.3. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 1.
5.Вычислить логарифмы амплитуд и построить графики LnI=f(N) аналогично изображенному на рис.57.4 (на одном листе миллиметровой бумаги).
6.Расчитать для обоих случаев значения δ по формуле /9/ и Q по формуле /8/. Величины амплитуд и их номера занести в таблицу результатов наблюдений 2.
7.По изображению затухающих колебаний (аналогичному представленному на рис.54.2), зная масштаб развертки по оси абсцисс на осциллографе, определить количество полных колебаний, приходящихся на определенное расстояние на оси абсцисс на экране. Вычислить значения периодов колебаний T_1 (для случая, когда добавочное сопротивление не включено), и T_2 в случае, когда добавочное сопротивление $R_д$=10 Ом включено. Результаты занести в таблицу результатов наблюдений 2.
8.Вычислить значения коэффициента затухания, используя формулу /6/. Используя выражения для коэффициента затухания для двух случаев измерений, $\beta_1 = \frac{R}{2L}$, и $\beta_2 = \frac{R + R_д}{2L}$, найти сопротивление контура R по формуле

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

и его индуктивность L по формуле

$$L = \frac{R_Д}{2(\beta_2 - \beta_1)}. \qquad /11/$$

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

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

N	$R_д$=0		$R_д$=10 Ом	
	I	lnI	I	lnI

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

ЛИТЕРАТУРА

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 58
ИЗУЧЕНИЕ СТОЯЧИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Цель работы: исследовать распределение узлов и пучностей стоячей электромагнитной волны в воздухе и диэлектрике, измерить длину волны в этих средах и определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

Приборы и принадлежности: генератор СВЧ с источником питания, детектор электромагнитных волн, гальванометр или электронный осциллограф, ванна с подвижным экраном, соединительные провода, трансформаторное масло.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электромагнитные волны распространяются в веществе со скоростью света, равной

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}. \qquad /1/$$

В большинстве прозрачных сред μ=1, и

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu_0}}, \qquad /2/$$

т.е. скорость электромагнитных волн в веществе определяется его диэлектрической проницаемостью ε. Последняя показывает во сколько раз напряженность электрического поля ослабляется в веществе по сравнению с вакуумом

$$\varepsilon = \frac{E_{BAK}}{E}. \qquad /3/$$

Диэлектрическая проницаемость зависит от рода вещества, температуры, а также от частоты колебаний вектора напряженности Е. Поэтому электромагнитные волны различных частот в веществе распространяются с различной скоростью, причем так как в вакууме ε=1, то

$$C = \frac{C_{BAK}}{\sqrt{\varepsilon}}. \qquad /4/$$

Показателем преломления среды n называется величина, определяющая, во сколько раз скорость электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме $n = \frac{C_{ВАК}}{C}$. /5/

Из /4/ и /5/ следует, что показатель преломления среды связан с ее диэлектрической проницаемостью соотношением $n = \sqrt{\varepsilon}$. /6/

В проводящих средах, например, металлах, диэлектрическая проницаемость имеет бесконечно большое значение, т.к. электрическое поле вглубь проводящей среды не проникает, и E=0. Поэтому показатель преломления металлов также бесконечно велик.

Уравнение кинематики электромагнитной волны (уравнение волны) имеет вид

$$E = E_m \cos\omega\left(t \mp \frac{r}{c}\right), \qquad /7/$$

где r- расстояние от источника излучения до точки наблюдения. Так как циклическая частота связана с периодом колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то уравнение волны можно записать в виде

$$E = E_m \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} \mp \frac{r}{\lambda}\right), \qquad /8/$$

где $\lambda = cT$ - длина волны, расстояние, которое проходит волна за время, равное периоду колебаний. Две когерентные электромагнитные волны (волны одинаковой частоты, приходящие в точку наблюдения с постоянной разностью фаз) накладываются друг на друга, возбуждая в различных точках пространства колебания с амплитудой:

$$E_m = \sqrt{E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2}\cos\Delta\varphi}, \qquad /9/$$

где Δφ - разность фаз интерферирующих волн. Она зависит от разности хода волн и разности начальных фаз колебаний $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}|r_1 - r_2| + \Delta\varphi_0$. /10/

Представляет интерес интерференция волн, которые распространяются навстречу друг другу. В этом случае возникает так называемая стоячая волна.

Пусть на пути электромагнитной волны, излучаемой источником S (рис.58.1), находится экран Э, от которого падающая волна частично отражается. В произвольной точке А, между источником и экраном напряженность электрического поля падающей волны равна

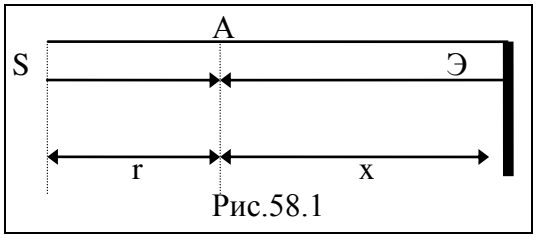


Рис.58.1

$$E_{nПАД} = E_{mПАД}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right), \qquad /11/$$

а напряженность электрического поля отраженной волны равна

$$E_{ОТР} = K_{ОТР}E_{mПАД}\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r+2x}{\lambda}\right) + \Delta\varphi_0\right), \qquad /12/$$

где $\Delta\varphi_0$ - разность фаз отраженной и падающей волн, $к_{отр}$ - коэффициент отражения, равный при нормальном падении волны $K_{ОТР} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$. В случае отражения от металлического экрана $\Delta\varphi_0=\pi$ и $К_{отр}=1$. Действительно, на границе раздела двух сред вектор E имеет одинаковые тангенциальные составляющие над и под поверхностью раздела. Т.к. в металле E=0, то над его поверхностью сумма напряженностей отраженной и падающей волны $E_{пад} + E_{отр} = 0$. Отсюда следует, что в любой момент времени $E_{пад}$ и $E_{отр}$ находятся в противофазе $\Delta\varphi_0=\pi$.

Разность фаз падающей и отраженной волн в соответствии с /10/ в точке А равна:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}2x + \pi = 4\pi\frac{x}{\lambda} + \pi, \qquad /13/$$

а суммарная амплитуда в соответствии с /9/ в точке А равна

$$E_m = E_{mПАД}\sqrt{2\left[1+\cos\left(4\pi\frac{x}{\lambda}+\pi\right)\right]} = E_{mПАД}\sqrt{2\left[1-\cos\left(4\pi\frac{x}{\lambda}\right)\right]}. \qquad /14/$$

Если расстояние от точки наблюдения до точки экрана X удовлетворяет условию

$$X = X_n = (2k+1)\frac{\lambda}{4}, \qquad /15/$$

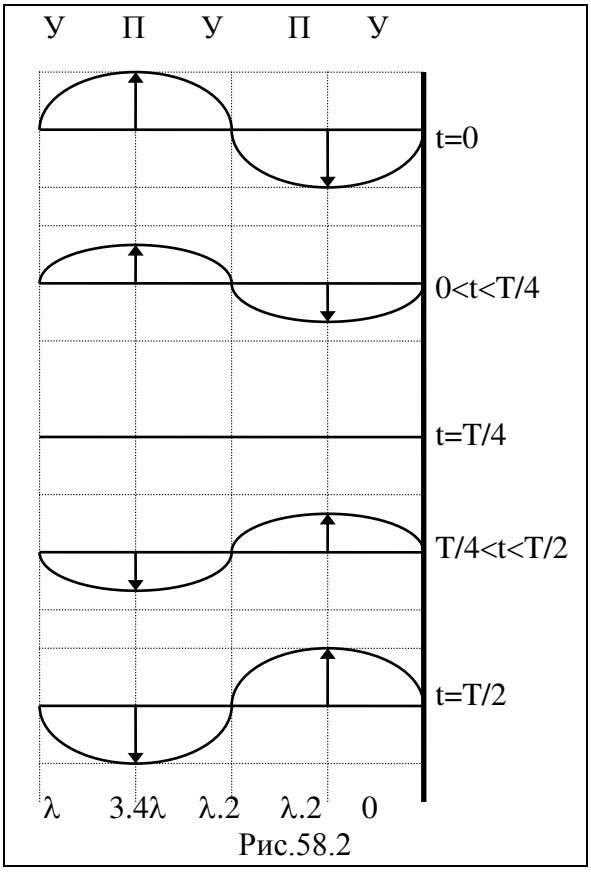


Рис.58.2

косинус в /14/ равен -1, амплитуда колебаний максимальна и равна $2E_{mпад}$. Если же $X = X_y = 2k\frac{\lambda}{4}$, косинус в /14/ равен 1, и амплитуда равна нулю. Таким образом, в точках, удаленных от экрана на четное число четвертей длин волн (целое число полуволн), колебаний не происходит. Такие точки X_y называются узлами стоячей волны. В точках, находящихся от экрана на расстоянии равном нечетному числу четвертей длин волн, амплитуда колебаний максимальна. Эти точки называются пучностями стоячей волны. На рис.58.2 показаны мгновенные значения вектора Е на разных расстояниях от экрана в интервале времени, равном половине периода колебаний.

Поместим между источником излучения и экраном детектор электромагнитных волн, и будем перемещать экран, приближая его к детектору или удаляя от него. Когда детектор окажется в узлах стоячей волны, уровень сигнала будет минимальным, а в пучностях - максимальным. Расстояние между соседними узлами или пучностями Δx равно половине длины волны, которую можно вычислить, как

$$\lambda = 2\Delta x. \qquad /16/$$

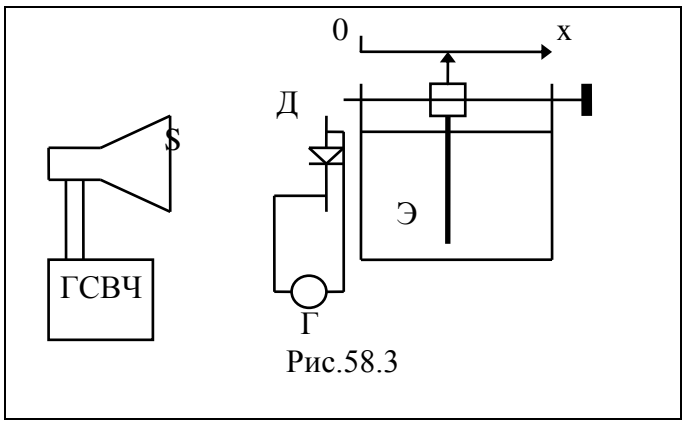


Рис.58.3

Если измерить длину волны в воздухе, а затем пространство между детектором и экраном заполнить жидким диэлектриком и повторить измерение длины волны, то можно вычислить показатель преломления диэлектрика по формуле

$$n = \frac{\lambda_{ВАК}}{\lambda} \qquad /17/$$

и его диэлектрическую проницаемость по формуле /6/.

Схема экспериментальной установки показана на рис.58.3. Генератор сантиметровых волн ГСВЧ с рупорным излучателем S испускает узкий пучок электромагнитных волн, модулированных звуковой частотой. На пути пучка находится детектор Д, представляющий собой четвертьволновый вибратор, шунтированный СВЧ-диодом. Индикатором уровня сигнала является гальванометр Г или электронный осциллограф. Детектор находится с внешней стороны торце-

вой стенки ванны, в которой с помощью винтовой передачи перемещается металлический экран Э. Положение экрана фиксируется на шкале ОХ.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Подключить гальванометр к детектору, включить источник питания генератора и дать ему прогреться 5-10 мин. Стрелка гальванометра должна отклониться от нуля. Если этого не произойдет, вращением ручки винтовой передачи перемещать экран до появления тока в гальванометре. Слегка поворачивая рупор излучателя, добиться максимального отклонения стрелки гальванометра.

2.Перемещая экран, фиксировать его положение X при минимальном токе гальванометра (в узлах) или в пучностях, когда ток максимален. Фиксация узлов предпочтительна. Зафиксировать координаты 8-12 узлов (или пучностей). Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

3.Наполнить ванну трансформаторным маслом и повторить измерения по п.2.

4.Вычислить разности координат соседних точек $\Delta X=X_i-X_{i+1}$ в таблице результатов наблюдений. Рассчитать случайные значения длины волны λ_i в воздухе и жидкости по формуле /16/. Найти средние значения длин волн $\lambda_ж$ и $\lambda_в$, их абсолютные $\Delta\lambda_ж$ и $\Delta\lambda_в$, и относительные $\varepsilon_{\lambda ж}$ и $\varepsilon_{\lambda в}$ погрешности, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле

$$\Delta\lambda = tg(\alpha, n)\sqrt{\frac{\sum \Delta\lambda_i^2}{n(n-1)}}. \qquad /18/$$

Значение надежности выбрать $\alpha=0.95$ или по заданию преподавателя.

$\alpha=$; $t_{\alpha,n}=$

5.По формуле /5/ определить показатель преломления трансформаторного масла, а по формуле /6/ - его диэлектрическую проницаемость ε. Найти относительные и абсолютные погрешности этих величин, используя формулы $\varepsilon_n = \sqrt{\varepsilon_{\lambda в}^2 + \varepsilon_{\lambda ж}^2}$ и $\varepsilon_\varepsilon=2\varepsilon_n$

$\lambda_Ж=$; $\lambda_В=$; n= ; ε= ; $\varepsilon_{\lambda ж}=$; $\varepsilon_{\lambda в}=$; $\varepsilon_n=$; $\varepsilon_\varepsilon=$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

$X_i, 10^{-2}$м	X_i-X_{i+1}, 10^{-2}м	λi, 10^{-2}м	$\Delta\lambda_i$, 10^{-2}м	$\Delta\lambda_I^2$, 10^{-4}м^2
Воздух				
Жидкость				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.Каков физический смысл диэлектрической проницаемости и показателя преломления. В каких единицах они измеряются? Укажите связь между этими величинами.

2.Каково влияние разности фаз интерферирующих волн на амплитуду колебаний? Каковы условия усиления и ослабления волн?

3.Что такое стоячая волна? Что называется ее узлами и пучностями?

4.Возникнет ли стоячая волна, если вместо металлического экрана поставить экран из диэлектрика?

5.Изменится ли в этом случае положение узлов и пучностей?

6.Расчитайте амплитуду стоячей волны в узлах и пучностях, если диэлектрическая проницаемость экрана равна ε=4, ε=81.

ЛИТЕРАТУРА
1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §153, 154, 157.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2, - §93,94,95,96, 99.
3. Яворский Б.М., Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: ВШ, 1989. - §IV.3.1, IV.3.2, IV.3.3, IV.3.5.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум / Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 61
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: изучение закономерностей в простых оптических системах.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья с рейтерами, линза, экран, осветитель.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Идеальной оптической системой называют такую, которая дает изображение, геометрически подобное предмету. Идеальная оптическая система с достаточным приближением может быть реализована в виде центрированной системы, центры поверхностей которой лежат на одной прямой - главной оптической оси. Примером центрированной системы является линза – важнейшая деталь многих оптических приборов.

Линзой называется оптически прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими (цилиндрическими, плоскими) поверхностями радиусов кривизны R_1 и R_2.

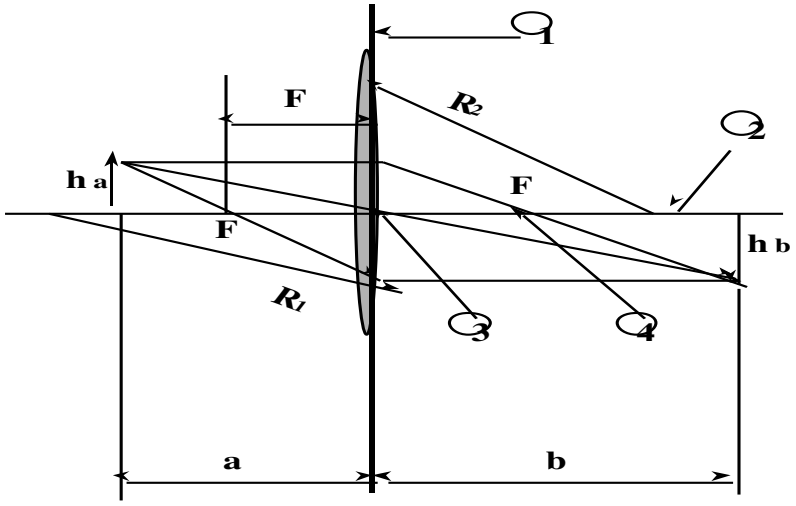


Рис.61.1

На рис.61.1 показаны кардинальные элементы линзы: главная плоскость (1); главная оптическая ось (2), проходящая через оптический центр (3), перпендикулярная главной плоскости и являющаяся осью симметрии системы; симметрично расположенные относительно оптического центра и лежащие на главной оптической оси главные фокусы (4). Лучи, проходящие до линзы через фокусы, после линзы идут параллельно оптической оси и наоборот. Плоскости, перпендикулярные главной оптической оси и проходящие через фокусы, называются фокальными плоскостями.

Линза считается тонкой, если расстояние между сферическими поверхностями вблизи оптического центра (в наиболее толстой части) много меньше радиусов ее кривизны (рис.61.1). Для такой линзы фокусное расстояние F можно найти по формуле

$$1/F = (n_2/n_1 - 1)\,(1/R_1 + 1/R_2), \qquad /1/$$

где n_2 - абсолютный показатель преломления линзы; n_1 – абсолютный показатель преломления среды, окружающей линзу.

Расстояние от предмета до линзы (a), расстояние от изображения до линзы (b) и фокусное расстояние F (рис.61.1), связаны формулой линзы

$$1/F = 1/a + 1/b \qquad /2/$$

Эта формула является приближенной. Она справедлива для лучей, идущих под небольшими ($\alpha<8^o$) углами к главной оси (такие лучи называются параксиальными). Кроме того, она справедлива, строго говоря, для монохроматических лучей.

Если пучок лучей немонохроматический, то вследствие зависимости показателя преломления от длины волны имеет место хроматическая аберрация (наблюдается несколько смещенных друг относительно друга изображений различного цвета - изображение становится нерезким и окрашенным). В связи с этим желательно на осветитель ставить светофильтр.

Формула /2/ справедлива для тонких линз, причем величины F, a и b отсчитываются от оптического центра линзы. В практических измерениях делается ошибка порядка толщины линзы.

Изображение называется действительным, если оно построено на действительно идущих лучах, и мнимым, если оно построено на продолжениях действительно идущих лучей. Изображение бывает прямым и перевернутым.

Увеличением линзы Г называется отношение высоты изображения h_b к высоте предмета h_a, причем справедливо соотношение

$$Г = h_b/h_a = b/a. \qquad /3/$$

При Г>1 изображение увеличенное, при Г<1 - уменьшенное.

Фокусное расстояние линзы может быть определено двумя способами.

Способ 1.

Производятся измерения a и b, и фокусное расстояние вычисляется с помощью формулы линзы /2/. Одновременно, измеряя размер изображения и предмета, определяют увеличение линзы. При этом существенно, чтобы указатель на рейтере располагался против центра линзы.

Способ 2.

Пусть расстояние между предметом и экраном L достаточно велико (L>4F). При этом найдутся два положения линзы, при которых наблюдаются увеличенное и уменьшенное изображения линзы (рис.61.2), (a и b соответствуют увеличенному изображению, a_1 и b_1 – уменьшенному). Из закона обратимости световых пучков (симметрии предмета и изображения) вытекает, что $a=b_1$, $a_1=b$.

Согласно рис.61.2 $$a+b=a_1+b_1=L. \qquad /4/$$

Откуда $$a=(L-1)/2,\ b = (L+1)/2. \qquad /5/$$

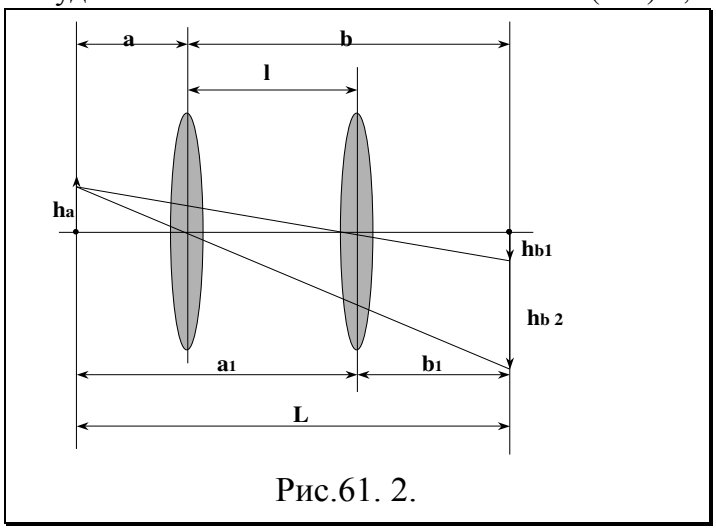


Рис.61. 2.

Подставляя эти выражения в (2) получим

$$F=(L^2 - 1^2) / 4L. \qquad /6/$$

При измерении таким способом несовпадение указателя рейтера и центра линзы не сказывается на результате.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Перед началом измерений центры предмета (его роль играет стрелка на матовой бумаге осветителя), линзы и экрана необходимо установить на одной высоте относительно оптической скамьи. Плоскости предмета, линзы и экрана необходимо установить перпендикулярно одной оптической оси, параллельной оптической скамье.

2.Отсчет расстояний между элементами оптической системы производится по линейке, нанесенной на оптической скамье с помощью указателей на рейтерах с точностью ± 1 мм.

3.Установить экран на расстоянии L = 0,75 ... 0,90 м от предмета.

4.Перемещая линзу вдоль скамьи, получить резкое изображение предмета. Полученные значения a, b, h_a (измеряется линейкой) и h_b (измеряется с помощью миллиметровой бумаги на экране) занести в таблицу результатов наблюдений 1. Измерения повторить 6...8 раз, изменяя величину L и выполняя измерения как при увеличенном, так и при уменьшенном изображении.
5.Произвести вычисления F первым способом (по формуле /2/). Рассчитать значение $F_{ср}$.
6.Рассчитать среднюю абсолютную $\Delta F_{ср}$ погрешность измерения фокусного расстояния линзы, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле

$$\Delta F_{ср} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum(\Delta F_i)^2}{n(n-1)}}\ . \qquad /7/$$

Значение надежности выбрать α=0,95 или по заданию преподавателя.
α= , $t_{\alpha,n}$= . Результаты записать в таблицу результатов наблюдений. Записать окончательный результат в виде $F = F_{ср} \pm \Delta F_{ср}$, ε = ...%.
7.Справедливость формулы /2/ можно проверить графически, откладывая точки в координатах 1/a и 1/b. Полученный график должен отсекать на обеих осях отрезки, равные 1/F.
8.Рассчитать увеличение линзы по обоим вариантам формулы /3/. Для каждого из положений предмета, линзы и экрана эти значения должны быть близки.
9.Установить экран на расстоянии L=0,90 ... 1,10 м от предмета. Перемещая линзу вдоль скамьи, получить резкие увеличенное и уменьшенное изображение предмета. Полученные значения L, a для увеличенного и a_1, для уменьшенного изображения предмета занести в таблицу результатов наблюдений 2. Измерения повторить 6 ...8 раз, изменяя величину L.
10.Вычислить значения $l = a_1 - a$ и вычислить значения F вторым способом по формуле /6/.
11.Найти значение Fср и ΔFср. Записать окончательный результат в виде
$F = F_{ср} \pm \Delta F_{ср}$, ε = ...%.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

N п/п	a, м	b, м	F, м	Δ F,м	$(\Delta F)^2$, м	Γ= b/a	h_b, м	h_b, м	$\Gamma = h_b/h_a$
1									
2									
:									
			$F_{ср}$=		$\Sigma(\Delta F)^2$=				

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

$N_{опыта}$	L, м	a, м	a_1 , м	$l = a_1 - a$, м	F, м	Δ F,м	$(\Delta F)^2$, $м^2$
1							
2							
					$F_{ср}$=		$\Sigma(\Delta F_i)^2$=

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое линза? При каком условии линзу можно считать тонкой?
2. Покажите на чертеже кардинальные элементы линзы.
3. Сформулируйте правила построения изображений в линзе и покажите на чертеже, как они выполняются.
4. Запишите формулу для определения фокусного расстояния линзы.
5. Запишите формулу тонкой линзы. При каких условиях она справедлива?
6. Как классифицируются изображения в линзах?

7. Как определить увеличение тонкой линзы?
8. Выведите формулу /1/ для вычисления фокусного расстояния линзы.
9. Выведите формулу /6/ для вычисления фокусного расстояния линзы.

ЛИТЕРАТУРА

3. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§165,166.
4. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §115-117.
3. Ландсберг Г.С. Оптика /Г.С. Ландсберг - М.: Наука, 1976, гл. XL.
4. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике /Л.Л. Гольдин М.: ВШ, 1983. - с. 335-342.
5. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум /Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 62
ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЛИНЗЫ

Цель работы: изучение преломления света в линзах, измерение показателя преломления материала линзы.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, набор линз, штативы, источник света (лампа накаливания), экран.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Абсолютным показателем преломления вещества называется безразмерная величина, численно равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данном веществе:

$$n = c/v. \qquad /1/$$

Он связан с электрическими и магнитными свойствами среды при данной частоте оптического излучения соотношением

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon}, \qquad /2/$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды; μ - магнитная проницаемость среды.

Знание абсолютного показателя преломления среды необходимо для расчета различных оптических приборов - призм, линз, элементов волоконной оптики. Его значение позволяет рассчитать оптическую длину пути в интерференционных исследованиях. Таким образом, измерение показателя преломления позволяет получать практически важную информацию.

Существуют несколько методов измерения показателя преломления. В данной работе используется один из наиболее простых методов, основанный на измерении параметров тонкой линзы.

Тонкой называется линза, толщина d которой значительно меньше радиусов кривизны R_1, R_2 поверхностей, ограничивающих линзу (рис.62.1) $d<<R_1$, $d<<R_2$.

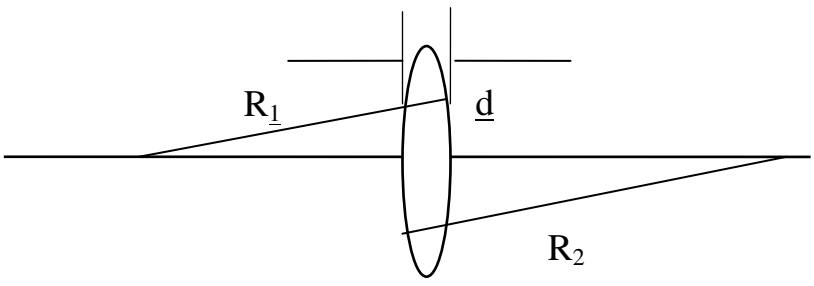


Рис.62.1

Фокусное расстояние тонкой линзы определяется из формулы

$$1/F=(n_2/n_1-1)\,(1/R_1+1/R_2), \qquad /3/$$

где F - фокусное расстояние; n_1 и n_2 - показатели преломления материала линзы и окружающей среды, соответственно; R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхностей, ограничивающих линзу. Радиус кривизны выпуклой поверхности принимается положительным, вогнутой - отрицательным. Линзы с от-

рицательным фокусным расстоянием относятся к рассеивающим, с положительным - к собирающим.

Если линза симметрична, то $R_1=R_2=R$. Если она окружена воздухом ($n_1=1$), то, обозначая $n_2/n_1=n$, получим $1/F= (n-1)/R,$ /4/

откуда $n=1+R/(2F).$ /5/

Таким образом, для определения показателя преломления материала симметричной линзы необходимо измерить радиус кривизны одной из ее сферических поверхностей и фокусное расстояние линзы.

Фокусное расстояние подчиняется формуле тонкой линзы $1/F=1/d+1/f,$ /6/

где d - расстояние от предмета до линзы, f - расстояние от линзы до изображения (рис.62.2). Как следует из приведенной формулы, при $d\to\infty$ $f\to F$.

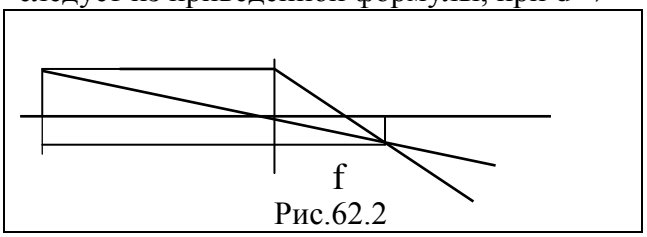


Рис.62.2

Это обстоятельство используется для определения фокусного расстояния собирающей линлинзы.

Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы используется следующий метод. Получив с помощью собирающей линзы действительное изображение S_1 источника света на экране, необходимо поставить между собирающей линзой и экраном рассеивающую линзу.

Действительное изображение источника света при этом смещается (рис.62.3). Следует найти новое положение изображения источника света S_2, перемещая экран относительно линзы

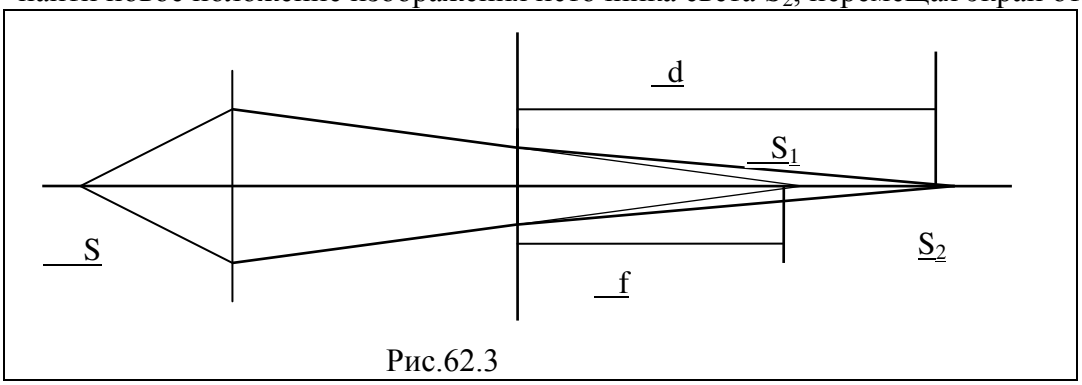


Рис.62.3

По принципу обратимости световых лучей можно принять, что световые лучи выходят из точки S_2, а в точке S_1 получается изображение точки S_2. Если обозначить расстояния от S_2 и S_1 до рассеивающей линзы, соответственно d и f, можно записать формулу тонкой линзы с учетом правила знаков в следующем виде: $-1/F=(1/d)-(1/f).$ /7/

Отсюда для модуля фокусного расстояния линзы получим: $F=fd/(d-f).$ /8/

Фокусное расстояние линзы можно найти из геометрических соотношений между параметрами линзы. Рассмотрим двояковыпуклую линзу (рис.62.4).

Из треугольника AOB $R^2=AB^2+OB^2=l^2+(R-h_o)^2.$ /9/

Отсюда $R^2=l^2+R^2-2Rh_o+h_o,$ /10/

$2Rh_o=h_o^2+l^2,$ /11/

или $R=(h_o^2+l^2)/(2h_o).$ /12/

Подставляя $l=D/2$, $h_o=(H-h)/2$ в выражение /12/ получаем:

$R=((H-h)^2+D^2)/(4(H-h)).$ /13/

Для двояковогнутой симметричной линзы (рис.62.5) при аналогичном подходе получается то же самое выражение.

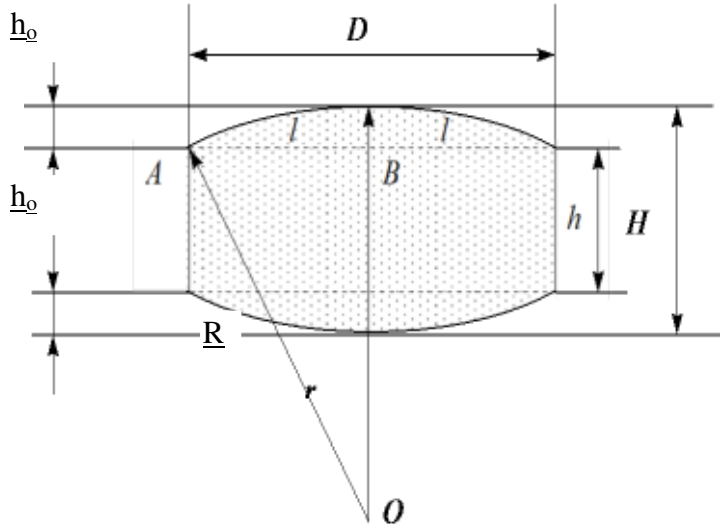


Рис. 62.4

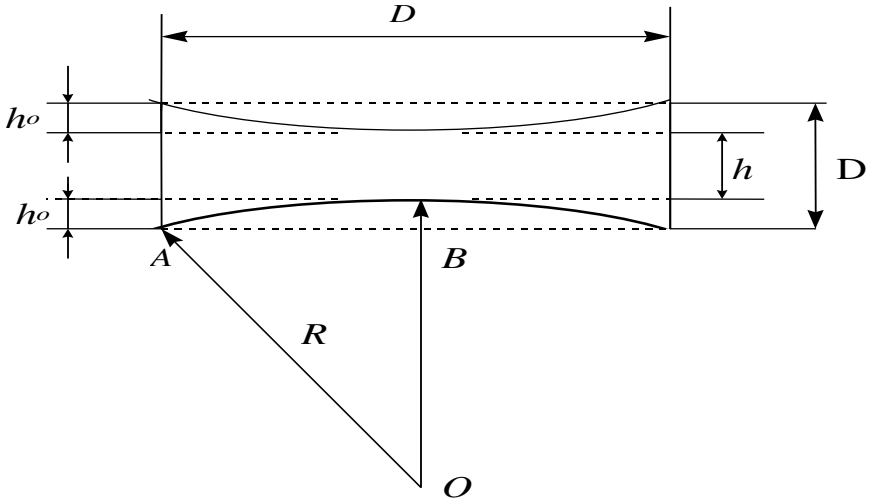


Рис. 62.5

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью собирающей линзы получить на экране изображение источника света (нити накала лампы). Измерить расстояние от линзы до изображения f для различных (не менее 5…8) значений расстояния d с шагом, заданным преподавателем. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1.

2. Построить график зависимости расстояний f от d. С помощью данного графика зависимости f от d оценить фокусное расстояние линзы F.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

d, м						
f, м						

3. Штангенциркулем измерить толщину линзы H, толщину ее цилиндрического слоя h и хорду цилиндрической поверхности D (для сферической линзы - D - радиус линзы).

4. Рассчитать значения радиуса R кривизны поверхностей собирающей линзы по формуле /13/.

5. Рассчитать по формуле /4/ показатель преломления n материала, из которого изготовлена собирающая линза. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 2.

6. Рассчитать среднюю абсолютную $|\Delta n_{ср}$ погрешность измерения фокусного расстояния линзы, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум», по формуле

$$\Delta n_{ср} = t_{\alpha,m}\sqrt{\frac{\sum(\Delta n_i)^2}{m(m-1)}}\,. \qquad /14/$$

Значение надежности выбрать α=0,95 или по заданию преподавателя.

α= , $t_{\alpha,m}$= . Результаты записать в таблицу результатов наблюдений 2. Записать окончательный результат в виде $n = n_{ср} \pm |\Delta n|$, $|\Delta n|$ = ...%.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

H, м	D, м	h_o, м	R, м	n_i	Δn_i	Δn_i^2

7. Для определения показателя преломления рассеивающей линзы установить на оптической скамье собирающую линзу L с известным фокусным расстоянием, получить первое изображение источника света S_1 на экране, измерить расстояние f (рис.62.3). Затем установить рассеивающую линзу и получить изображение S_2, измерить расстояние d. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 3.

8. По формуле /7/ рассчитать фокусное расстояние рассеивающей линзы F.

9. Измерить параметры D, H, h рассеивающей линзы и определить радиус кривизны R линзы по формуле /13/. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 3.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 3

№ п/п	H, м	D, м	h_o, м	R, м	d, м	f, м	F, м	n_i	Δn_i	Δn_i^2

10.Рассчитать показатель преломления материала линзы по формуле /4/.

11.Рассчитать среднюю абсолютную $|\Delta n_{ср}$ погрешность измерения фокусного расстояния линзы по формуле /14/. Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя.

α= , $t_{\alpha,m}$= . Результаты записать в таблицу результатов наблюдений 3. Записать окончательный результат в виде $n = n_{ср} \pm |\Delta n|$, $|\Delta n|$ = ...%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.Дайте определение абсолютного и относительного показателей преломления вещества.

2.От каких факторов зависит показатель преломления вещества?

3.Дайте определение линзы. Назовите важнейшие точки и линии, характеризующие линзу.

4.Запишите и поясните формулу тонкой линзы. Может ли быть рассеивающей двояковыпуклая линза?

5.При каком условии фокусное расстояние линзы F приблизительно равно расстоянию f от линзы до изображения?

6.Какие законы проявляются при прохождении света через линзу?

7.Перечислите физические задачи (разделы физики), для решения которых важно знать показатель преломления вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. -§165,166.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §115-117.
3. Джанколи Д. Физика. Т.2. /Д. Джанколи - М.: Мир, 1989, §35.1-35.7.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум /Под ред. Леонтьева Н.Г. - Зерноград, АЧГАА, 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 63
Определение радиуса кривизны сферической поверхности

Цель работы: наблюдение интерференции на сферической поверхности (колец Ньютона) и определение радиуса кривизны одной из поверхностей линзы.

Приборы и принадлежности: линза на плоской стеклянной пластинке в оправе, микроскоп с осветителем отраженного света, объект-микрометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При отражении от тонких пленок некогерентный пучок света расщепляется на 2 когерентных, которые, накладываясь, образуют интерференционную картину. При малых углах падения (рис.63.1) оптическая разность хода лучей 1 и 2, отраженных от верхней и нижней поверхности тонкой пленки равна $\Delta=2dn+\lambda/2$, где d - толщина пленки, n - абсолютный показатель преломления материала пленки, λ - длина волны света, падающего на пленку. Условием ослабления света при интерференции является

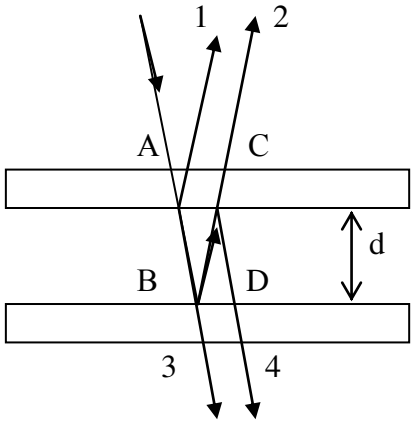


Рис.63.1

$$\Delta_{min}=(2k+1)\lambda/2, \qquad /1/$$

где k - любое целое число. Эта разность хода соответствует толщине пленки

$$d_{min}=k\lambda/2. \qquad /2/$$

Условия максимума будут иметь вид

$$\Delta_{max}=2k\lambda/2, \qquad d_{max}=(2k+1)\lambda/2. \qquad /3/$$

В данной работе изучается интерференция лучей, отраженных от воздушного клина между плосковыпуклой сферической линзой и плоской стеклянной пластинкой. Интерференционная картина, которую они образуют, имеет вид чередующихся темных и светлых концентрических колец с общим центром в полюсе линзы *P* (рис.63.2). Эта картина получила название колец Ньютона.

Пусть нормальный пучок света падает на линзу, лежащую на плоской стеклянной подложке, в точке *A* (рис.63.2). Рассмотрим условие, при котором в точке А отраженные от воздушного клина лучи 1 и 2 будут гасить друг друга, т.е. условие при котором через точку А проходит темное кольцо. Из ΔOAB следует, что

$$R^2-(R-d)^2=r^2, \qquad /4/$$

где *R* - радиус кривизны поверхности линзы; *r* - радиус кольца; *d* - толщина воздушного зазора вблизи точки А.

Из выражения /4/ следует, что при d<<R будет выполняться условие $r^2=2Rd$. /5/

Согласно условию минимума /3/ радиус k–го темного кольца r_K будет связан с его номером k соотношением

$$r_K^2=R\lambda k, \qquad /6/$$

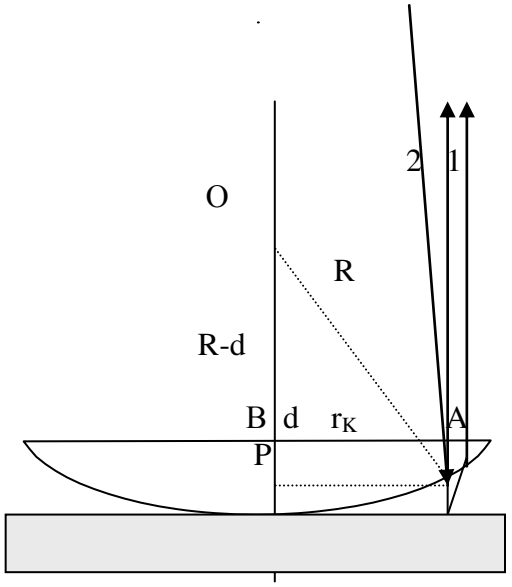


Рис.63.2

Согласно условию минимума /3/ радиус k–го темного кольца r_K будет связан с его номером k соотношением

$$r_K^2 = R\lambda k, \qquad /6/$$

т.е. квадрат радиуса темного кольца Ньютона пропорционален его номеру.

Если линза прижата к подложке так, что она вблизи полюса деформирована, воздушный зазор толщиной d_K окажется дальше от центра, и *k*–е темное кольцо будет иметь больший радиус, чем при отсутствии деформации. Если же между линзой и подложкой будет зазор, радиусы колец будут, наоборот, меньше. Поэтому в общем случае зависи мость r_K от k можно записать в виде

$$r_k^2 = R\lambda k + C, \qquad /7/$$

где C - константа, зависящая от степени деформации линзы. Формула /7/ позволяет определить радиус кри-

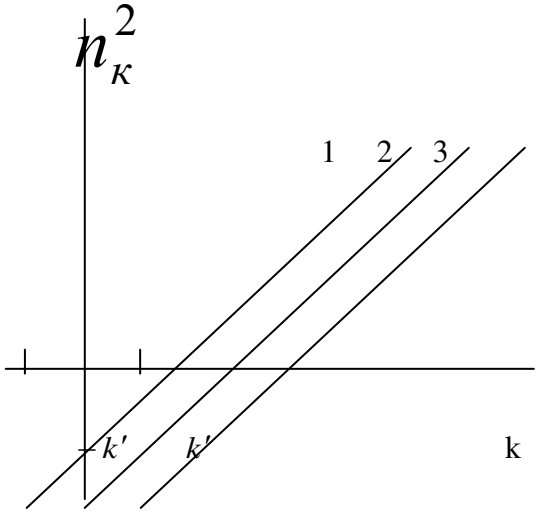


Рис.63.3

визны поверхности линзы *R,* если известен номер кольца k, длина волны света λ, радиус кольца r_k, константа C. Измерения радиусов колец производятся окулярным микрометром и выражаются числом делений его шкалы n. Если цена деления окулярного микрометра равна $C_{ок}$, то радиус кольца будет равен $r=C_{ок}n$. Подставляя в /7/, получаем $n_k^2 C_{ок}^2 = R\lambda k + C$, откуда получаем

$$n_k^2 = R\lambda k / C_{ок}^2 + C', \qquad /8/$$

где C' - новая постоянная.

Типичные зависимости (1), (2), (3), соответствующие /8/, показаны на рис.63.3.

Чтобы исключить из расчета константу C', определение которой по графику недостаточно надежно, следует подставить в формулу /8/ два зна чения k_1 и k_2 и соответствующие им радиусы колец, выраженные в делениях окулярного микрометра - n_1 и n_2. Вычитая из одного выражения другое, получим расчетную формулу

$$R = \frac{n_2^2 - n_1^2}{k_2 - k_1} \cdot \frac{C_{OK}^2}{\lambda}. \qquad /9/$$

С помощью графика зависимости n^2 от k можно определить причину искажений интерференционной картины и найти величину деформации или толщину зазора d'. Для этого по графику (рис.63.3) определяется значение k'. Из /2/ находим, что $d' = k'\lambda./2.$ /10/

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Поместить на предметный столик микроскопа оправу с линзой на подложке и включить питание осветителя.
2. Вращением или поступательным перемещением оправы окуляра (зависит от его конструкции) добиться максимально резкого изображения шкалы окулярного микрометра.
3. Вертикальным перемещением тубуса микроскопа найти и сделать резкой интерференционную картину. Перемещением оправы линзы по предметному столику вывести центр колец как можно точнее на перекрестье диаметральных линий окулярного микрометра.

4. Записать в таблицу результатов наблюдений номера колец, считая их от центра, и координаты диаметрально противоположных точек этих колец $n_{пр}^{\ k}$ и $n_{л}^{\ k}$ с точностью до половины малого деления шкалы окулярного микрометра. Отсчет координат делать от нуля шкалы окулярного микрометра. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5. Произвести проверку измерений. Для этого рассчитать суммы $n_{пр}^{\ k}+n_{л}^{\ k}$, которые в идеале должны быть равными. Величину допустимого разброса согласовать с преподавателем и, если имеется значительное расхождение результатов, повторить измерения.

6. Поместить на столик микроскопа объект-микрометр и определить цену деления шкалы окуляра $C_{ОК}$ путем сравнения числа делений шкалы окуляра и объект-микрометра, соответствующих одному отрезку.

7. Определить в делениях шкалы окуляра радиусы n_K колец $n_K = \left(n_{ПР}^{k} - n_{Л}^{k}\right)/2$ и их квадраты $n_{л}^{2}$.

8. Построить график зависимости $n_K^2 = f(k)$ и убедиться в линейной зависимости этих величин (рис.63.3). Выбрать на графике 2 точки, максимально удаленные друг от друга, и, подставив их координаты в формулу /9/, рассчитать радиус кривизны линзы R. По графику определить искажения интерференционной картины. Найти k' и по формуле /10/ вычислить величину зазора или деформации линзы d'.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

k	$n_{пр.}$	$n_{л..}$	$n_{пр.}+n_{л.}$	$n_к$	$n_к^{\ 2}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте условия когерентности волн.
2. Что такое геометрическая и оптическая разности хода лучей? В каких единицах они измеряются?
3. Сформулируйте условия максимума и минимума интенсивности при интерференции.
4. Запишите и поясните формулу оптической разности хода лучей, отраженных от тонкой пленки.
5. Почему свет, отраженный от плоской поверхности линзы, не участвует в образовании интерференционной картины?
6. Выведите формулу для радиусов колец Ньютона.
7. Как по графику $n^2=f(k)$ можно определить величину деформации линзы?
8. Какие интерференционные схемы существуют?
9. Назовите области применения явления интерференции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §171-175.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §119-122.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф М.: Наука, 1980. - §V.1.1-1.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 64
Определение угла между гранями бипризмы Френеля

Цель работы: наблюдение интерференционной картины полос равной толщины в воздушном клине и измерение его угла.

Приборы и принадлежности: бипризма Френеля на стеклянной пластинке в оправе, микроскоп с осветителем отраженного света, объект-микрометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

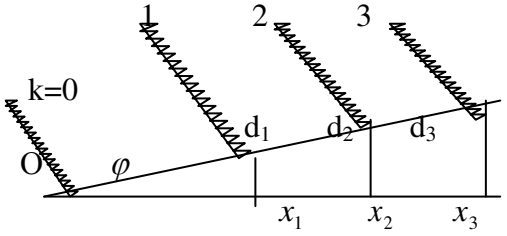


Рис.64.1

При интерференции света в тонкой воздушной пленке (см. лаб. раб № 63) темные полосы равной толщины в отраженном свете наблюдаются, когда толщина слоя воздуха между отражающими поверхностями кратна целому числу полуволн:

$$d_{\min} = k\lambda/2. \qquad /1/$$

Толщина этого слоя под соседними полосами меняется на половину волны $\Delta d = \lambda/2$. /2/

Если воздушный клин образован плоскостями, угол между которыми равен φ (рис.64.1), полосы равной толщины параллельны друг другу и расположены на одинаковых расстояниях:

$$x = x_K - x_{K-1} = \frac{d_K - d_{K-1}}{tg\varphi} = \frac{\Delta d}{tg\varphi}. \qquad /3/$$

При малом угле между плоскостями $tg\varphi \to \varphi$ и с учетом /2/ равен:

$$\varphi = \frac{\lambda}{2x}. \qquad /4/$$

Бипризма Френеля – призма, грани которой образуют малый угол (рис.64.2). Когда она лежит на стеклянной подложке ребром, полного прилегания обеих граней добиться практически невозможно, и они образуют

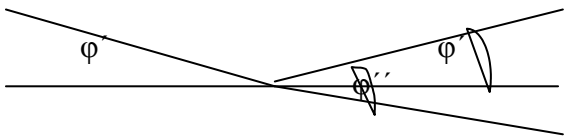


Рис.64.2

с подложкой углы φ' и φ''. Сумма этих углов равна углу между гранями:

$$\varphi = \varphi' + \varphi''. \qquad /5/$$

Определять угол между подложкой и гранью призмы непосредственно по формуле /4/ затруднительно, т.к. ширина темной полосы в некоторых случаях доходит до $2 \div 3$ делений шкалы окулярного микрометра, и расстояние между соседними полосами x получается с большой погрешностью. Поэтому в работе измеряется расстояние не между соседними, а между удаленными друг от друга на $40 \div 50$ делений шкалы k_1 -й и k_2 -й полосами. Тогда, считая ошибку в определении положения k -й полосы - n_k, равной половине малого деления шкалы, можно ожидать погрешность измерения угла φ, не превышающую 1%, а формула /4/ для расчета угла клина принимает вид

$$\varphi = \frac{k\lambda}{2nC_{OK}}, \qquad /6/$$

где $n = n_2 - n_1$ – число делений шкалы между двумя темными полосами; $k = k_2 - k_1$ - разность номеров этих полос; $C_{ок}$ - цена деления шкалы окулярного микрометра.

Подставляя /6/ в формулу /5/, получим расчетное выражение для угла между граням бипризмы:

$$\varphi = \left(\frac{k'}{n'} + \frac{k''}{n''}\right)\frac{\lambda}{2C_{OK}} = \frac{k}{n}\cdot\frac{\lambda}{2C_{OK}}, \qquad /7/$$

где
$$\frac{k}{n} = \frac{k'}{n'} + \frac{k''}{k''}. \qquad /8/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Поместить на предметный столик микроскопа оправу с бипризмой Френеля на стеклянной подложке и включить питание осветителя.

Вращением или поступательным перемещением оправы окуляра (зависит от его конструкции) добиться максимально резкого изображения шкалы окулярного микрометра.

3. Вертикальным перемещением тубуса микроскопа найти и сделать резкой интерференционную картину (рис.64.3).

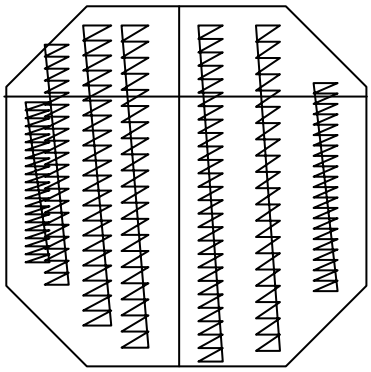


Рис.64.3

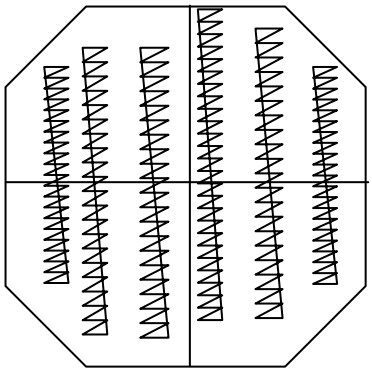


Рис.64.4

Изображение состоит из двух полей, расположенных над различными гранями бипризмы. В зависимости от углов φ' и φ'' расстояния между полосами в общем случае будут различными. Когда ребро бипризмы составляет некоторый угол α с плоскостью подложки, интерференционная картина имеет вид, показанный на рис.64.4. Если угол велик, следует слегка передвинуть бипризму вдоль ее ребра, чтобы уменьшить его.

4. Перемещением оправы линзы по предметному столику вывести изображение ребра призмы (границу между гранями) на край поля зрения вправо или влево. Поворотом окуляра расположить вертикальную линию шкалы параллельно полосам.
5. Регулировочными винтами предметного столика совместить осевую линию (середину) одной из полос ($k_1 = 0$) с нулевым делением шкалы ($n_1 = 0$). Найти другую полосу ($k_2 = k_1$), осевая линия которой так же, как у нулевой полосы, совпадает с n_2-м делением шкалы. Как было сказано выше, $n_2 = n'$ должно быть не менее сорока делений. Записать k' и n' в таблицу результатов наблюдений.
6. Перемещением оправы вывести ребро призмы на противоположный край поля зрения. Повторить операции п.п. 4 и 5. Записать в таблицу значения k'' и n''.
7. Слегка поворачивая установочные винты на оправе бипризмы, повторить п.п. 4-6 еще 5-7 раз. При повороте винтов наклон бипризмы меняется, углы φ' и φ'' также меняются и поэтому полосы одного поля сближаются, а другого – расходятся.

8. Поместить на предметный столик объект-микрометр. Определить цену деления шкалы окулярного микрометра. Вычислить $\frac{k'}{n'}$, $\frac{k''}{n''}$ и их сумму $\frac{k}{n}$ для каждого опыта в соответствии с формулой /8/. Рассчитать среднее значение $\frac{k}{n}$ и его погрешность $\Delta\frac{k}{n}$ с надежностью, указанной преподавателем.

9. По формуле /7/ вычислить угол между гранями бипризмы и его абсолютную погрешность, равную:

$$\Delta\varphi = \Delta\frac{k}{n}\cdot\frac{\lambda}{2C_{OK}}. \qquad /9/$$

Вычисления погрешностей производить по формулам

$$\left(k/n\right)_{ср} = \frac{1}{N}\sum k/n_i; \quad \left(\Delta k/n\right)_{ср} = t_{\alpha,N}\sqrt{\frac{\sum\left(\Delta k/n\right)_i^2}{N\left(N-1\right)}}.$$

Следует учесть, что угол φ в /7/ измеряется в радианах, а результат следует представить в угловых минутах: $1рад = \frac{180\cdot 60}{\pi} мин. = 3{,}44\cdot 10^3{}'$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№	k'	n'	k'/n'	k''	n''	k''/n''	k/n	$\Delta(k/n)$	$\Delta(k/n)^2$

$\lambda =$ нм ; $C_{ок}=$; $t_{\alpha,n} =$.

Записать результат в виде $\varphi = \varphi_{ср} \pm \Delta\varphi$, ε_φ=……%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие волны называются когерентными?
2. Выведите формулу для расчета угла воздушного клина.
3. При изменении угла между плоскостями клина интерференционные полосы сближаются. Как изменяется угол клина?
4. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если вместо бипризмы на стекле будет лежать цилиндрическая линза?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §171-175.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §119-122.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф М.: Наука, 1980. - §V.1.1-1.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 65.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

Цель работы: изучение законов геометрической оптики.

Приборы и принадлежности: плоскопараллельная пластина из стекла или оргстекла, лазерный осветитель или лазерная ручка, штангенциркуль, миллиметровая бумага, шпильки, скрепки.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Геометрической оптикой называется раздел физики, описывающий законы распространения электромагнитных волн (обычно света в видимой глазом области), справедливые при предположении, что длина волны стремится к нулю $\lambda \to 0$.

Закон прямолинейного распространения света: в однородной среде луч света распространяется прямолинейно.

Закон независимости световых пучков: эффект, производимый одним световым лучом не зависит от действия других лучей.

Закон обратимости световых лучей: если луч A, падая на оптическую систему, порождает луч B, выходящий из системы, то, направив на систему луч C по лучу B в обратном направлении, на выходе получим луч D, идущий по лучу A в обратном направлении (см. рис. 65.1).

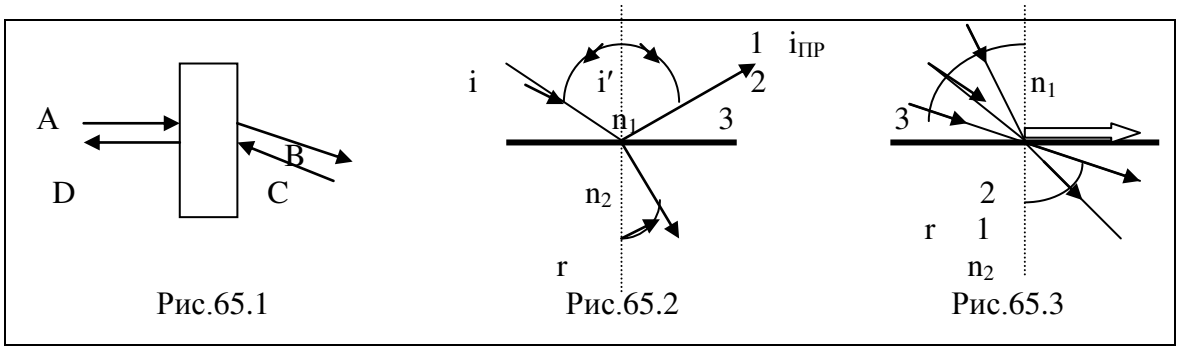


Рис.65.1 Рис.65.2 Рис.65.3

Отметим, что здесь мы рассматриваем идеальные оптические системы, когда на один падающий на систему луч возникает один выходящий из системы луч.

Закон отражения: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости, углы отсчитываются от перпендикуляра, угол падения i равен углу отражения i', т.е. i=i' (рис.65.2).

Закон преломления Снеллиуса-Декарта: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения лежат в одной плоскости, углы отсчитываются от перпендикуляра, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления г для данной пары сред - величина постоянная (см. рис.65.2).

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \qquad /1/$$

где n_{21} – относительный показатель преломления пары сред с абсолютным показателем преломления среды, откуда луч выходит (n_1) и абсолютным показателем преломления среды, куда луч входит (n_2). Если свет падает из воздуха $n_1=1$, то формула /1/ позволяет вычислить абсолютный показатель преломления среды, куда луч входит n_2

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_2, \qquad /2/$$

Отметим, что углы падения и преломления отсчитываются от перпендикуляра к границе раздела сред в точке падения.

Если $n_1>n_2$, то угол преломления больше угла падения. Тогда при некотором $i_{ПР}$, когда $r=\pi/2$ и $\sin r=1$, наблюдается явление полного внутреннего отражения. В этом случае свет не выходит во вторую среду и распространяется по границе раздела сред (рис.65.3).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Накройте резиновый коврик листом миллиметровой бумаги и закрепите его четырьмя скрепками.

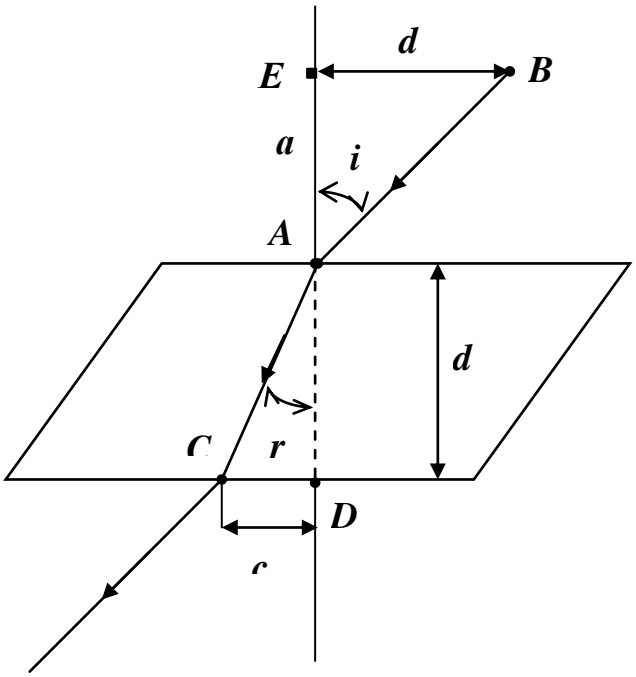


Рис.65.4

2. Отметьте точки А, В и Д шпильками.
3. Включите лазер и направьте луч на плоскопараллельную пластину вдоль направления АВ.
4. Отметьте шпилькой место С выхода луча из плоскопараллельной пластины.
5. Штангенциркулем измерьте отрезки FB=b, FA=a, CD=c и толщину плоскопараллельной пластины d.
6. Повторите 5-6 раз измерения по пп.2-4, меняя положение шпильки В. Занесите полученные величины в таблицу результатов наблюдений.
7. Из рис.65.4 следует, что формула 65.3 приобретает вид

$$. n = \sqrt{\frac{1+\left(\frac{d}{c}\right)^2}{1+\left(\frac{a}{b}\right)^2}} \qquad /3/$$

8. По формуле /3/ вычислите абсолютный показатель преломления материала пластины n. Вычислите его среднее значение n_{CP}.
9. Рассчитайте средние абсолютную и относительную погрешности измерения абсолютного показателя преломления материала по формулам /4/ и /5/

$$\Delta n_{CP} = tg(\alpha,m)\sqrt{\frac{\sum \Delta n_i^2}{m(m-1)}}. \qquad /4/ \qquad \varepsilon_N = \frac{\Delta n_{CP}}{n_{CP}}100\% \qquad /5/$$

Значение надежности α=….. выберите по заданию преподавателя, а значение коэффициента $t_{\alpha,m}$= выберите по таблице с помощью преподавателя. Полученные данные запишите в таблицу результатов наблюдений. Запишите окончательный результат в виде

$n = n_{ср} \pm ||$ $n_{ср} =$ $\pm$, $||$ = ...%.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

a,мм	b,мм	c,мм	d,мм	n_i	Δn_i	Δn_i^2
				n_{CP}=	Δn_{CP}=	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что изучает геометрическая оптика?
2. Сформулируйте законы геометрической оптики.
3. Сформулируйте правило отсчета углов в геометрической оптике.
4. Что такое абсолютный показатель преломления? Какова его размерность?
5. Что такое относительный показатель преломления? Какова его размерность?
6. От чего зависит абсолютный показатель преломления среды?
7. В чем заключается явление полного внутреннего отражения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева В.Ф. Физика: учебник для среднего профессионального образования / В.Ф. Дмитриева. –М., И.Ц. Академия, 2014. – 446 с. §18.2.
2. Мякишев Г.Я. Физика: учебник для 11 кл. общеобразовательных учреждений / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин. – М.: Просвещение, 2014. - § 45,47

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 66
ДИФРАКЦИЯ ОТ ОДНОЙ ЩЕЛИ

Цель работы: наблюдение в параллельных лучах дифракции от одной щели и влияние на дифракционную картину ширины щели, измерение ширины щели.

Приборы и принадлежности: экран со щелью регулируемой ширины, гониометр, источник монохроматического света.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

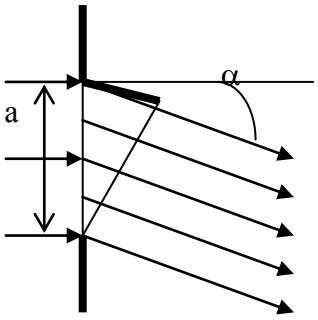


Рис.66.1

Пусть на экран со щелью шириной *a* нормально падает плоская световая волна, рис.65.1. Каждая точка волновой поверхности в плоскости щели изучает вторичные волны по всем направлениям. Выделим из них те, которые составляют угол α с первоначальным направлением света. В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля число зон Френеля, укладывающихся в плоскости щели, равно:

$$m = \frac{2a}{\lambda}\sin\alpha, \qquad /1/$$

где λ – длина волны света, падающего на щель. Если m=2k - число четное, в направлении α_k будет наблюдаться k–й дифракционный минимум

$$\sin\alpha_k^{\min} = \frac{k\lambda}{a}, \qquad /2/$$

а если m - нечетное число (m=2k+1) - дифракционный максимум

$$\sin\alpha_k^{\min} = \frac{2k+1}{2}\frac{\lambda}{a}. \qquad /3/$$

Распределение интенсивности при дифракции от одной щели показано на рис.65.2. Внизу отмечены положения 1, 2, 3–го и т.д. минимумов, вверху – положения 1,2,3-го и т.д. максимумов при $k = \pm1,\pm2$ и т.д.

Как следует из формул /2/ и /3/, уменьшение ширины щели *a* приводит к увеличению углов наблюдения дифракционных полос – полосы уходят от центра, увеличение *a* приводит к обратному результату – полосы сжимаются.

В экспериментальной части работы измеряются углы наблюдения дифракционных полос и по формулам /2/ и /3/ вычисляется ширина щели.

Т.к. углы наблюдения малы, используя известные предел $\lim_{\alpha\to 0}\sin\alpha=\alpha$, расчетные формулы получим в виде $a=\frac{k\lambda}{\alpha_k}$ /4/

если измеряется положение темных полос, и

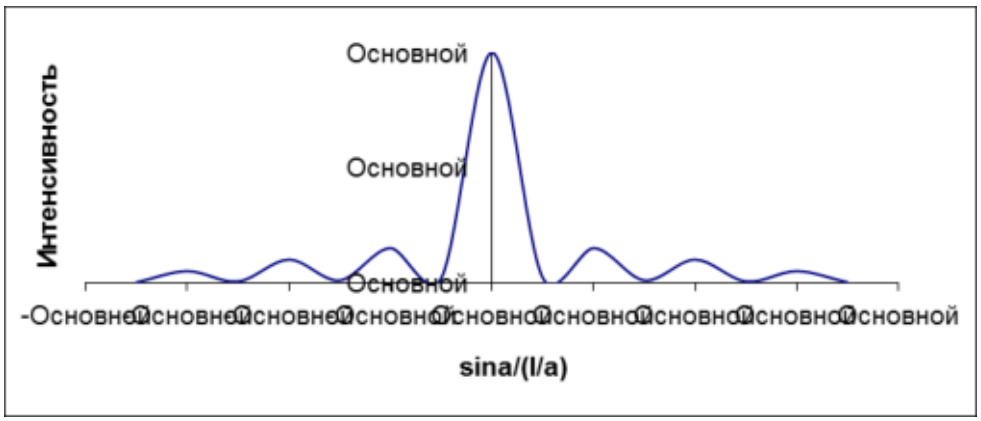


Рис.65.2

$$a=\frac{2k+1}{2}\frac{\lambda}{\alpha_k}, \qquad /5/$$

если измерение производится для светлых полос.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить питание осветителя. Установить зрительную трубу так, чтобы в поле зрения наблюдалась дифракционная картина. Произвести наводку на резкость вращением оправы окуляра.
2. Медленно вращая микрометрический винт оправы щели, изменить ее ширину, наблюдая за изменением дифракционной картины.
3. Установить микрометрический винт в положение *x,* указанное преподавателем и записать его. Изменить углы наблюдения 5-8 светлых или темных (по согласованию с преподавателем) полос α'_k и α''_k справа и слева от центральной светлой полосы. Вычислить контрольные суммы $\alpha'_k+\alpha''_k$. Данные записать в таблицу результатов наблюдений. Записать длину волны света λ, освещающего бипризму.
4. Вычислить значения α_k и выразить их в радианах: если угол в градусной мере записан как $\alpha_{рад}=d^0m's''$, то в радианах он равен:

$$\alpha_{рад}=\left[\frac{\left(\frac{s}{60}+m\right)}{60}+d\right]\frac{\pi}{180}. \qquad /6/$$

5. Вычислить ширину щели и ее погрешность с надежностью указанной преподавателем. Для упрощения вычислений воспользоваться следующим приемом: формулы /4/ и /5/ представить в виде

$$a=A\lambda, \qquad /7/$$

где для темных полос $A = \frac{k}{\alpha_k}$, а для светлых – $A = \frac{2k+1}{2\alpha_л}$. При расчете ширины щели для каждого опыта вычисляется A_i, его среднее значение $A_{ср}$ и погрешность $\Delta A_{ср}$. Затем с помощью формулы /7/ вычисляются $a_{ср}$ и $\Delta a_{ср}$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

k	α'_k	α''_k	$\alpha'_k + \alpha''_k$	α_k^0	α_k, рад	A_i	ΔA_i	$\Delta A_i{}^2$

λ = ……. Нм.

Вычисления погрешностей производить по формулам

$$A_{ср} = \frac{1}{N}\sum A_i , \qquad \Delta A_{ср} = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum \Delta A_i^2}{N(N-1)}} .$$

Результат записать в виде $a = a_{ср} \pm \Delta a_{ср}$, ε_a = ...%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля и запишите формулу для вычисления интенсивности дифрагировавшего излучения.
2. В чем заключается метод зон Френеля?
3. Выведите выражение углов наблюдения светлой и темной дифракционных полос. Чему равно угловое расстояние между соседними полосами?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §176-179.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §125-129.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: Наука, 1980. - §V.2.1-V.2.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 67
ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: наблюдать изменение интенсивности плоскополяризованного света, проходящего через поляризатор, при повороте оси поляризации последнего и экспериментально проверить закон Малюса.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, поляризатор, анализатор, лазер с блоком питания, фотоприемник с цифровым индикатором интенсивности и блоком питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Частично поляризованный свет от когерентного лазерного источника S (рис.67.1), проходя через поляризатор П, поляризуется в вертикальной плоскости (на чертеже стрелками показано направление поляризации). Интенсивность I_1 поляризованного света после поляризатора П может быть определена фотоприемником в отсутствии анализатора А.

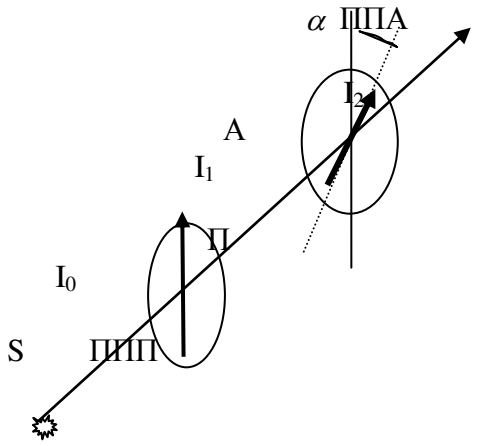


Рис.67.1

Свет попадает на другой поляризатор, называемый анализатором А, плоскость поляризации которого ППА составляет с плоскостью поляризации поляризатора ППП угол α. По закону Малюса интенсивность I_2 плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор, с учетом поглощения равна:

$$I_2 = I_1(1-k_a)\cos^2\alpha. \qquad /1/$$

где k_a – коэффициент поглощения света в анализаторе

$$k_a = I_{погл}/I_{пад}. \qquad /2/$$

При постоянной мощности P источника света его интенсивность в направлении поляризатора I_0 также постоянна. Поэтому при выполнении закона Малюса график зависимости интенсивности света от квадрата косинуса угла α между осями поляризатора и анализатора должен иметь вид прямой, проходящей через начало координат.

В работе интенсивность света измеряется с помощью фотоприемника с цифровым индикатором интенсивности. Фототок его пропорционален энергетическому потоку светового излучения, падающего на поверхность прибора, а значит и интенсивности света i~I, что и дает возможность в условных единицах измерить I_1 и I_2.

В работе представляется возможным измерить коэффициент поглощения света анализатора k_a. Если удалить из установки анализатор, интенсивность света, измеряемая прибором, равна I_1. Из формулы /1/ получим коэффициент поглощения анализатора

$$k_n = 1 - \frac{I_2}{I_1 \cos^2\alpha}. \qquad /3/$$

Поляризатор и анализатор, используемые в лабораторной установке представляют тонкую желатиновую пленку с вкрапленными в нее мелкими кристалликами герапатита (соединения йода с хинином). Эти кристаллы, как и кристаллы турмалина, обладают свойством двулучепреломления, причем они сильно поглощают свет обыкновенного луча, поляризованного перпендикулярно оптической оси кристалла. Необыкновенный луч, поляризованный параллельно оптической оси кристалла, практически не поглощается. Такие вещества называются дихроичными.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить в сеть 220В блоки питания лазера и фотоприемника с цифровым индикатором интенсивности.

2. Включив питание только фотоприемника измерить интенсивность фоновой засветки $I_ф$. В дальнейшем вносить поправку вычитая эту величину из всех измерений интенсивности $(I - I_ф)$.

3. Включив питание лазера вынуть из штатива анализатор и измерить интенсивность света I_1 прошедшего через поляризатор.

4. Установить на штативе анализатор и меняя на лимбе его оправы углы α от нуля до 90^o с шагом 10^o, записать в таблицу результатов наблюдений значения фототока, соответствующие интенсивности света I_2

5. Построить графики зависимости силы тока i (интенсивности I) от $\cos^2\alpha$ (рис.67.2). Убедиться в справедливости закона Малюса.

5.Вычислить для каждого опыта коэффициент поглощения поляризатора $k_п$ по формуле /3/, его среднее значение и абсолютную погрешность с надежностью, указанной преподавателем.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

α^0	$\cos^2\alpha$	I_1	I_2	k_i	Δk_i	Δk_i^2

P=

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризованный свет?
2. Что такое естественный свет?
3. Выведите закон Малюса.
4. Запишите закон Малюса с учетом поглощения света.
5. Какие явления связаны с поляризацией света?
6. Опишите явление поляризации при отражении и преломлении.
7. Сформулируйте закон Брюстера. Объясните закон Брюстера с помощью полярной диаграммы излучения диполя.
8. Перечислите методы получения поляризованного света.
9. Что такое двойное лучепреломление?
10. Как устроена призма Николя?
11. Приведите примеры применения поляризованного света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §190-193.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §134-136.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: Наука, 1980. - §V.4.1,4.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 68
ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Цель работы: наблюдения спектра, полученного с помощью дифракционной решетки, и измерение длины волны спектральных линий.

Приборы и принадлежности: дифракционная решетка, оптическая скамья лазерный источник света.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

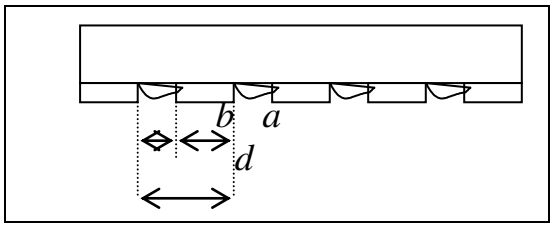


Рис.68.1

Дифракционная решетка представляет собой периодическую структуру в виде пластины, на поверхности которой нанесены с постоянным шагом параллельные штрихи (рис.68.1). Свет проходит только сквозь нетронутые резцом участки, и решетка является системой с параллельными щелями шириной a, разделенными непрозрачными промежутками шириной b. Период решетки равен $d=a+b$. Вместо периода часто задают число штрихов на единице длины $n=1/d$. Рис.68.2

Рассмотрим принцип действия дифракционной решетки. Пусть плоская волна падает нормально на поверхность решетки и дифрагирует по всем направлениям (рис.68.2). В соответствии с методом зон Френеля в направлении, составляющем угол α с направлением падающей волны, число зон.

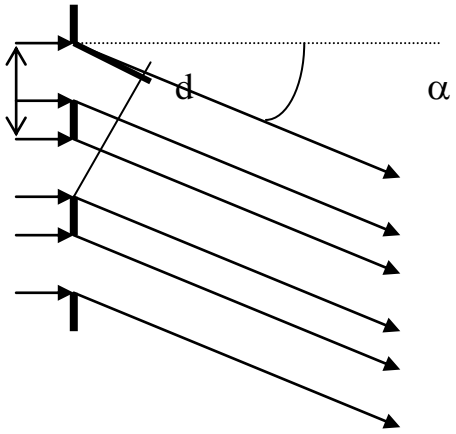


Рис.68.2

Френеля, приходящихся на каждую щель, равно:

$$m_a = \frac{2a}{\lambda}\sin\alpha, \qquad /1/$$

а число закрытых непрозрачным промежутком зон равно:

$$m_в = \frac{2в}{\lambda}\sin\alpha. \qquad /2/$$

Если суммарное число зон, приходящихся на расстояние, равное периоду решетки, четное

$$m_a + m_в = 2k, \qquad /3/$$

то вторичные волны от соответствующих точек каждой щели будут в одинаковой фазе, и в направлении α будет наблюдаться дифракционный максимум. Подставляя в /3/ число открытых и закрытых зон, получим формулу дифракционной решетки:

$$(a+b)\sin\alpha_k = d\sin\alpha_k = k\lambda. \qquad /4/$$

Угол наблюдения дифракционного максимума зависит от длины волны. Поэтому при освещении решетки монохроматическим светом лазера дифракционная картина представляет собой систему максимумов, расположенных симметрично относительно центральной (нулевой) полосы, которой соответствует k=0 и α_0=0 в /4/ (рис.68.3). По значению k максимумы бывают 1–го, 2–го и т.д. порядков.

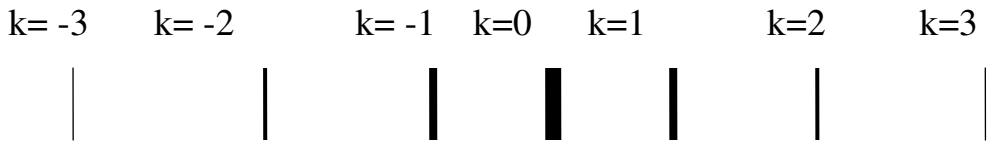


Рис.68.3

Угол наблюдения максимума дифрагированных лучей $\alpha_к$ определяется формулой дифракционной решетки /4/: $(a+b)\sin\alpha_k = d\sin\alpha_k = k\lambda.$ /5/

Угол наблюдения дифракционного максимума зависит от длины волны. Поэтому при освещении решетки монохроматическим светом лазера дифракционная картина представляет собой систему максимумов, расположенных симметрично относительно центральной (нулевой) полосы, которой соответствует k=0 и α_0=0 в /4/ (рис.68.1). По значению k максимумы бывают 1–го, 2–го и т.д. порядков.

В лабораторной работе используется оптическая скамья микролаборатории для выполнения лабораторных работ по оптике школьного курса физики производства ФГУП “Центр МНТП”. В качестве источника света используется лазер, дающий в видимой части спектра одну монохроматическую линию, длину волны которой предлагается определить.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите на оптической скамье источник света и дифракционную решетку.
2. Подключите источник света к батарее «Крона». На экране появится изображение нескольких максимумов.
3. С помощью линейки на оптической скамье определите расстояние L между дифракционной решеткой и экраном с точностью $\pm 10^{-3}$ м.
4. С помощью линейки измерьте расстояния x_k от центров дифракционных максимумов ±1-го, ±2-го и т.д. порядков справа и слева от центра «нулевого» максимума. Данные занесите в таблицу результатов наблюдений.

5. Произведите контроль измерений вычислением разностей x_k-x_{-k}. Если полученные разности существенно отличаются от нуля, повторите измерения.
6. Определите значение периода решетки для каждого из дифракционных максимумов (для каждого из +к и –к) по формуле $$d = k\lambda\sqrt{1+\left(\frac{L}{x_k}\right)^2}. \qquad /6/$$
7. Рассчитайте средние абсолютную и относительную погрешности измерения абсолютного показателя преломления материала по формулам /5/ и /6/

$$\Delta d_{CP} = tg(\alpha, m)\sqrt{\frac{\sum \Delta d_i^2}{m(m-1)}}. \qquad /68.5/ \qquad \varepsilon_N = \frac{\Delta n_{CP}}{n_{CP}}100\% \qquad /7/$$

Значение надежности α выберите α=….. по заданию преподавателя, а значение коэффициента $t_{\alpha,m}$= выберите по таблице с помощью преподавателя. Результаты запишите в таблицу результатов наблюдений. Запишите окончательный результат в виде

$$n = n_{ср} \pm \Delta\ n_{ср} = \quad \pm \quad , \ \varepsilon = ...\%.$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

k	x_k,мм	L,мм	$x_k - x_{-k}$	d,10^{-7} м	Δd_i	Δd_i^2
1						
-1						
2						
-2						
3						
-3						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие волны называют когерентными?
2. Что такое дифракция по Фраунгоферу?
3. Что такое дифракционная решетка? Для каких целей применяется дифракционная решетка?
4. Запишите формулу дифракционной решетки. Выразите период решетки через число штрихов на единицу длины.
5. Какие изменения в дифракционной картине происходят при изменении длины волны, ширины дифракционной решетки?

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева В.Ф. Физика: учебник для среднего профессионального образования / В.Ф. Дмитриева. –М., И.Ц. Академия, 2014. – 446 с. §19.5, 19.7.
2. Мякишев Г.Я. Физика: учебник для 11 кл. общеобразовательных учреждений / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин. – М.: Просвещение, 2014. - § 56.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 69
ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ПОЛЯРИМЕТРОМ

Цель работы: ознакомиться с устройством поляриметра, методом поляриметрических измерений и измерить концентрацию растворов глюкозы.

Приборы и принадлежности: круговой поляриметр, кюветы с растворами глюкозы, источник света.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При прохождении плоско поляризованного света через некоторые вещества наблюдается вращение плоскости поляризации. Такие вещества называются оптически активными. К ним относятся кристаллические тела (кварц, сахар), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях.

Оптическая активность обусловлена асимметрией молекул, либо асимметричным расположением атомов в кристалле. Вещества, поворачивающие плоскость поляризации по часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу, называются правовращающими, против часовой стрелки – левовращающими.

При прохождении света в кристаллах угол поворота плоскости поляризации φ пропорционален длине пути света l: $\varphi = \alpha l$, /1/

где α - удельное вращение вещества, равное углу поворота плоскости поляризации при прохождении светом единицы длины пути. Его размерность в системе СИ [α]=град/дм.

В растворах угол поворота пропорционален длине пути ℓ и массовой концентрации раствора *c:* $\varphi = [\alpha]\, lc$, /2/

где $[\alpha]$ - удельное вращение раствора. Эта величина зависит от природы оптически активного вещества, растворителя, длины волны и температуры. Удельное вращение раствора глюкозы в воде равно: $[\alpha] = 52{,}6\,\frac{град}{дм}$.

Измерение угла поворота плоскости поляризации позволяет определить концентрацию раствора оптически активного вещества с помощью формулы /2/: $c = \frac{\varphi}{[\alpha]\cdot l}\cdot 100\%$. /3/

Прибор для измерения концентрации раствора глюкозы по вращению плоскости колебаний поляризованного света называется поляриметром или сахариметром Солейля. Свет от источника S (рис.68.1) через светофильтр С попадает на поляризатор П. Поляризованный им свет проходит через кювету К с раствором, где плоскость колебаний поворачивается на угол φ. После анализатора А, положение оси которого ОА можно менять вращением его оправы, изображение поляризатора рассматривается через длиннофокусный окуляр Ок. Яркость изображения, в соответствии с законом Малюса, зависит от угла φ между осями поляризатора ОП и анализатора

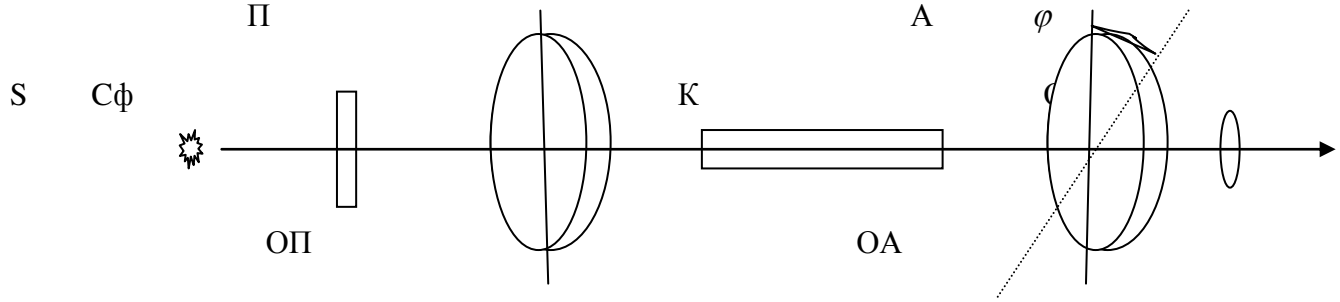
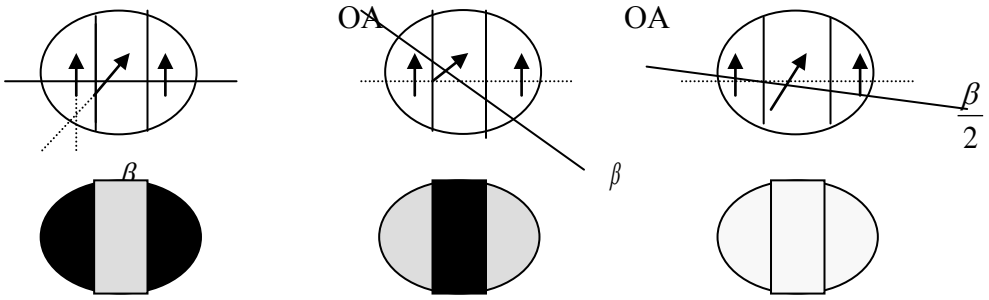


Рис.69.1

ОА.

Для повышения точности отсчета углов на поверхность поляризатора наклеена тонкая вертикальная кварцевая пластина. Удельное вращение кварца велико и в среднем поле (рис.68.2), плоскость колебаний составляет некоторый угол β с плоскостью колебаний в крайних, не закрытых кварцем, полях.



а) б) в)

Рис.69.2

Если ось анализатора перпендикулярна оси поляризатора (рис.69.2а), свет, прошедший через крайние поля в соответствии с законом Малюса, гасится, а через среднее поле частично проходит. Вид поля зрения в окуляр показан в нижней части на рис.68.2а – центральное поле светлее.

При повороте анализатора на угол β (рис.68.2б) гасится свет, проходящий через среднее поле. При повороте анализатора на угол $\beta/2$ яркости среднего и крайних полей сравниваются, и граница между полями исчезает (рис.68.2в). Чувствительность такой конструкции очень высока. Ничтожный поворот анализатора приводит к изменению яркости полей и появлению между ними границы.

Перед измерением концентрации сначала уравнивают яркости полей (рис.68.2в) без кюветы и записывают начальный угол φ_0. После этого в специальное ложе поляриметра устанавливают кювету с раствором и поворачивают анализатор до исчезновения границ между полями и измеряют новый угол поворота анализатора φ_1. Разность нового угла φ_1 и начального φ_o равна углу поворота плоскости поляризации света в растворе φ: $\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$. /4/

Этот угол подставляют в расчетную формулу /3/.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить осветитель. Вращением ходового винта оправы анализатора установить нулевое деление нониуса на 1÷2 градуса шкалы. Поступательным перемещением оправы окуляра добиться резкого изображения поля зрения.
2. Поворотом анализатора уравнять яркости среднего и крайних полей (рис.68.2в). Записать угол φ_o. Слегка сбивая настройку, повторить измерение φ_o несколько раз. Значения φ_o записать в таблицу результатов наблюдений.
3. Поместить в кожух поляриметра одну из кювет, записав ее номер и длину l в дециметрах. Снова произвести наводку на резкость. Измерить угол φ_1 несколько раз аналогично пункту 2.
4. Повторить измерения с другими кюветами. Наводка на резкость каждый раз обязательна.
5. Вычислить средние значения φ_o, φ_1 и их абсолютные погрешности $\Delta\varphi$ с надежностью, указанной преподавателем.
6. Вычислить концентрации растворов по формуле /3/ и их погрешности.
7. Записать результат в виде $C=C_{ср}\pm\Delta C_{ср.}$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№ кюв	L,дм	φ_{0i}	$\Delta\varphi_{0i}$	$\Delta\varphi_{0i}^2$	φ_{1i}	$\Delta\varphi_{1i}$	$\Delta\varphi_{0i}^2$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называются оптически активными?
2. Что такое удельное вращение? В каких единицах оно измеряется?
3. Изобразите оптическую схему установки для определения концентрации оптически активных веществ.
4. Что такое искусственная анизотропия?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §190-193,196.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. - §134-136,141.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: Наука, 1980. - §V.4.1,4.2,4.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 71
ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА ИСТОЧНИКА

Цель работы: изучение зависимости освещенности от расстояния до источника и определение его силы света.

Приборы и материалы: оптическая скамья со штативами и шкалой, люксметр (фотогенератор с амперметром), лампа накаливания, источник питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Задача фотометрии состоит в измерении энергии, переносимой световой волной. Реальная световая волна представляет собой наложение многих волн с длинами, заключающимися в спектральном интервале $\Delta\lambda$. Переносимая волной энергия зависит от ее длины и определяется функцией спектральной плотности энергии $\varphi(\lambda)$. Восприятие этой энергии зависит от длины волны, типа приемника и определяется функцией чувствительности (видности) $V(\lambda)$. Поэтому для характеристики энергии света применяют не обычные энергетические величины, а световой поток - поток лучистой энергии, воспринимаемой приемником и оцениваемой по зрительному ощущению

$$\Phi = \int_0^\infty V(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda, \qquad /1/$$

измеряемый в люменах $[\Phi] = 1$ лм. Опытным путем установлено, что световому потоку в 1 лм, образованному излучением с длиной волны $\lambda = 5{,}55 \times 10^{-7}$ *м*, соответствует поток энергии в 0,0016 Вт.

Точечным называется источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до точки наблюдения.

Для его энергетической характеристики используют силу света или пространственную плотность светового потока – поток излучения, испускаемого внутрь телесного угла $d\Omega$:

$$\mathrm{I} = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \qquad /2/$$

измеряемую в системе СИ в канделах (1кд= 1лм /1 ср).

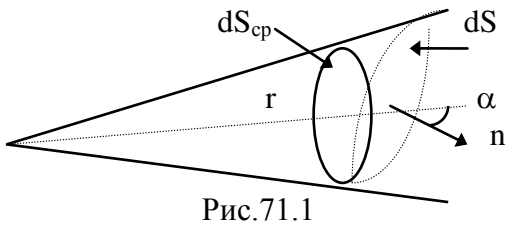


Рис.71.1

Телесный угол – это часть пространства, заключенного внутри конуса, опирающегося на сферическую площадку радиуса, равного длине образующей конуса (рис.71.1). Он численно равен отношению площади вырезаемой на поверхности конуса сферы $dS_{сф}$ к квадрату радиуса сферы.

$$d\Omega = \frac{dS_{сф}}{r^2}. \qquad /3/$$

В случае площадки, нормаль к которой ориентирована под углом α к направлению на точку наблюдения, телесный угол равен:

$$d\Omega = \frac{dS\cos\alpha}{r^2}. \qquad /4/$$

Телесный угол измеряется в системе СИ в [Ω]=1 ср. Телесный угол в 1 стерадиан опирается на площадку $dS_{са} = r^2$. Полный телесный угол равен $4\pi_{ср}$.

Для характеристики излучения, испускаемого источником, используют светимость и яркость. Светимость равна отношению светового потока, испускаемого во всех направлениях, к площади излучающей площадки $M = \frac{d\Phi_{исп}}{dS}$. /5/

Светимость измеряется в системе СИ в [М]=1лм×м $^{-2}$.

Яркость характеризует излучение, испущенное малой площадкой источника в данном направлении. Она численно равна отношению светового потока $d\Phi$ к площади площадки источника dS, телесному углу $d\Omega$ и к косинусу угла θ между нормалью к площадке источника и направлением на точку наблюдения $L = \frac{d\Phi}{d\Omega dS\cos\theta}$. /6/

Яркость измеряется в системе СИ в [L]=1кд×м $^{-2}$.

Энергетической характеристикой светового потока, падающего на данную площадку, является освещенность. Она численно равна отношению светового потока к площади площадки, на которую он падает. $\mathrm{E} = \frac{d\Phi_{пад}}{dS}$.

/7/

Освещенность измеряется в системе СИ в люксах [Е]=1 лк.=1лм×м $^{-2}$.

С учетом /4/ для точечного источника получим $\mathrm{E} = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{\mathrm{I}d\Omega}{dS} = \frac{\mathrm{I}\cos\alpha}{r^2}$. /8/

Следовательно, согласно закону обратных квадратов, освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника.

Зависимость освещенности, создаваемой точечным источником, от расстояния до освещаемой поверхности (закон обратных квадратов) имеет вид (см. формулы /3/,/4/,/7/ и /8/)

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{I}\cos\alpha}{r^2}. \qquad /9/$$

Он выполняется достаточно хорошо, если размеры спирали изучаемой лампы невелики по сравнению с расстоянием до точки наблюдения, $\ell << r$. Малыми должны быть и размеры фо-

тогенератора, чтобы обеспечить постоянство угла падения α. В реальной установке эти условия выполняются для $r \geq 0{,}15м.$

С учетом внешних засветок E_0 /9/ имеет вид $$E = \frac{I\cos\alpha}{r^2} + E_0. \qquad /10/$$

С достаточной степенью точности можно считать, что $\alpha = 0$ для всех точек поверхности генератора. Отсюда $$E = I\frac{1}{r^2} + E_0. \qquad /11/$$

В координатах (E, $1/r^2$) график этой функции представляет прямую.

Задача студента состоит в построении зависимости /11/ и определении по ней силы света источника $$I = \frac{E_2 - E_1}{1/r_2^2 - 1/r_1^2}, \qquad /12/$$

где E_{ii} - освещенности в точках с координатами r_i на графике.

Экспериментальная установка представляет оптическую скамью, на которой на штативах устанавливаются неподвижно источник (лампа накаливания) и подвижно фотогенератор. Флажки на штативах указывают расстояние от спирали лампы до поверхности фотогенератора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить питание изучаемой лампы.
2. Установить предел измерения люксметра «500 лк».
3. Установить фотогенератор на расстоянии $r \geq 0{,}15м$ от лампы.
4. Открыть защитную крышку фотогенератора. Прибор должен показывать возможно большее отклонение, но не зашкаливать. В случае необходимости следует перейти на более низкий предел измерения.

Внимание! При длительном освещении чувствительность фотогенератора уменьшается. Не следует оставлять его долго открытым, а после окончания измерений необходимо закрыть.

5. Увеличивать расстояние от источника до фотогенератора r, перемещая последний так, чтобы стрелка люксметра устанавливалась на определенных делениях шкалы и фиксировать величину расстояния и освещенность. Измерения проделать в 6…8 точках. Полученные данные занести в таблицу результатов наблюдений.
6. Повторить измерения для каждой величины освещенности 3 раза, удаляя и приближая фотогенератор к источнику.
7. Вычислить значение $r_{ср}$ и $r^{-2}{}_{ср}$ для каждого значения освещенности.
8. Построить график $E = f\left(r^{-2}\right)$. На прямолинейном участке графика взять две точки и используя их координаты, вычислить силу света лампы по формуле /12/.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

E, лк	r, м			$R_{СР}$, м	r^{-2}, $м^{-2}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое точечный источник?
2. Что такое телесный угол? Чему он равен? В каких единицах измеряется? Чему равен полный телесный угол?
3. Что такое излучательность (световой поток)? Чему он равен? В каких единицах он измеряется?
4. Что такое сила света? Чему она равна? В каких единицах измеряется?
5. Что такое освещенность? Чему она равна? В каких единицах она измеряется?
6. Как связана излучательность с функцией видности и спектральной плотностью излучательности?
7. Выведите закон обратных квадратов.
8. Опишите физический принцип работы люксметра.
9. Почему зависимость освещенности от расстояния до источника не является линейной во всей области значений r^{-2}?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §168.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. §113,114.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 72
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: изучить связь фотометрических и энергетических характеристик источника света.

Приборы и материалы: фотоэлектрический фотометр, эталонная лампа, испытуемая лампа, оптическая скамья с линейкой, ваттметр, лабораторные автотрансформаторы, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Световой отдачей называется отношение излучаемого источником светового потока Ф к потребляемой мощности P: $$\sigma = \frac{\Phi}{P}. \qquad /1/$$

Световая отдача измеряется в системе СИ в $[\sigma]=1\text{лм}\times\text{Вт}^{-1}$.

Для большинства ламп накаливания зависимость $\sigma = f(\mathrm{P})$ имеет вид

$$\sigma = kP^{\alpha}, \qquad /2/$$

где k - постоянная для данной лампы величина, а $\alpha \cong 1{,}25$.

Световая отдача зависит от конструкции лампы и физического процесса, используемого для получения света. У ламп накаливания эта величина зависит от температуры нити накала, т.к. увеличение температуры приводит к смещению максимума спектральной плотности излучательности $r_{\lambda,\mathrm{T}}$ в сторону более коротких длин волн и изменению доли энергии, приходящейся на рабочий спектральный интервал. Следовательно, световая отдача сильно зависит от мощности, подводимой к лампе накаливания, т.к. изменение подводимой к лампе мощности приводит к изменению температуры нити.

Для фотометрических измерений используются фотометры объективные (не требующие участия глаз) и субъективные (визуальные). Примером объективного фотометра является люксметр. Его работа основана на явлении вентильного фотоэффекта. Фототок прямо пропорционален поглощенному элементом световому потоку. Поэтому шкала измерительного прибора (амперметра) градуируется в фотоэлектрических величинах (например, в люксах). Если нет необходимости знать величину светового потока, а достаточно лишь установить факт

равенства двух световых потоков используют визуальные фотометры, в которых производится сравнение яркостей двух соприкасающихся поверхностей, например, фотометр Луммера-Бродхуна.

Фиксировать равенство освещенностей можно с помощью фотоэлементов, подключенных к гальванометру так, как показано на рис.72.1.

Фотодиоды (солнечные батареи) создают в гальванометре токи I_1 и I_2 противоположного направления. Если освещенности обоих элементов одинаковы, то гальванометр G показывает отсутствие тока. Равенства освещенностей добиваются, изменяя расстояния от фотометра эталонного источника и от фотометра исследуемого источника. По известной силе света эталонного источника можно, используя закон обратных квадратов, определить силу света изучаемого источника.

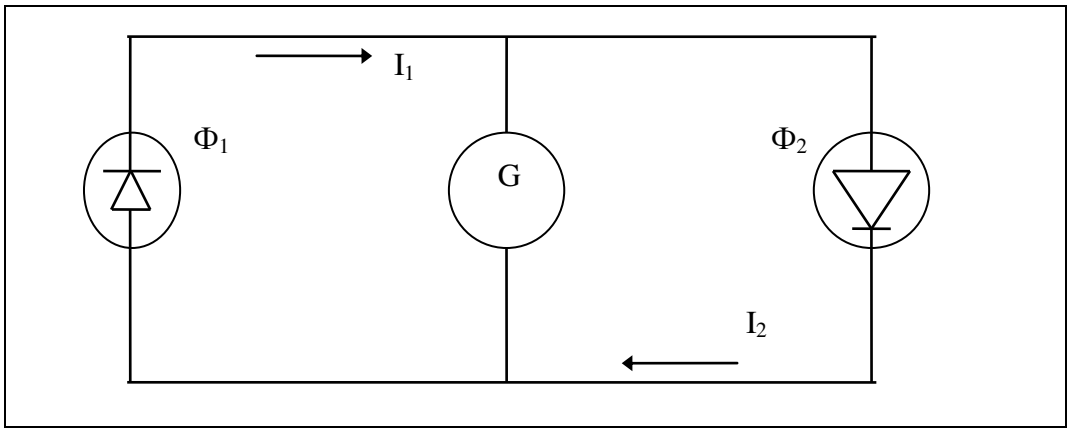


Рис.72.1.

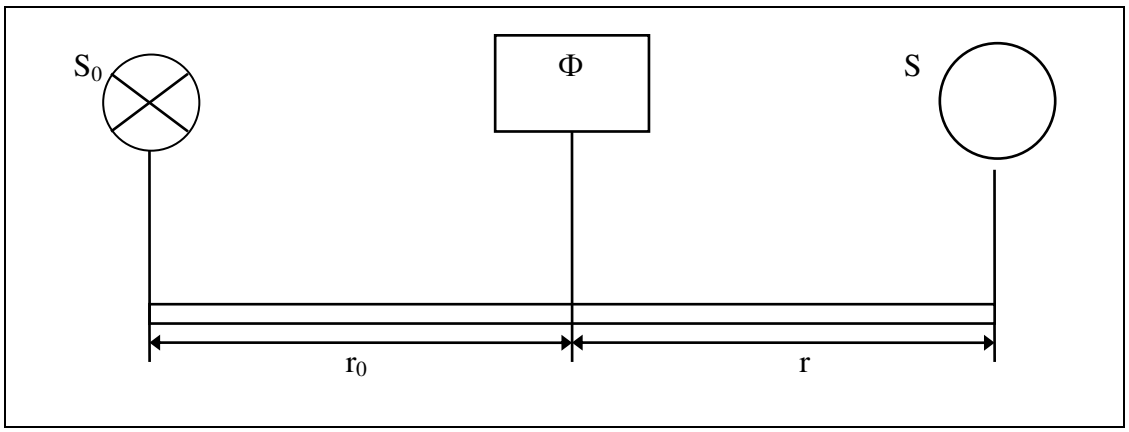


Рис.72.2

Для определения силы света исследуемой лампы в работе использует-ся фотоэлектрический фотометр. Зная расстояние r_o от эталонной лампы S_o до фотометра Φ и от исследуемой лампы S до фотометра r, на основании закона обратных квадратов получим

$$E_o = \frac{I_o \cos\alpha}{r_o^2} \quad \text{и} \quad E = \frac{I \cos\alpha}{r^2}. \qquad /3/$$

С учетом того, что лучи падают перпендикулярно поверхности экрана фотометра, $\alpha = \alpha_o = 0$ для случая равенства освещенностей получим

$$\frac{I_o}{r_o^2} = \frac{I}{r^2}. \qquad /4/$$

Зная силу света эталонной лампы (указана на установке), можно рассчитать силу света исследуемой лампы

$$I = I_o \left(\frac{r}{r_o}\right)^2. \qquad /5/$$

После этого с учетом данных измерения мощности ваттметром рассчитывается σ -

по формуле $$\sigma = 4\pi \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{P}}. \qquad /6/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

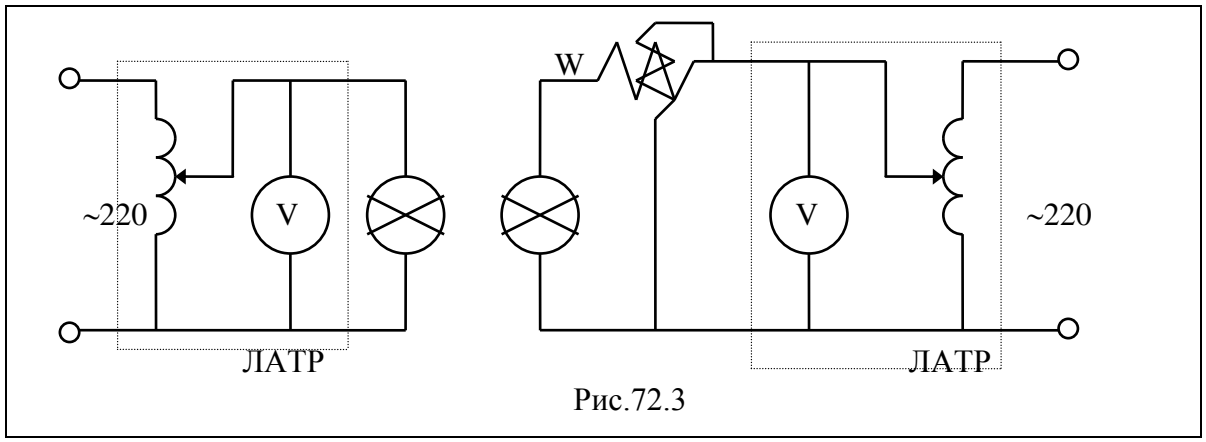


Рис.72.3

1. Собрать электрическую схему установки (рис.72.3).

2. Подключить питание установки. ЛАТРом установить на лампе S_o постоянное напряжение U_o .

3. Установить лампы S_o и S на расстоянии $r + r_o \approx 1{,}0...1{,}5 м$ друг от друга. Подать напряжение U на испытуемую лампу S, измерив ток и напряжение или напряжение и мощность P, подведенную к ней.

4. Подключить гальванометр к фотометру. Перемещением фотометра вдоль скамьи установить стрелку гальванометра на ноль. Измерить соответствующие величины r_o и r. Полученные данные занести в таблицу результатов наблюдений.

4. Повторить измерения по п. 3,4 для 7…10 значений напряжения U в интервале 70…220 В.

5. Вычислить значения силы света I и световой отдачи σ по формулам /5/, /6/ и построить график зависимости $\sigma = f(\mathrm{P})$.

Примечание: Так как для большинства ламп зависимость $\sigma = f(\mathrm{P})$ имеет вид /2/, то целесообразно построить график зависимости $\ln \sigma$ от $\ln \mathrm{P}$, который должен быть линейным, и по нему определить величину коэффициента α. $\mathrm{I}_o =$ *кд,* $\alpha =$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

P, Вт	r_o , *м*	r , *м*	I_o, *кд*	σ, *лмВт*$^{-1}$	$\ln \sigma$	$\ln \mathrm{P}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое телесный угол? Чему он равен? В каких единицах измеряется? Чему равен полный телесный угол?
2. Что такое точечный источник?
3. Что такое световой поток? Чему он равен? В каких единицах он измеряется?
4. Что такое сила света? Чему она равна? В каких единицах измеряется?
5. Как связан световой поток с функцией видности и спектральной плотностью светового потока?

6. Что такое освещенность? Чему она равна? В каких единицах она измеряется?
7. Сформулируйте и запишите формулу закона обратных квадратов.
8. Выведите закон обратных квадратов.
9. Опишите физический принцип работы люксметра.
10. Опишите принцип работы фотоэлектрического фотометра.
11. Опишите принцип работы фотометра Луммера-Бродхуна.
12. Что такое световая отдача источника? Чему она равна? В каких единицах она измеряется?
13. От чего зависит световая отдача лампы накаливания?
14. Что такое удельный расход мощности? В каких единицах он измеряется? Чему он равен?
15. От чего зависит удельный расход мощности лампы накаливания?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §168, 201.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. §113,114.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 73
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НИТИ НАКАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛАМПЫ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

Цель работы: ознакомиться с методом яркостной пирометрии, установить зависимость температуры нити накала от подводимой мощности и зависимость сопротивления нити накала от температуры.

Приборы и материалы: оптический пирометр, ваттметр, лабораторный автотрансформатор, исследуемая лампа накаливания, оптическая скамья, вольтметр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Все тела излучают электромагнитные волны в той или иной области спектра, например, сильно нагретые - в видимой области, тела при комнатной температуре - в инфракрасной области спектра.

Излучение, возникающее за счет внутренней энергии тел, называется тепловым. Оно зависит от температуры и оптических свойств излучающих тел.

Радиационным теплообменом называется самопроизвольный процесс передачи энергии в форме теплового излучения, осуществляемый путем излучения и поглощения телами электромагнитных волн. В процессе теплообмена у тел в замкнутой системе устанавливается термодинамическое равновесие между количеством поглощенной и испущенной энергии. Это приводит к уравниванию температур тел.

Энергетическими характеристиками теплового излучения являются излучательность $R_Э$ и спектральная плотность излучательности $r_{\lambda,T}$.

Излучательность или энергетическая светимость тела – это мощность всевозможных длин волн $0 < \lambda < \infty$, излучаемая с единицы поверхности тела.

Спектральная плотность излучательности или спектральная плотность энергетической светимости - это мощность, излучаемая с единицы поверхности тела в интервале длин волн $[\lambda, \lambda + d\lambda]$.

Величины $r_{\lambda,T}$ и $R_Э$ связаны между собой соотношениями

$$r_{\lambda,\mathrm{T}} = \frac{dR_{\text{Э}}}{d\lambda} \quad ; \quad R_{\text{Э}} = \int_{o}^{\infty} r_{\lambda,\mathrm{T}} d\lambda . \qquad /1/$$

Тела поглощают часть теплового излучения, попадающего на них от других тел. Спектральным коэффициентом поглощения или поглощательной способностью тела называется безразмерная величина, равная отношению поглощенного к падающему потоку излучения в данном спектральном диапазоне:

$$a_{\lambda,\mathrm{T}} = \frac{d\Phi_{\lambda}^{погл}}{d\Phi_{\lambda}^{пад}} \le 1. \qquad /2/$$

Эта величина зависит от длины волны, температуры и свойств тела (его состава и поверхности) и никогда не превышает единицы.

Тело, у которого $a_{\lambda,\mathrm{T}} = 1,$ называется абсолютно черным, т.к. поглощает все падающее на него излучение.

Серым называется тело, у которого поглощательная способность не зависит от длины волны и поляризации света: $a_{\lambda,\mathrm{T}} = const(\lambda) < 1.$

Для тел в состоянии термодинамического равновесия с их тепловым излучением справедлив закон Кирхгофа: «Отношение спектральной плотности излучательности к поглощательной способности тела не зависит от его природы и является универсальной функцией длины волны и температуры – спектральной плотностью энергетической светимости абсолютно черного тела $f(\lambda,\mathrm{T})$».

Вид этой функции установлен Планком:

$$f(\lambda,\mathrm{T}) = \frac{A\lambda^{-5}}{e^{\frac{B}{\lambda \mathrm{T}}} - 1} = \frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda\kappa \mathrm{T}}} - 1}, \qquad /3/$$

где *A* и *B* - постоянные. Зависимость $f(\lambda,\mathrm{T})$ (а) при T=*const* представлена на рис.73.1 вместе с зависимостью $r_{\lambda,\mathrm{T}}$ (в) для серого тела.

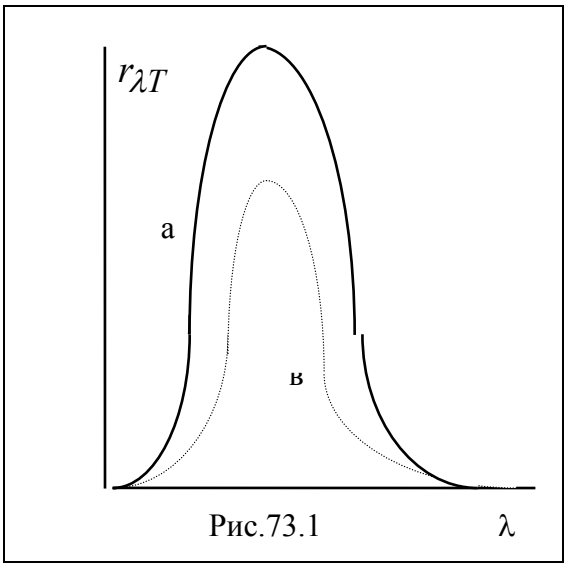


Рис.73.1

Интегрируя функцию Планка для спектральной плотности излучательности во всем диапазоне длин волн от нуля до бесконечности, мы получим зависимость излучательности абсолютно черного тела от температуры:

$$R_{\text{Э}} = \sigma \mathrm{T}^4, . \qquad /4/$$

где $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ Вт м$^{-2}$ К$^{-4}$ – постоянная Стефана-Больцмана. Для серого тела $R_{\text{Э}} = a_T \sigma \mathrm{T}^4$.

Зависимость /4/ была первоначально установлена экспериментально и носит название закона Стефана-Больц мана: «Излучательность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры».

На рис.73.1 а – абсолютно черное тел б – Серое тело.

Находя производную по длине волны от функции Планка и приравнивая ее к нулю, получим

$$\lambda_m = \frac{b}{\mathrm{T}}, \qquad /5/$$

где $b = 2{,}898 \times 10^{-8}$ м К. Эта зависимость также была первоначально установлена экспериментально и носит название закона Вина: «Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучательности, обратно пропорциональна абсолютной температуре».

Законы Стефана-Больцмана и Вина можно использовать для определения температуры тела путем измерения $R_Э$ (пирометрия) и λ_m (цветовая пирометрия). На сравнении яркостей тел основан метод яркостной пирометрии. При измерении температуры тела пирометром сравниваются яркости нагретого тела и абсолютно черного тела в определенном спектральном интервале. При равенстве яркостей излучения нить эталонной лампы “исчезает” на фоне изображения объекта.

Если в этом случае можно считать, что объект - абсолютно черное тело, то его температура равна температуре эталона. Для реальных тел измеряется яркостная температура T' - температура серого тела с такой же яркостью, как и у измеряемого тела.

Истинная T и яркостная T' температуры связаны соотношением

$$\frac{1}{\mathrm{T}} = \frac{1}{\mathrm{T}'} + \frac{\lambda}{C_o} \ln a_{\lambda,\mathrm{T}}, \qquad /6/$$

где $C_o = \frac{hc}{k}$=1,4387 10^{-2} м К, $a_{\lambda,\mathrm{T}}$ - поглощательная способность тела, которое выбрано в качестве эталона (вольфрамовой нити пирометра),

λ - длина волны излучения, применяемого для измерения (λ =6,56 10^{-7} м - красный свет). Т.к. $a_{\lambda,\mathrm{T}} \le 1$, то яркостная температура всегда меньше истинной. Уравнение /6/ можно представить в виде

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{T}'}{\mathrm{M}\mathrm{T}' + 1}, \qquad /7/$$

где $\mathrm{M} = \frac{\lambda}{C_o} \ln \alpha_{\lambda,\mathrm{T}}$. Величина поглощательной способности $a_{\lambda,\mathrm{T}}$ для λ=6,56 10^{-7} м, на которой работает пирометр в интервале температур 1300…2600 К равна для вольфрама 0,44…0,42. Пользуясь величинами $a_{\lambda,\mathrm{T}}$, можно по формуле /7/ перейти от яркостной T' к истинной T температуре. В работе переход от T' к T производится с использованием графика.

Задача состоит в определении истинной температуры вольфрамовой нити лампы накаливания и построении зависимостей $\mathrm{T}^4 = f(\mathrm{P})$, где P=IU - мощность, подводимая к лампе, и R=f(T), где R=U/I - сопротивление лампы, U - падение напряжения, I - ток. Если измеряются мощность (ваттметром) и падение напряжения, то $R=U^2/P$.

График зависимости T^4=f(P) должен быть линейным, если считать, что вся подводимая мощность переходит в световую энергию.

Также линейным является график зависимости сопротивления вольфрама от температуры, поскольку согласно закону Кольрауша $R=R_0[1+\alpha(T-T_0)]$, /8/

где R - сопротивление при температуре T, R_0 - сопротивление при температуре T_0 (обычно 0^0C), а α - температурный коэффициент сопротивления.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему питания исследуемой лампы (рис.73.2).

2. Включить схему питания, подав напряжение U=50…70 В, что обеспечивает минимальное свечение лампы.

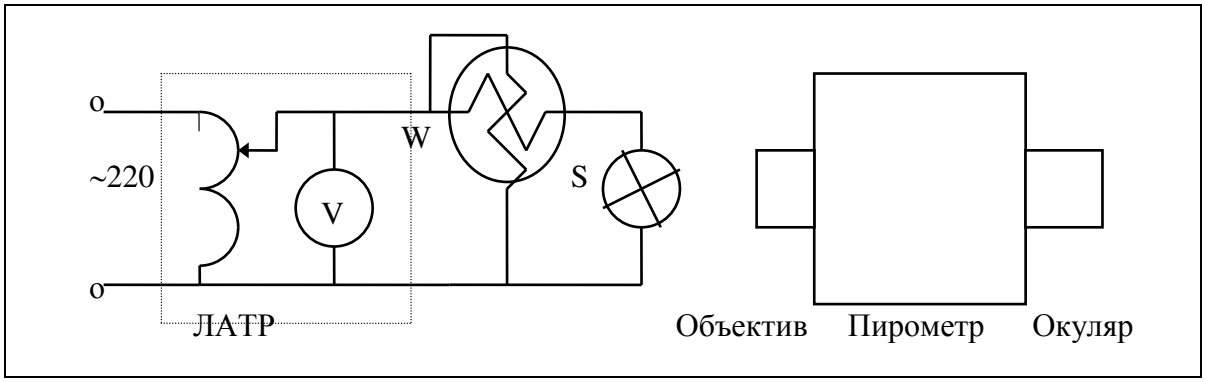


Рис.73.2

3. Вращая окуляр пирометра (см. описание пирометра «Проминь» на установке), при выведенном светофильтре и включенной кнопке питания пирометрической лампы, добиться резкого изображения ее горизонтальной нити. Затем питание выключить.

4. Навести пирометр на измеряемый объект (нить лампы накаливания). Вращая объектив, добиться резкого изображения нити лампы (при этом будут видны витки ее спирали). Ввести светофильтр, а переключатель ослабителя установить на диапазон «1».

5. Совместить изображения нитей лампы накаливания и пирометрической лампы при включенной кнопке питания пирометрической лампы. Вращением барабана регулировки питания пирометрической лампы добиться равенства яркостей нитей. Определить значение яркостной температуры T' по шкале диапазона «1».

6. Определить цену деления вольтметра и амперметра. Измерить величины напряжения и тока (или мощности), соответствующие измеренной величине яркостной температуры. Вычислить мощность, подводимую к лампе. Если установка включает ваттметр и вольтметр, то определить цену деления ваттметра и вольтметра.

7.Измерения по п. 5,6 произвести 6-8 раз при различных значениях напряжения питания в интервале 50-220 В. При необходимости переходить на диапазоны «2» и «3» ослабителя. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

I,A	***U,B***	P,Вт	R,Ом	t`,^{0}C	T`, 10^3K	T,10^3 K	T^4, 10^{12} K^4

8. По графику зависимости $T = f(T')$ (на установке) определить истинную температуру тела. По формуле R=U/J или $R=U^2/P$ рассчитать значение R. Построить графики зависимости $T^4 = f(P)$ и $R = f(T)$ и убедиться в их линейности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Построить график вольт-амперной характеристики лампы накаливания $J = f(U)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое термодинамическое равновесие тела и теплового излучения?
2. Что такое излучательность тела? В каких единицах она измеряется?
3. Что такое спектральная плотность излучательности? В каких единицах она измеряется? Как она связана с излучательностью?
4. Что такое поглощательная способность? В каких единицах она измеряется?
5. Что такое абсолютно черное тело?
6. Что такое серое тело?

7. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения. Запишите его формулу.
8. Сформулируйте и запишите формулу Стефана-Больцмана.
9. Сформулируйте и запишите формулу закона Вина.
10. Сформулируйте квантовые гипотезы Планка и Эйнштейна.
11. Нарисуйте график зависимости спектральной плотности излучательности для абсолютно черного (серого) тела. Объясните с помощью этого графика законы Стефана-Больцмана и Вина.
12. Запишите функцию Планка. Как из нее можно получить выражения для законов Стефана-Больцмана и Вина?
13. Что такое яркостная температура?
14. Опишите принцип работы оптического пирометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §197, 198, 200, 201.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987. Т.2. §1,2,3,4,7;
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф М.: Наука, 1980. - §V.5.1, V.5.2, V.5.3, V.5.4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 74
ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО И ГАЗОНАПОЛНЕННОГО ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: изучить явление внешнего фотоэффекта, ознакомиться с принципом действия вакуумного и газонаполненного фотоэлементов и экспериментально исследовать зависимость фототока от напряжения и светового потока.

Приборы и материалы: вакуумный и газонаполненный фотоэлементы, микроамперметр и вольтметр постоянного тока, реостат, источник постоянного тока, источник света (электрическая лампа), оптическая скамья со штативом, источник питания лампы с регулируемым напряжением, соединительные провода.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Фотоэффект заключается в переводе электронов (фотоэлектронов) на более высокие энергетические уровни под действием квантов электромагнитного излучения (фотонов). Если электроны вылетают за пределы материала, то наблюдается внешний фотоэффект.

Столетов экспериментально установил следующие закономерности внешнего фотоэффекта:

1. Существует длинноволновая (“красная”) граница фотоэффекта, зависящая от рода металла, так что при $\lambda > \lambda_{кр}$ фотоэффект не наблюдается.
2. Максимальная скорость (кинетическая энергия) фотоэлектрона, выбитого из металла, зависит только от длины волны падающего света.
3. Максимальный фототок (фототок насыщения) прямо пропорционален световому потоку.

Эти закономерности объясняются на основании закона сохранения энергии, сформулированного Эйнштейном:

$$\mathrm{E}_{ф} = A + K_{m}, \qquad /1/$$

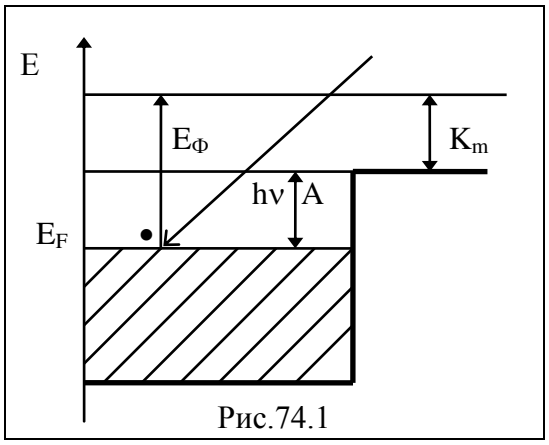


Рис.74.1

где $E_ф$ – энергия фотона, A - работа выхода электрона из металла, K_m - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона. Графически уравнение Эйнштейна можно проиллюстрировать с помощью энергетической диаграммы (рис.74.1).

Энергия фотонов $E_ф$ передается в основном электронам, находящимся у поверхности металла и обладающим энергией, близкой к E_F – энергии Ферми. Получив энергию $E_ф$, электрон переходит на уровень $E= E_F + E_ф$, и если $E > 0$, электрон покидает металл с кинетической энергией $K_m = E_ф – A$. Если в процессе выхода фотоэлектрон передает часть энергии кристаллической решетке (сообщая ей тепловое движение) или если он выбивается с энергетического уровня ниже E_F, то его кинетическая энергия меньше, $K<K_m$.

Энергия фотона равна: $E_ф = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$, где h – постоянная Планка, c - скорость света, λ - длина волны света. С увеличением λ при

$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A} \qquad /2/$$

электроны перестанут вылетать из металла, т.к. $K=0$, что объясняет первый закон Столетова.

Второй и третий законы Столетова вытекают из гипотезы Эйнштейна о том, что поглощение света электроном происходит порциями - квантами. Поэтому кинетическая энергия фотоэлектрона не зависит от общего количества энергии (числа фотонов), поглощенного металлом. Количество фотоэлектронов (величина фототока) прямо пропорционально световому потоку (количеству поглощенных фотонов). Сила фототока равна:

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{e\Delta N_e}{\Delta t} \sim \frac{\Delta N_ф}{\Delta t} = \frac{ФS}{E_ф}, \qquad /3/$$

где: ΔN_e -количество фотоэлектронов с зарядом e, $\Delta N_ф$ - количество фотонов, $Ф$ - световой поток (количество лучистой энергии, падающей в единицу времени), S - площадь металла. Откуда $J \sim Ф$.

Явление внешнего фотоэффекта используется для создания фотоэлементов (рис.74.2).

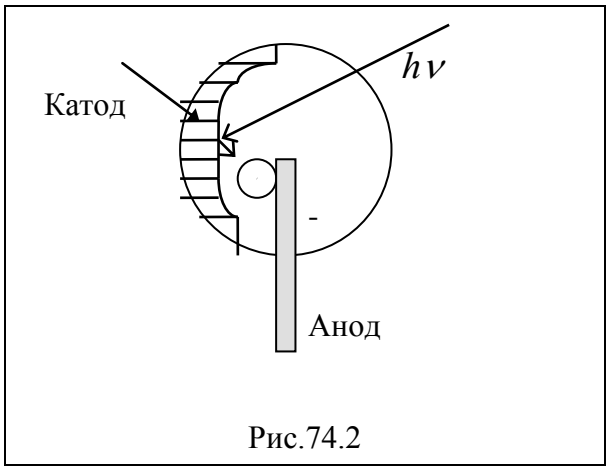


Рис.74.2

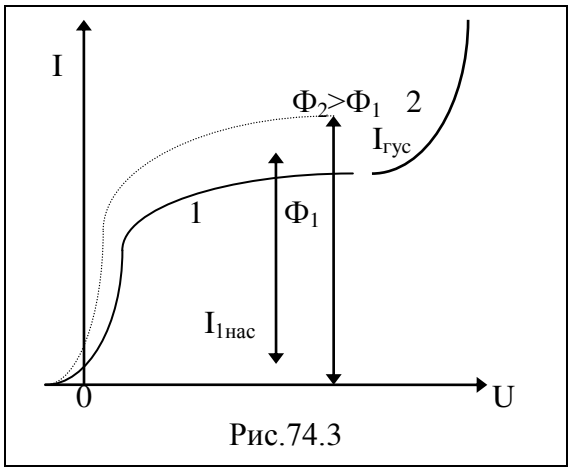


Рис.74.3

Свет, попадая на катод, выбивает фотоэлектрон, движущийся под действием электрического поля к аноду.

Вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента показана на рис.74.3, участок 1 сплошной кривой. В отсутствие внешнего поля $U = 0$, на катод попадают электроны за счет

своей кинетической энергии и течет небольшой ток. Для его прекращения необходимо напряжение обратной полярности $U_з$, так что $$eU_з = \frac{hc}{\lambda} - A = K_m. \qquad /4/$$

С увеличением напряжения ток возрастает и достигает насыщения, когда все выбитые электроны попадают на анод.

Для получения больших токов используют эффект газового усиления в газонаполненных фотоэлементах. Вольт-амперная характеристика такого элемента представлена на рис.74.3, участок 2 сплошной кривой. Эффект газового усиления возникает, когда фотоэлектрон в промежутке между столкновениями с молекулами газа приобретает энергию, большую энергии ионизации:

$$elE \geq e\varphi_{кон}, \qquad /5/$$

где e – заряд электрона; l - длина свободного пробега фотоэлектрона; E - напряженность внешнего поля; $\varphi_{кон}$ - потенциал ионизации. По мере роста напряжения на аноде условие ионизации /5/ выполняется в большей части объема и ток ионизации $J_{кон}$ возрастает так, что суммарный ток равен $$J=J_ф+J_{кон}. . \qquad /6/$$

В том случае, когда конечная энергия электрона $E < 0$, возможен переход электронов на другие энергетические уровни из валентной зоны в зону проводимости и наблюдается внутренний фотоэфефкт. В твердых полупроводниках и диэлектриках при этом может возникать явление фотопроводимости или вентильный (фотогальванический) эффект.

Задача студента состоит в измерении величины тока в цепи вакуумного и газонаполненного фотоэлементов в зависимости от напряжения на аноде и в проверке пропорциональности фототока $J_ф$ и светового потока $Ф$, па дающего на анод.

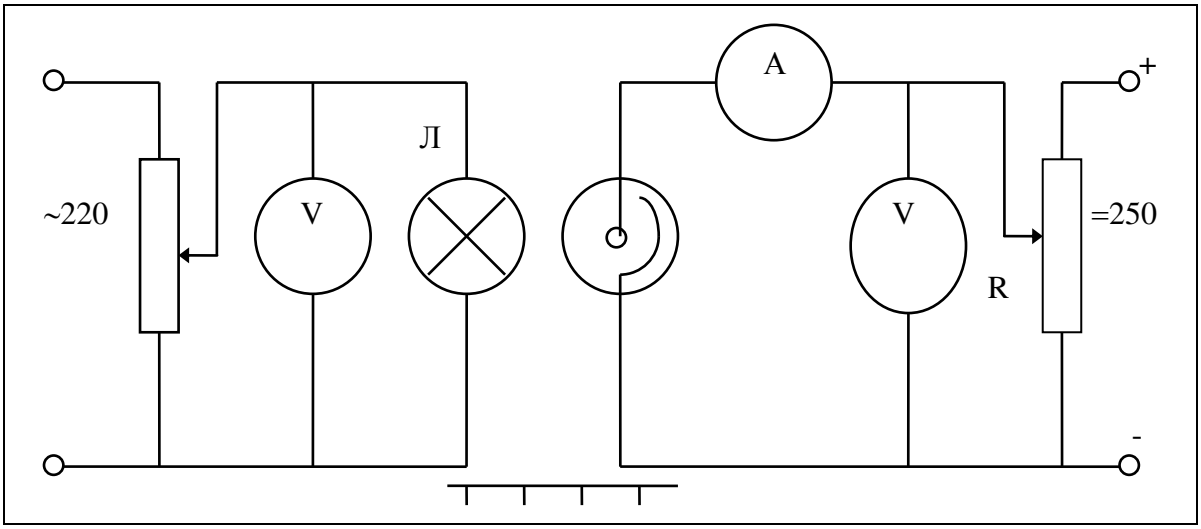


Рис.74.5

Схема установки представлена на рис.74.5. На оптической скамье на штативах с указателями положения располагается лампа *Л* и фотоэлемент *Ф* . Там же имеется измерительная линейка. Ток и напряжение на фотоэлементе изменяются делителем *R* и измеряются микроамперметром *A* и вольтметром *V*.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь фотоэлемента, соблюдая полярность подключения приборов. Движок реостата установить в положение, соответствующее минимальному подаваемому напряжению. Начинать работу с газонаполненного фотоэлемента.
2. Отодвинуть фотоэлемент на максимальное расстояние от лампы, подать напряжение 150-200 В на фотоэлемент. Приближать фотоэлемент к лампе до достижения максимального тока через амперметр. Зафиксировать положение фотоэлемента и уменьшить напряжение до нуля.

3. Увеличивать напряжение, фиксируя величину тока через амперметр и показания вольтметра. В интервале 0…60 В напряжение менять с шагом
5 В, в интервале 60…200 В – с шагом 20 В. Величины тока и напряжения занести в таблицу результатов наблюдений. Построить график зависимости $I_Ф=f(U)$ – вольт-амперную характеристику газонаполненного фотоэлемента.
4. Сменить фотоэлемент на вакуумный и повторить операции по п. 2, 3. Величины тока и напряжения занести в таблицу результатов наблюдений. Построить график зависимости $I_Ф=f(U)$ – вольт-амперную характеристику вакуумного фотоэлемента.
5. Подать на вакуумный фотоэлемент напряжение, соответствующее достижению тока насыщения (70…100 В). Изменять световой поток Ф, падающий на фотоэлемент изменяя силу света лампы J путем изменения напряжения ее питания U. Силу света лампы определить по графику $J=f(U)$. Величины тока и напряжения занести в таблицу результатов наблюдений. Согласно третьему закону Столетова световой поток пропорционален силе фототока $Ф \sim I_Ф$. Согласно закону обратных квадратов

$$Ф = \frac{IS\cos\alpha}{r^2}. \qquad /7/$$

Построить график зависимости $I_Ф=f(J)$ и убедиться в его линейности.
6. Подать на вакуумный фотоэлемент напряжение, соответствующее достижению тока насыщения (70÷100 В). Изменять световой поток Ф, падающий на фотоэлемент, изменяя расстояние от лампы до фотоэлемента. Измерить величину фототока $I_ф$ (пропорциональную световому потоку Ф) в зависимости от расстояния до лампы *r*. Данные занести в таблицу результатов наблюдений. Построить график зависимости $I_Ф=f(r^{-2})$ и убедиться в его линейности. Пункты 6, 7 выполняются по заданию преподавателя.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Газонаполненный		Вакуумный		Вакуумный		Вакуумный		
U, В	$I_Ф$, мкА	U, В	$I_Ф$, мкА	J, *кд*	$Ф(\sim I_Ф)$	r, м	r^{-2}, $м^{-2}$	$Ф(\sim I_Ф)$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое фотоэффект? Что такое внутренний и внешний фотоэффект?
2. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
3. Нарисуйте электрическую схему установки для исследования фотоэффекта.
4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику внешнего фотоэффекта.
5. Сформулируйте и запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
6. Объясните законы Столетова для фотоэффекта с помощью уравнения Эйнштейна.
7. Нарисуйте энергетическую диаграмму для фотоэффекта.
8. От чего зависит ток насыщения и задерживающая разность потенциалов на вольт-амперной характеристике фотоэффекта?
9. Чем и по каким причинам отличаются вольт-амперные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов?
10. Сформулируйте закон обратных квадратов.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §202, 203,204.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987. Т.2. - §9.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф М.: Наука, 1980. - §V.6.1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 75
ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Цель работы: ознакомиться с теорией вентильного фотоэффекта, снять вольт-амперные характеристики солнечной батареи и выбрать оптимальный режим ее работы.

Приборы и принадлежности: кремниевый вентильный фотоэлемент (солнечная батарея), миллиамперметр, магазин сопротивлений, лампа накаливания, лабораторный автотрансформатор, оптическая скамья, соединительные провода, осциллограф.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В том случае, когда конечная энергия электрона, поглотившего фотон E<0, возможен переход электронов на другие энергетические уровни (из валентной зоны в зону проводимости). Такой фотоэффект называется внутренним. В твердых полупроводниках и диэлектриках при этом возникает фотопроводимость, а при наличии контакта полупроводников с различным типом проводимости - вентильный (фотогальванический) эффект, заключающийся в появлении электродвижущей силы на p-n переходе под действием света. Если на поверхность полупроводникового диода падает световой поток

$$\Phi = E_{\phi}\frac{\Delta N_{\phi}}{\Delta t}V(\lambda), \qquad /1/$$

где $V(\lambda)$ - функция видности (см. лаб. раб. 71), а энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны $E_{\phi} \geq E_{з}$, то электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости, порождая в первой дырки (происходит генерация электронно-дырочных пар). Носители обоих знаков диффундируют вглубь проводника к p-n переходу, где их концентрация меньше. Поле перехода E_n задерживает основные носители. Неосновные носители свободно проходят область p-n перехода, и по цепи течет ток *J* (рис.75.1а и рис.75.1б), направление которого не зависит от типа проводимости освещенного полупроводника.

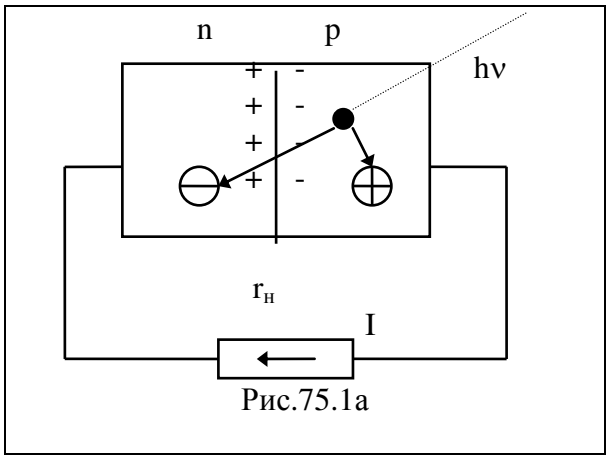


Рис.75.1а

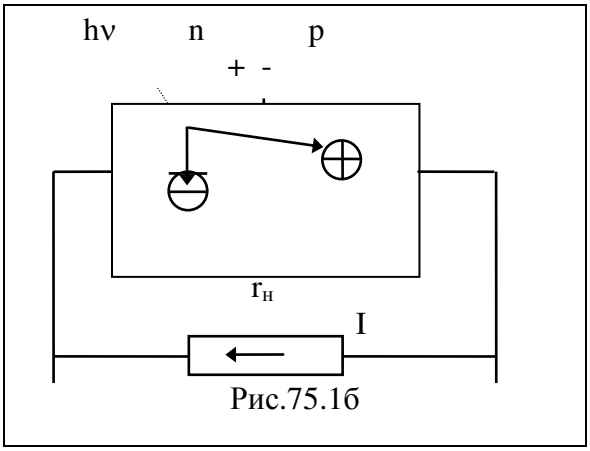


Рис.75.1б

Появление тока *J* в цепи обусловлено появлением фотоЭДС при освещении полупроводникового диода.

Как видно из энергетической диаграммы p-n перехода в отсутствие освещения и внешнего поля (рис.75.2а), поток основных носителей через область перехода (электронов слева направо и дырок справа налево)

$$\text{I} \rightarrow J_{осн} \sim e^{-\frac{\Delta\Pi_o}{kT}} \qquad /2/$$

компенсируется обратным потоком неосновных носителей

$$\text{II} \rightarrow J_{з} = J_{неосн} \sim e^{-\frac{\Delta E_{з}}{kT}}. \qquad /3/$$

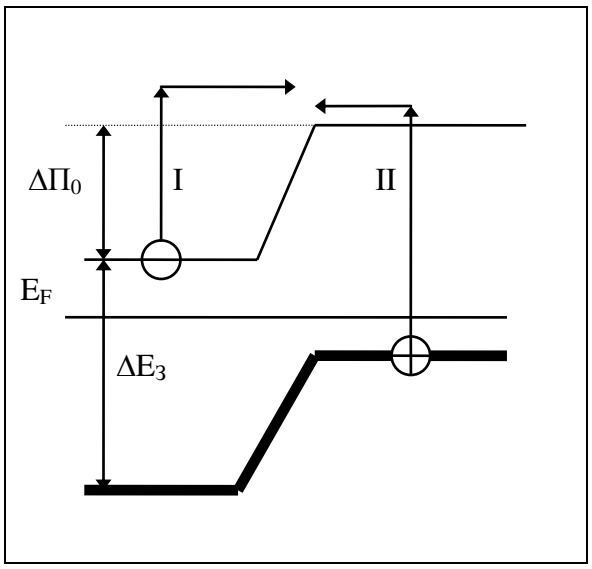


Рис.75.2а

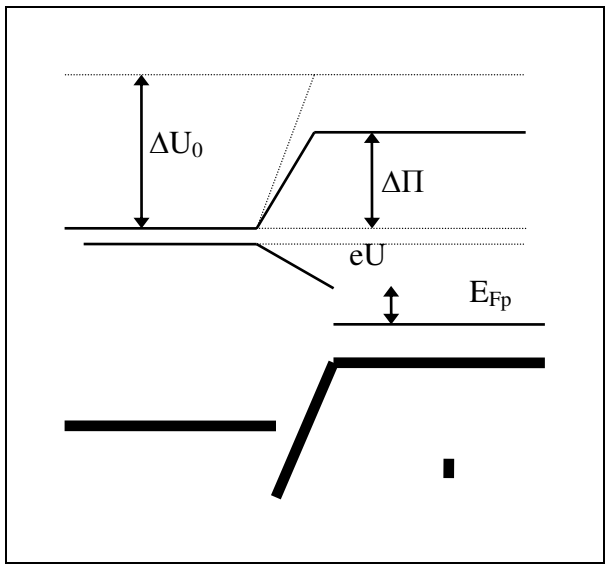


Рис.75.2б

Т.к. $\Delta\Pi_o \sim \Delta E_з$, то ток через переход равен нулю: $J = J_{осн} - J_{неосн} = 0.$ /4/

Здесь $\Delta\Pi_o$ - высота потенциального барьера на *p-n* переходе, $\Delta E_з$ - ширина запрещенной зоны. Выражения /2/, /3/ записаны с учетом связи концентрации носителей с вероятностью их перехода через энергетический барьер.

При возникновении фотоЭДС к равновесному току неосновных носителей $J_Ç$ /2/ прибавляется ток фотоэлектронов (рис.57.1а) и фотодырок (рис.57.1б $J_Ф$), пропорциональный световому потоку $J_Ф \sim Ф.$ /5/

Если толщина освещаемого слоя мала, а рекомбинацией электронов и дырок на пути к *p-n* переходу можно пренебречь, то и в этом случае $J_ô = e\dfrac{\Delta N_e}{\Delta t} \sim \dfrac{\Delta N_ф}{\Delta t} \sim Ф.$ /6/

Ток в цепи создает на нагрузке $r_н$ (рис.75.3) падение напряжения $U = J\, r_н,$ /7/ которое приложено к *p-n* переходу и уменьшает высоту потенциального барьера

$$\Delta\Pi = \Delta\Pi_o - eU \qquad /8/$$

и увеличивает ток основных носителей $J'_{осн} \sim e^{-\frac{\Delta\Pi_o - eU}{kT}}.$ /9/

Тогда ток в цепи равен: $J = J'_{осн} - J_{неосн} - J_ф \sim e^{-\frac{\Delta\Pi_o - eU}{kT}} - e^{-\frac{E_З}{kT}} - J_ф.$ /10/

С учетом $\Delta\Pi_o \sim \Delta E_з$ получим выражение для вольт-амперной характеристики фотогенератора:

$$J = J_З\left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right) - J_ф. \qquad /11/$$

С увеличением напряжения, приложенного к *p-n* переходу U, ток основных носителей возрастает и компенсирует фототок $J_ф$, что определяет вид графика этой функции. Проанализируем эту функцию.

При сопротивлении нагрузки, равном нулю, $r_н=0$ (короткое замыкание) $U = J_{К.З.} \times 0 = 0$, и

$$J_{К.З.} = -J_ф. \qquad /12/$$

Если цепь нагрузки разомкнута (режим холостого хода), ток равен нулю и напряжение на *p-n* переходе компенсирует фотоЭДС $J_З\left(e^{\frac{eU_{XX}}{kT}} - 1\right) = J_ф,$ /13/

откуда $$U_{XX} = -E_{\phi} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{J_{\phi}}{J_{з}} + 1\right).$$ /14/

Задавая величину светового потока Φ и напряжение U на *p-n* переходе в пределах $0 \le U \le U_{xx}$, можно вычислить и построить семейство вольтамперных характеристик, представленное на рис.75.3. Рис.75.3

Мощность на нагрузке фотогенератора $P_{н} = JU$. /15/

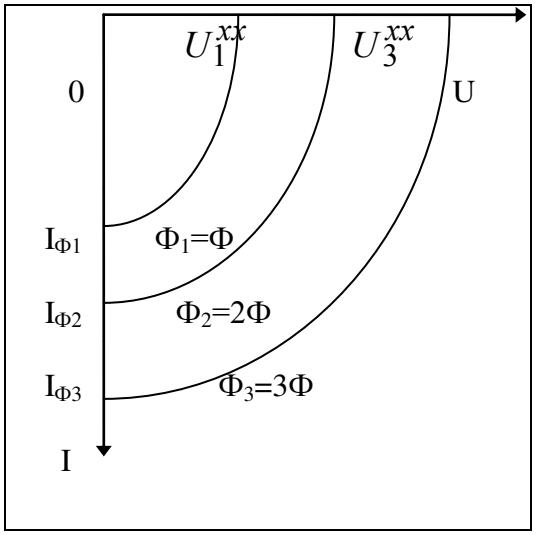
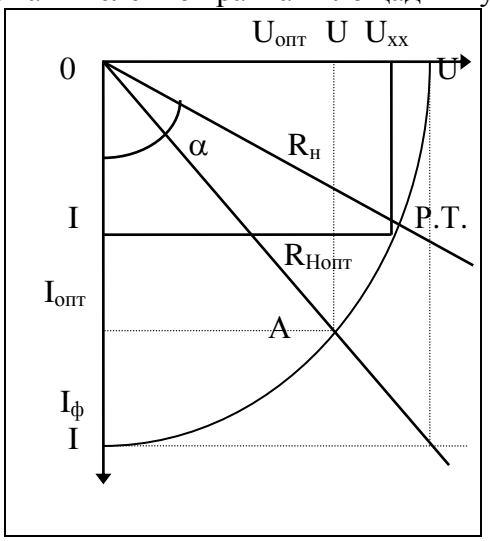


Рис.75.4



Она численно равна площади пунктирного прямоугольника на рис.75.4.

Сопротивление нагрузки равно:

$$R_H = U/J. \quad /16/$$

На вольтамперной характеристике сопротивление нагрузки определяется как тангенс угла между нагрузочной прямой, проведенной из начала координат в рабочую точку РТ, и осью токов.

Если нагрузочная прямая проходит параллельно оси напряжений (режим холостого хода $R_H = \infty$) или параллельно оси токов (режим короткого замыкания $R_H = 0$), то мощность на нагрузке равна нулю. Тогда существует оптимальное значение сопротивления нагрузки $R_H^{опт}$, при котором мощность на нагрузке выделяется максимальная $P_{\max}$.

В теории электрического тока показывалось, что $R_H^{опт} = R_i$ равно внутреннему сопротивлению источника. По закону Ома для замкнутой цепи

$$J = \frac{E}{R_H + R_i}, \quad /17/$$

и при $R_H = 0$ $$R_i = \frac{E}{J_{К.З.}} = \frac{U_{XX}}{J_{\phi}}. \quad /18/$$

Откуда $$R_H^{опт} = \frac{U_{XX}}{J_{\phi}}.$$

Режим работы фотогенератора будет оптимальным, когда рабочей точкой вольтамперной характеристики будет точка А $P_{\max} = U_{опт} \times J_{опт}$. /19/

Полная мощность фотогенератора равна: $P_{ПОЛН} = U_{XX} \times J_{К,З,}$ /20/

Коэффициент полезного действия цепи фотогенератора равен

$$\eta = \frac{P}{P_{ПОЛН}}, \quad /21/$$

так что $$\eta_{\max} = \frac{U_{опт} J_{опт}}{U_{XX} J_{КЗ}}. \quad /22/$$

Коэффициент полезного действия установки зависит от мощности подводимой лучистой энергии $\theta = \frac{\text{Р}}{\Ф}$. /23/

Он пропорционален η.

Схема установки для исследования фотогенератора показана на рис.75.5.

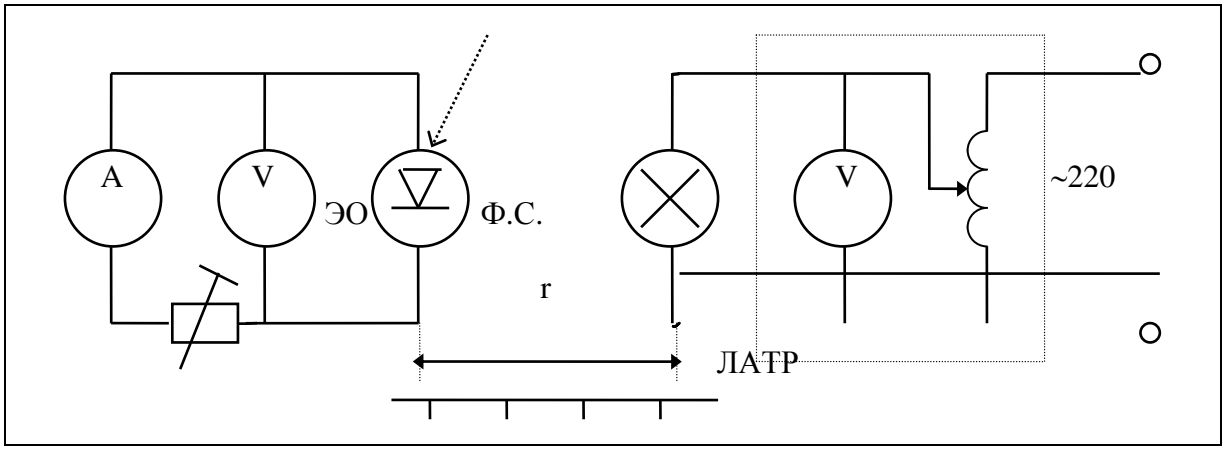


Рис.75.5

Нагрузкой солнечной батареи ФГ служит миллиамперметр *А* с сопротивлением R_A и магазин *R*. $R_{н=} R_A + R$. /24/

Сопротивление R_A вычисляется по максимальному падению напряжения на миллиамперметре (указано на шкале) и пределу измерения.

Напряжение на фотогенераторе *U* равно: $U=J R_н$, /25/

и измеряется электронным осциллографом ЭО. Световой поток $\Ф$ создает лампа *Л*, питаемая ЛАТРом с вольтметром. Световой поток можно изменять перемещением лампы *Л* при постоянном питающем напряжении лампы, т.к. $\Ф \sim r^{-2}$, либо оставляя неизменным расстояние от лампы до фотогенератора и изменением ЛАТРом напряжения питания с учетом графика зависимости силы света от напряжения питания.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему установки (рис.75.5).
2. При трех значениях светового потока $\Ф_1=\Ф$, $\Ф_2=2\Ф$, $\Ф_3=3\Ф$ измерить 6-8 значений силы тока *J* и напряжения на фотогенераторе. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 1. Построить вольтамперные характеристики фотогенератора. Способ изменения светового потока задается преподавателем.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 1

$\Ф_1=\Ф$,		$\Ф_2=2\Ф$,		$\Ф_3=3\Ф$		$\Ф_4=4\Ф$	
U,В	J,мА	U,В	J,мА	U,В	J,мА	U,В	J,мА

По указанию преподавателя выполнить одно из следующих заданий:

3. Вычислить полную мощность фотогенератора $P_{полн}$ по формуле /20/, максимальную мощность на нагрузке P_{max} по формуле /19/, коэффициент полезного действия цепи фотогенератора, работающего в оптимальном режиме по формуле /22/. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 2. Построить графики зависимостей $P_{полн}=f(\Ф)$, $P_{max}=f(\Ф)$, $\eta_{опт}=f(\Ф)$.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 2

Ф	$P_{полн}$,Вт	P_{max} ,Вт	$\eta_{опт}$,%	$J_ф$

4. По вольт-амперной характеристике вычислить мощность на нагрузке фотогенератора $P_н$ по формуле /15/ при различных $R_н$ по формуле /16/. Данные занести в таблицу результатов наблюдений 3. Построить график зависимости $P_н=f(R_н)$ и сформулировать условия оптимальной работы фотогенератора.
5. Определить по вольт-амперным характеристикам величину фототока $J_ф$ при различных значениях светового потока $Ф$. Построить график зависимости $J_ф=f(Ф)$. Проверить справедливость соотношения $J_ф \sim Ф$, вытекающего из /6/.
6. На семействе вольт-амперных характеристик построить ряд нагрузочных прямых, включая прямую, соответствующую $R_H = 0$ (режим короткого замыкания). Определить величины $R_н$ по формуле /16/ и тока через фотогенератор при различных значениях светового потока. Построить графики зависимостей $J=f(Ф)$ - люкс-амперные характеристики. Установить зависимость их вида от величины $R_н$..

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ 3

$R_н$, *Ом*	J,мА	U,В	$P_н$,*Вт*

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое фотоэффект? В чем состоит внутренний и внешний фотоэффект?
2. Из каких вкладов складывается ток через вентильный фотоэлемент?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику фотогенератора. Напишите ее аналитическое выражение. Чем объясняется вид вольт-амперной характеристики фотогенератора? Как она изменяется с увеличением светового потока, падающего на генератор?
4. Чему равен коэффициент полезного действия фотогенератора?
5. Сформулируйте оптимальные условия работы фотогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §202, 203, 204.
2. . Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.3. - §9.
3. Городецкий А.Ф. Полупроводниковые приборы /А.Ф. Городецкий, А.Ф. Кравченко - М.: Наука, 1966.
4. Бушманов В.Н. Физика твердого тела /В.Н. Бушманов, Ю.А Хромов - М.: Наука, 1971.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 76
ГРАДУИРОВКА СПЕКТРОСКОПА

Цель работы: ознакомление с видами спектроскопов, устройством спектроскопа и градуировка спектроскопа.

Приборы и материалы: спектроскоп, ртутная лампа, источник питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Излучение атомов обусловлено переходами в них электронов с одного энергетического уровня в другой. Набор спектральных линий (спектр) индивидуален для каждого химического элемента и зависит от состояния вещества.

Раскаленные газы, состоящие из атомов и ионов, излучают свет с линейчатым спектром. В таком спектре имеются отдельные монохроматические линии, разделенные темными промежутками, причем набор спектральных линий индивидуален для каждого химического элемента.

Раскаленные вещества, состоящие из отдельных молекул, излучают свет с полосатым спектром. Он представляет собой ряд полос, резких, четких со стороны коротковолнового края и размытых с противоположного.

Раскаленные твердые тела (например, нить лампы накаливания) излучают свет, при разложении которого получается сплошной или непрерывный спектр испускания.

Спектр поглощения можно получить, если пропустить свет со сплошным спектром через какую-либо среду. В этом случае излучение с длинной волны, соответствующей разрешенному переходу между уровнями энергии электронов взятого вещества избирательно поглощается и рассеивается взятым веществом и не поступает на экран (или измерительную трубу).

Изучение спектральных закономерностей требует разделения излучения

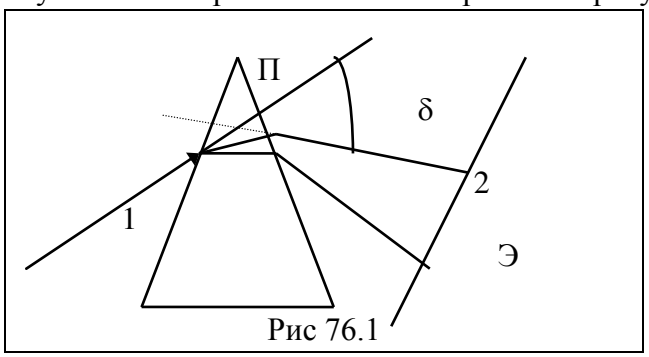


Рис 76.1

в пространстве по длинам волн. Для этой цели наряду с явлением дифракции используют явление дисперсии – зависимость показателя преломления среды от длины волны $n = f(\lambda)$. /1/

Абсолютным показателем преломления среды n называется отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде.

Явление дисперсии можно наблюдать, направляя свет на трехгранную призму *П*.

При нормальной дисперсии угол δ между продолжением падающего луча 1 и вышедшим из призмы лучом 2 увеличивается с уменьшением длины волны. Направляя на призму полихроматический (многоцветный) пучок света, мы увидим на экране *Э* (или в окуляре зрительной трубы) цветную полосу – спектр. В качестве спектроскопа используется диспергирующая система стилоскопа СЛ-11, оптическая схема которой представлена на рис.76.2. Источник света (1) (ртутная лампа) освещает щель (2), находящуюся в фокусе коллиматора (3).

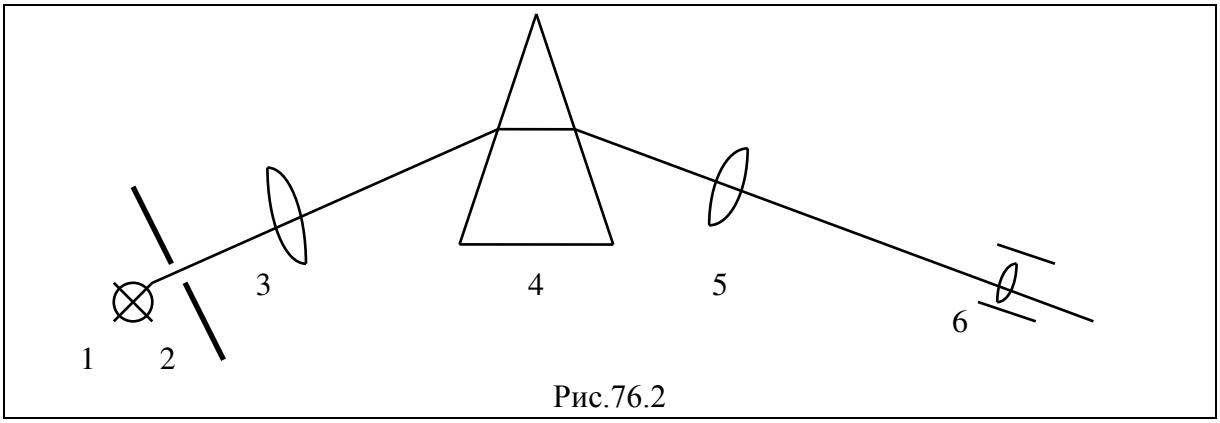


Рис.76.2

Свет параллельным пучком падает на призму (4). Из призмы лучи разных длин волн выходят под разными углами. Лучи одной

длины волны собираются линзой (5) в фокальной плоскости окуляра (6) в одной точке. В этой плоскости имеется прозрачное стекло – экран с указателем – визиром. Лучи одной длины волны дают изображение щели в виде узкой цветной полосы. Увеличенное изображение спектра создается окуляром (6). Вращением барабана поворачивается призма (4). При этом спектр смещается в поле зрения окуляра.

Задача студента состоит в градуировке спектроскопа – установлении зависимости между делением шкалы барабана и длиной волны. Для этой цели используется излучение ртутной или водородной лампы. Линейная дисперсия спектрального призменного прибора $\frac{d\ell}{d\lambda}$ пропорциональна дисперсии материала призмы

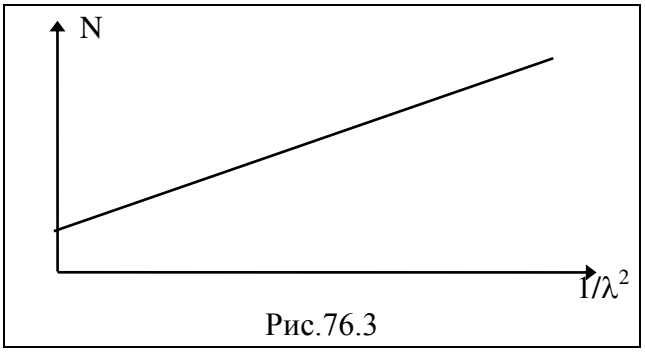


Рис.76.3

$$\frac{dn}{d\lambda}: \qquad \frac{d\ell}{d\lambda} = L\frac{dn}{d\lambda}, \qquad /2/$$

где коэффициент пропорциональности L зависит от конструкции прибора и призмы.

Согласно Коши зависимость $n = f(\lambda)$ имеет вид $n = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 + d/\lambda^6 + \ldots$ /3/

Тогда зависимость номера деления барабана *N* от длины волны достаточно хорошо описывается выражением

$$N = A + \frac{B}{\lambda^2}. \qquad /4/$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить в сеть 220 В блок питания лампы. Если лампа не загорается – переключить тумблер “пуск” на блоке питания. Дать лампе разогреться в течение 5…7 минут.
2. Отрегулировать яркость спектра малыми перемещениями лампы при одновременном наблюдении спектра в окуляр.
3. Отрегулировать резкость спектра вращением окуляра.
4. Пользуясь атласом спектра ртути или водорода, в котором длины волн указаны в нм, построить градуировочный график спектроскопа. Измерения номера деления, соответствующего линии напротив визира, провести 3…4 раза, подходя со стороны больших и меньших делений (больших и меньших длин волн). Измерения для ртути следует начинать с желтой области с дублета $\lambda = 5{,}794\times10^{-7}\,м$ и $\lambda = 5{,}771\times10^{-7}\,м$, а затем переходить в длинноволновую и коротковолновую области. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
5. По данным измерений *N* и λ построить градуировочный график спектроскопа.
6. По величинам *N* и рассчитанным значениям $1/\lambda^2$ построить график зависимости $N = f(1/\lambda^2)$ и убедиться в справедливости формулы /4/, вытекающей из формулы Коши /4/.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№п/п	Цвет линии	$\lambda, 10^{-7}\,м$	N	N	N	$N_{ср}$	$\lambda^{-2}, 10^{-13}\,м^{-2}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое абсолютный показатель преломления среды? Какова его размерность?
2. Что такое дисперсия света?
3. Каков вид зависимости показателя преломления среды от длины волны?
4. Какие виды спектров вы знаете?
5. Нарисуйте оптическую схему спектроскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §185, 180.

2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.2. §142.

3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф - М.: Наука, 1980, - §V.3.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 77
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Цель работы: изучить закономерности в линейчатых спектрах испускания и определить постоянную Ридберга.

Приборы и принадлежности: спектроскоп (монохроматор УМ-2), источник света (водородная трубка или натриевая лампа), источник питания.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Излучение атомов обусловлено переходами в них электронов с одного энергетического уровня в другой. Закономерности в атомных спектрах объяснил Н. Бор, сформулировавший следующие постулаты.

1. Электроны в атоме находятся в неизменных ”стационарных” состояниях, не теряя при своем движении энергии.

2. Испускание или поглощение энергии в виде светового кванта hv происходит путем перехода электрона с одного в другое устойчивое ”стационарное” состояние: $h\nu = E_m - E_n$. /1/

3. Момент импульса электрона на орбите является целым кратным числа $h/2\pi$

$$mVr = nh/2\pi, \text{ где n=1,2….} \qquad /2/$$

Из этих постулатов вытекает, что атомные спектры могут быть только линейчатыми, потому что у атома может быть лишь строго определенный набор значений энергии.

Если в первом приближении учитывать лишь кулоновскую энергию взаимодействия электрона с ядром атома, то для атомов и ионов, имеющих один электрон, энергия электрона определяется главным «квантовым числом», могущим принимать значения чисел натурального ряда n=1,2,3… Тогда длина волны λ излучения связана с главными квантовыми числами исходного и конечного энергетических уровней формулой Бальмера-Ридберга:

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \qquad /3/$$

где Z – заряд ядра (атомный номер); R- постоянная Ридберга

R=1,09678 $\times 10^7$ м$^{-1}$. В случае Z=1 формула описывает спектральные закономерности излучения атомарного водорода.

Учет других типов взаимодействия электронов в атоме (а следовательно, вкладов в энергию электрона) может быть сделан введением дополнительных квантовых чисел.

ℓ = 0, 1, 2, 3…n-1 - орбитальное квантовое число, определяющее форму (степень вытянутости) орбиты электрона.

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3... \pm \ell$ - азимутальное квантовое число, определяющее ориентацию орбиты в пространстве.

S = $\pm$ 1/2 - спиновое квантовое число, определяющее ориентацию собственного магнитного момента электрона в пространстве.

В зависимости от значения ℓ в спектроскопии состояния атомов обозначаются: nS – при ℓ=0; nP – при ℓ=1; nD – при ℓ=2; nF – при ℓ=3.

Разрешены такие переходы между энергетическими уровнями, при которых Δn -любое целое. Δn=1, 2, 3…, а $\Delta \ell = \pm 1$, т.е. разрешены $nS \leftrightarrow nP$, $nP \leftrightarrow nD$, $nD \leftrightarrow nF$, но не $nS \leftrightarrow nD$, $nP \leftrightarrow nF$ или $nS \leftrightarrow nF$.

Точный расчет энергий уровней электронов в многоэлектронных атомах представляет сложную теоретическую задачу. Однако в случае щелочных металлов Li, Na, K, Rb излучение в видимой области спектра определяется прежде всего переходами на другие энергетические уровни внешнего (оптического) электрона. При этом атом можно рассматривать, как и в случае водородоподобных атомов (ионов), состоящим из ядра, заряд которого уменьшен до Z=1 вследствие экранирования внутренними электронами. При этом вместо главного квантового числа n используется квантовое число $n-\gamma_\ell$, где γ_ℓ - постоянная экранирования, безразмерная величина, зависящая от формы (вытянутости) орбиты. Тогда энергия уровня определяется из выражения

$$E_{n,\ell}=\frac{Rhc}{(n-\gamma_\ell)^2}. \qquad /4/$$

Значения γ_ℓ для натрия указаны в таблице 1.

Таблица 1

ПОСТОЯННЫЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ДЛЯ НАТРИЯ

Состояние	*nS*	*nP*	*nD*	*nF*
ℓ	0	1	2	3
γ_ℓ	1,35	0,87	0,01	0,00

Из /4/ вытекает формула для длин волн спектральных серий щелочных металлов, аналогичная формуле Бальмера-Ридберга

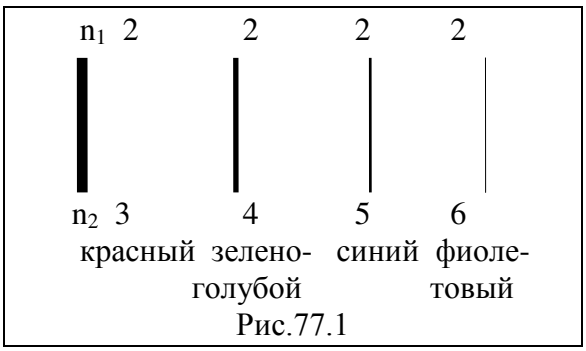


Рис.77.1

$$\frac{1}{\lambda}=R\left[\frac{1}{(n_1-\gamma_1)^2}-\frac{1}{(n_2-\gamma_2)^2}\right]. \qquad /5/$$

В оптическом диапазоне спектра атомарного водорода наблюдаются линии серии Бальмера с n_1=2 и n_2=3,4,5,6. На рис.77.1 указано относительное расположение по длинам волн и цвета этих линий. В оптическом диапазоне спектра натрия наблюдаются линии трех серий. Главная серия - $nP\to 3S$; наблюдается только головная линия серии $3P\to 3S$, а остальные линии располагаются в ультрафиолетовой области.

1. Резкая серия - $nS\to 3P$. Наблюдаются линии $5S\to 3P$, $6S\to 3P$, $7S\to 3P$, $8S\to 3P$.
2. Диффузная серия - $nD\to 3P$. Наблюдаются линии $4D\to 3P$, $5D\to 3P$, $6D\to 3P$ и $7D\to 3P$.

На рис.77.2 представлено расположение линий этих трех серий в спектре по длинам волн с указанием цветов.

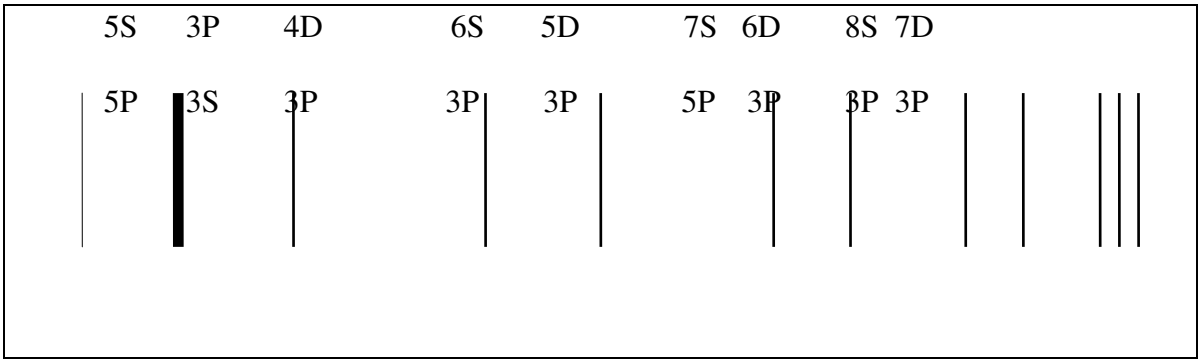


Рис.77.2

Экспериментальная установка включает источник света (водородную трубку или натриевую лампу), блок питания и монохроматор УМ-2. Оптическая система монохроматора (рис.77.3) состоит из конденсора (2), освещаемого источником (1), щели (3), коллиматора (4), призменной диспергирующей системы (5), объектива (6) и окуляра (7), в фокальной плоскости которого установлен визир (11). Ширина раскрытия щели регулируется барабаном (8), наведение цели на резкость - барабаном (9), поворот призменной системы - отсчетным маховиком с делениями (10), а наведение на резкость изображения спектра визира – вращением окуляра (7).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить источник питания в сеть 220 В, включить тумблеры «лампа» и «подсветка». Дать лампе прогреться 3-5 мин. до появления интенсивного свечения (голубого у водорода и желтого у натрия).
2. Наблюдая в окуляр монохроматора спектр источника, навести барабаном (9) щель на резкость. Навести на резкость изображение спектра и ножа-визира вращением барабана окуляра (7).
3. Вращая барабан (10), установить против визира линии спектра водорода (рис.77.1) или натрия (рис.77.2), определить номера *N* соответствующих делений барабана (10). Данные занести в таблицу результатов наблюдений.
4. По градуировочному графику $\lambda = f(N)$ определить длины волн спектральных линий.

По формулам /4/ для водорода или /5/ для натрия вычислить значение постоянной Ридберга. Рассчитать средние абсолютную и относительную погрешности измерения постоянной Ридберга, используя методические указания «Лабораторный практикум по физике. Введение в

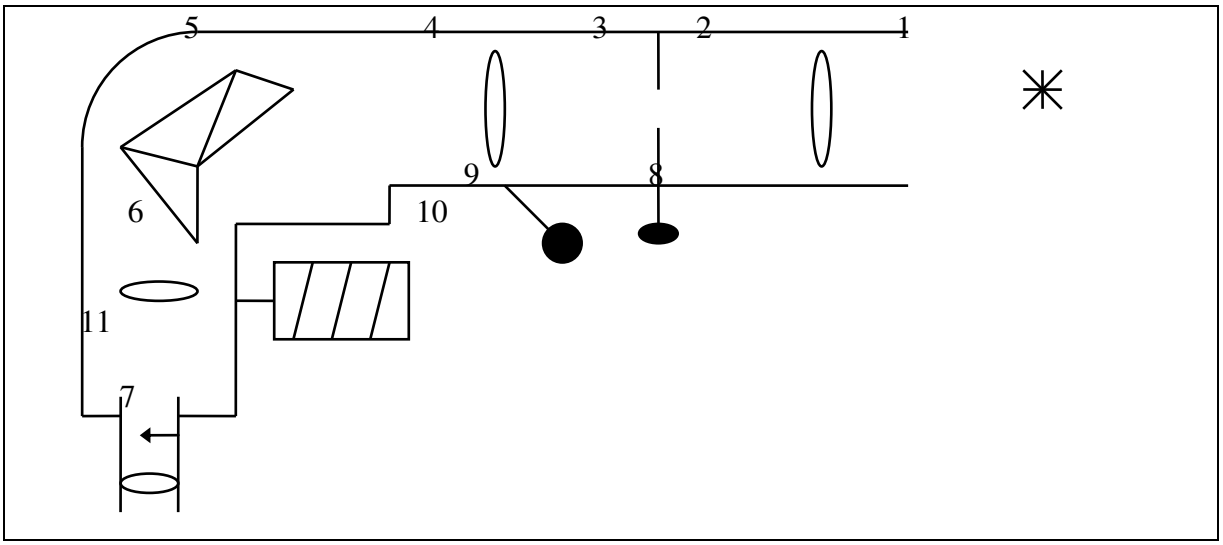


Рис.77.3

практикум», по формуле $$\Delta R = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum \Delta R_i^2}{n(n-1)}}.$$ /6/

Значение надежности выбрать α=0.95 или по заданию преподавателя.

α= , $t_{\alpha,n}$= . Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Цвет линий		λ, 10^{-7}м	Начальное состояние			Конечное состояние			R_i, 10^7м$^{-1}$	ΔR_i 10^7м$^{-1}$	ΔR_i 10^{14} м$^{-2}$
			n	γ	$1/(n-\gamma)^2$	n	γ	$1/(n-\gamma)^2$			

$R_{ср}=$ $R=(\quad \pm \quad)10^7\ м^{-1}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите модель атома Резерфорда.
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Почему спектр излучения уединенного атома линейчатый?
4. Выведите формулу Бальмера-Ридберга.
5. Каков физический смысл квантовых чисел?
6. Почему в случае щелочных металлов в формуле Бальмера-Ридберга вводят поправки? Каков их смысл?
7. Нарисуйте оптическую схему спектрографа.
8. Какую информацию об образце несут спектры атомов?
9. Что такое абсолютный и относительный показатели преломления среды?
10. Сформулируйте закон преломления.
11. Нарисуйте ход лучей в призме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §208, 209,210,212.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.3. - §12,17,28,29.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике /Б.М. Яворский, А.Л. Детлаф М.: Наука, 1980. - §VIII.1.1, VIII.1.2, VIII.1.3, VIII.1.4.
4. Лабораторный практикум по физике. Введение в практикум /Под ред. Н.Г. Леонтьева. – Зерноград: АЧГАА, 2002. - 35 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 78
ИЗУЧЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА β-ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВОМ

Цель работы: изучение явления ослабления излучения вещества и определение массового коэффициента поглощения β-частиц алюминием.

Приборы и материалы: высоковольтный выпрямитель, блок торцового счетчика, пересчетный блок, набор поглотителей – алюминиевых фольг.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При ядерных превращениях вещество излучает α –частицы (ядра атомов гелия), β – частицы (электроны), γ -лучи (жесткое электромагнитное излучение) и другие излучения. При прохождении через вещество они ослабляются.

Ослабление интенсивности потока β –частиц обусловлено потерями энергии при торможении и ионизации атомов, а также рассеянием на атомах. В первом приближении можно считать, что ослабление происходит по тому же закону, что и ослабление лучистой энергии (закону Бугера):

$$I = I_0 e^{-kT}, \qquad /1/$$

где I – интенсивность излучения после прохождения слоя толщиной; I_0 - исходная интенсивность; k - линейный коэффициент ослабления, численно равный толщине слоя, при котором интенсивность ослабляется в *e* раз. Линейный коэффициент ослабления зависит от плотности вещества, его атомного номера и от энергии β –частиц.

Массовый коэффициент поглощения $\mu = k/\rho$ /2/

не зависит от плотности и слабо зависит от атомного номера вещества, поэтому практически пользоваться μ удобнее. Массовый и линейный коэффициенты поглощения связаны

$$kx = \left(\frac{k}{\rho}\right)(kx) = \mu d\,, \qquad /3/$$

где *d* – поверхностная плотность вещества, численно равная массе вещества, приходящейся на единицу площади поверхности поглотителя. Обычно *d* измеряется не в $кг \times м^{-2}$, а в $г \times см^{-2}$, $мг \times см^{-2}$.

Вместо интенсивности при оценке ослабления излучения веществом, используют скорость счета – количество импульсов, зарегистрированных в единицу времени: $n = \frac{N}{t}$. /4/

Если энергетический спектр потока β –частиц мало зависит от толщины поглотителя (его поверхностной плотности), то для скоростей счета *n* также справедливо соотношение

$$n = n_o e^{-kX} = n_o e^{-\mu d}. \qquad /5/$$

Вид этой зависимости представлен на рис.78.1 Если в потоке имеются частицы различных энергий, то несколько таких зависимостей накладываются друг на друга и изменяется суммарная скорость счета. Определение μ в этом случае затруднительно.

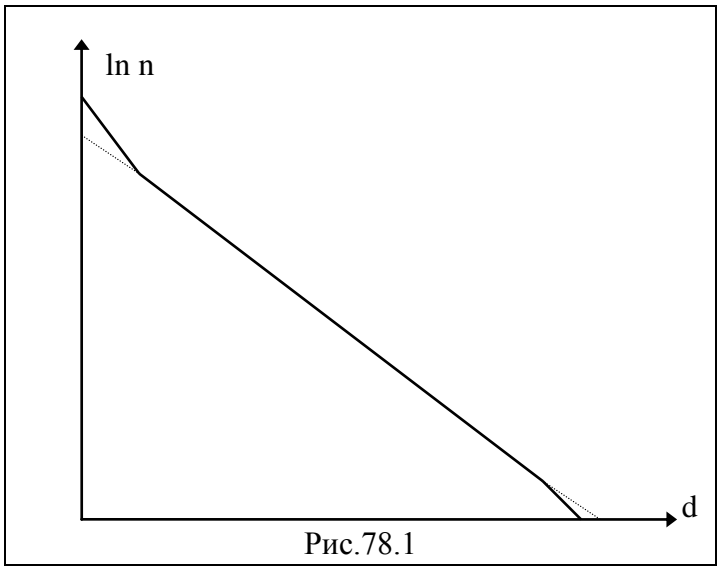


Рис.78.1

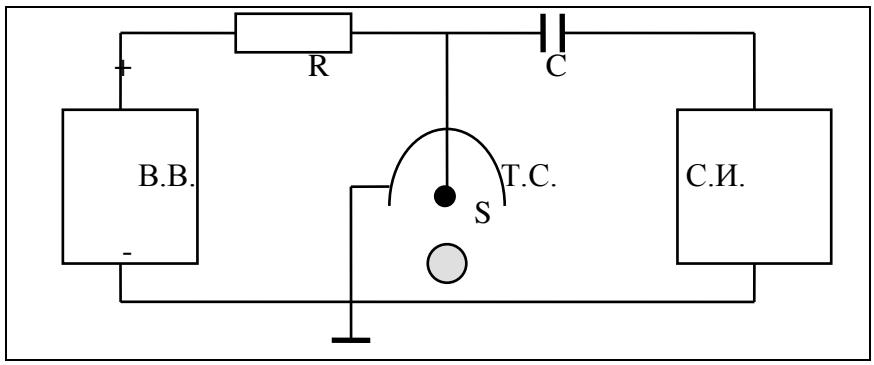
Для моноэнергетического потока в случае средних значений толщины поглотителя, можно считать

$$\ln n = \ln n_0 - \mu d\,. \qquad /6/$$

Откуда $\mu = \frac{\ln n_1 - \ln n_2}{d_2 - d_1}$. /7/

Кроме массового коэффициента поглощения для характеристики ослабления излучения применяют $d_{1/2}$ - толщину слоя половинного поглощения

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0{,}693}{\mu}. \qquad /8/$$



Кроме собственного излучения источника в счетчик попадают ионизирующие частицы из космоса и окружающих тел, в которых всегда присутствуют радиоактивные микропримеси. Эти посторонние ионизирующие частицы образуют фоновое излучение, так что

$$n_{изм} = n_{ист} - n_{ф}. \qquad /9/$$

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис.78.2. От источника *S* β-излучение попадает в торцовый счетчик Т.С., питаемый высоковольтным выпрямителем В.В. Импульсы напряжения через *RC* - цепочку попадают на счетчик импульсов С.И.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить в сеть ~ 220 В высоковольтный выпрямитель В.В. и счетчик импульсов С.И. Включить тумблер ”сеть” на В.В. и кнопку “сеть” на С.И.

2. Поместить источник β-излучения в блок счетчика. На пульте С.И. должны быть нажаты кнопки “N”, ”экспозиция 100с”, ”полярность сигнала” ”–”.

3. После прогрева ВВ на его вольтметре должно стоять напряжение U_1+100В. Его величина указана на приборе. В случае необходимости регулировать напряжение на счетчике Т.С. ручками “высокое грубо” и “высокое плавно”. Полярность напряжения на В.В. устанавливается ручкой “полярность” в положении “+”. При этом после нажатия кнопки “пуск” на С.И. на его индикаторе периодически высвечивается количество сосчитанных импульсов, которое должно быть $N \sim 10^3$. Их количество регулируется изменением времени счета (нажатием других кнопок “время счета t_C”).

4. Вынуть β-источник из блока счетчика Т.С., нажать кнопку пуск и 5…10 раз фиксировать количество импульсов соответствующих фоновому излучению $N_ф$.

5. Поместить источник β-излучения в блок счетчика, в его нижней части. Между источником *S* и счетчиком Т.С. поместить две фольги и считать полученную интенсивность $J=J_o$, когда $d=0$. Это необходимо для гашения интенсивности посторонней слабо проникающей компоненты α-излучения. Нажать кнопки последовательно “стоп”, “сброс”, и “пуск” на пульте С.И. и фиксировать 5…10 раз количество импульсов.

6. Добавлять по 1…2 листа фольги, фиксируя поверхностную плотность *d* и 5…10 раз количество импульсов *N*. Всего с источником сосчитывать интенсивность для 6…10 значений поверхностной плотности. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№	d,г/см^2	N имп	t,	$n_{изм}$	$N_{испр}$	ln
Фон	0					

7. Рассчитать величины $n_ф$ и $n_{изм.}$ по формуле /4/, $n_{ист.}$ по /9/ и ln $n_{ист.}$.

8. Построить график зависимости $\ln n = f(d)$ и убедиться в его линейности.

9. По двум точкам на графике зависимости $\ln n = f(d)$ определить значение массового коэффициента поглощения μ.

10. Рассчитать толщину слоя половинного поглощения $d_{1/2}$ по формуле /8/.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон ослабления излучения веществом.
2. Что такое линейный и массовый коэффициенты ослабления излучения веществом? Как они связаны? В каких единицах они измеряются?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §253, 254,255,256.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.3, - §66-70.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 79
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛ

Цель работы: изучение закона поглощения света Бугера и определение коэффициента поглощения стекла, полиэтилена и других материалов, используемых в сельскохозяйственном производстве.

Приборы и принадлежности: источник света, набор прозрачных веществ (стеклянных пластин, полиэтиленовых пленок и т.д.), люксметр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При прохождении света сквозь какую-либо среду имеют место явления отражения, преломления и поглощение, обусловленное превращением энергии электромагнитной волны во внутреннюю тепловую энергию вещества и другие виды энергии (энергию вторичного излучения в других направлениях (рассеяния) и энергию, связанную с изменением спектрального состава излучения). В результате поглощения интенсивность света I при прохождении через вещество уменьшается.

Интенсивностью света (излучательностью) называется отношение энергии W, переносимой светом через поверхность S, перпендикулярную световому лучу, за время t, ко времени переноса и площади этой поверхности $$I = W/St. \qquad /1/$$

Размерность интенсивности в системе СИ [I] = Дж/м^2 с = Вт/м^2.

Пусть параллельный пучок монохроматических лучей падает на пластину поглощающего вещества перпендикулярно поверхности пластины (рис.79.1).

Выделим внутри пластины бесконечно тонкий слой dx, находящийся на расстоянии x от ее поверхности, на которую падает свет. Согласно закону Бугера в дифференциальной форме, уменьшение интенсивности dI_X света, происходящее в слое в связи с поглощением, пропорционально толщине этого слоя dx и интенсивности света I_X, падающего на слой: $dI_X = -\alpha I_X dx$, /2/

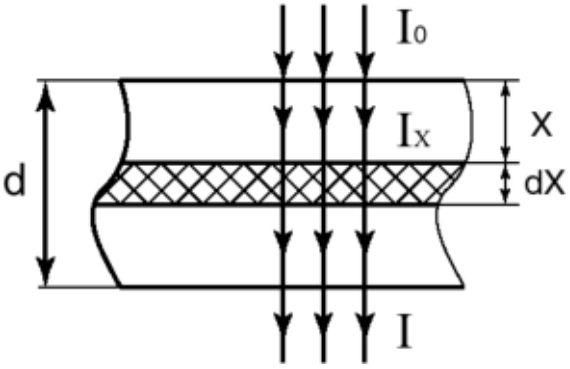


Рис79.1

где α - коэффициент поглощения, зависящий от длины волны света, химической природы и состояния вещества, длины волны излучения и не зависящий от интенсивности света. Знак минус (-) указывает на ослабление света в слое dx $(dI_X < 0)$.

Перенесем I_X в левую часть /2/ и проинтегрируем полученное выражение по всей толщине d пластины с учетом того, что при $x = 0$ интенсивность света, падающего на пластину, равна I_0, а при $x = d$ интенсивность света, прошедшего пластину, равна I. $$\int_{I_X}^{I} \frac{dI_X}{I_X} = -\alpha \int_0^d dx. \qquad /3/$$

Тогда $$\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha d \qquad /4/$$

и получим закон Бугера поглощения света в интегральной форме $$I = I_0 e^{-\alpha d}. \qquad /5/$$

Коэффициент поглощения α численно равен обратной величине толщины слоя вещества, при прохождении которого интенсивность света уменьшается в e раз, где e=2,7183 - основание натуральных логарифмов. Размерность коэффициента поглощения в системе СИ [α]=м$^{-1}$.

Как известно из законов фотометрии, световой поток Φ прямо пропорционален интенсивности света $\Phi \approx I$, освещенность поверхности прямо пропорциональна световому потоку

$\Phi \approx E$. Тогда освещенность фотогенератора при помещении на пути света поглощающего вещества E связана с освещенностью фотогенератора в отсутствии на пути света поглощающего вещества E_0 выражением $$E = E_0 e^{-\alpha d} \qquad /6/$$

или $$\ln E = \ln E_0 - \alpha d . \qquad /7/$$

В лабораторной работе для измерения коэффициента поглощения прозрачных материалов, применяемых в сельском хозяйстве (стекла, полиэтилена и т.п.) используется установка, схема которой представлена на рис.79.2. Свет от источника (1) проходит через набор прозрачных пластин известной толщины, помещенных в кассеты (2), и падает на фотогенератор люксметра (3). Измерение освещенности производится микроамперметром люксметра (4), отградуированным в люксах.

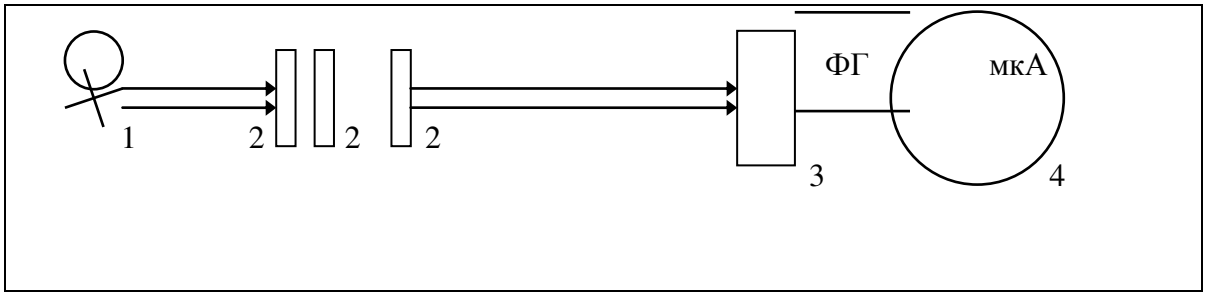


Рис.79.2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить в сеть 220 В источник света - лампу накаливания мощностью 60-100 Вт .
2. Подключить фотогенератор (3) к микроамперметру люксметра (4).
3. Снять защитную крышку фотогенератора и измерить максимальное значение освещенности E_0 для данной осветительной лампы в отсутствие

поглотителей. Предел измерения микроамперметра выбирается так, чтобы отклонение стрелки при измерении E_0 было максимальным.

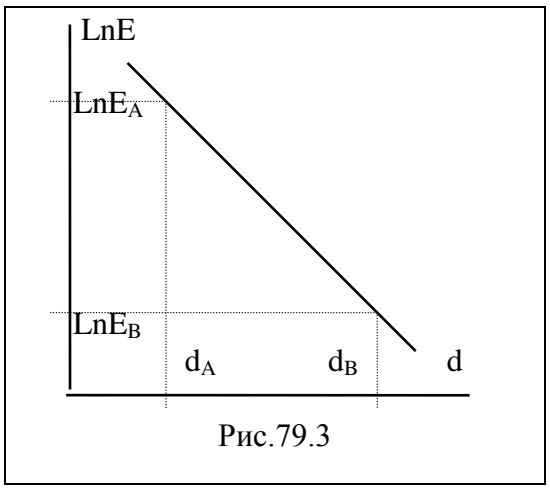


Рис.79.3

4. Между источником света и фотогенератором поместить кассету с пластиной прозрачного вещества известной толщины d_0 (вещества - полиэтиленовая пленка, оконное стекло, используемые в теплицах и т.д.). Толщина пластины d_0 задается преподавателем.

Измерить значение освещенности E_1, соответствующее толщине поглотителя (пластины прозрачного вещества) $d_1 = 1 * d_0$. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

5. Помещая новые кассеты с пластинами, измерять значения освещенности E_n, соответствующее толщине поглотителя $d_n = n * d_0$. Ко личество измерений указывается преподавате лем. Данные занести в таблицу результатов наблюдений.

6. По полученным результатам построить график зависимости $\ln E = f(d)$. Вид графика представлен на рис.79.3. Определить по графику координаты его двух возможно более удаленных точек и рассчитать значение коэффициента поглощения вещества по формуле

$$\alpha = \frac{\ln E_A - \ln E_B}{d_B - d_A} . \qquad /8/$$

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

№ измерения	Толщина поглотителя d_n, 10^{-3}м	Освещенность E_n, лк	$\ln E_n$
0	0		
1			
2			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите формулу и сформулируйте закон Бугера в дифференциальной форме.
2. Дайте определение коэффициента поглощения. Укажите размерность коэффициента поглощения
3. От каких факторов зависит коэффициент поглощения.
4. Выведите закон Бугера в интегральной форме.
5. Объясните природу поглощения электромагнитных световых волн металлами и диэлектриками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики /Т.И. Трофимова - М.: ВШ, 1985. - §261.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев - М.: Наука, 1987, Т.3, - §75.
3. Иверонова В.И. Физический практикум /В.И. Иверонова. - М.: Физматгиз, 1962.

Таблицы физических величин

Таблица 1. Физические постоянные (константы).

Физическая постоянная	Обозначение	Значение постоянной
Элементарный заряд (электрона)	e	$1{,}60218\cdot10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}10939\cdot10^{-31}$ кг=$5{,}48580\ 10^{-4}$ а.е.м.
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}67493\cdot10^{-27}$ кг=1,008665 а.е.м.
Масса покоя протона	m_p	$1{,}6726210^{-27}$ кг=1,007276 а.е.м.
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792\ 10^{8}$ м/с
Постоянная Больцмана	k	$1{,}38066\cdot10^{-23}$ Дж/К
Газовая постоянная (молярная)	R	8,31451 Дж/(моль·К)
Гравитационная постоянная	G	$6{,}67260\ 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2
Постоянная Планка	h	$6{,}62608\cdot10^{-34}$ Дж·с
Абсолютный нуль температуры	T_0	0К=-273,15 ^{0}С
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}02214\cdot10^{26}$кг·моль$^{-1}$
Число Лошмидта	N_L	$2{,}68676\ 10^{25}$ м$^{-3}$
Нормальный молярный объём	$V_н$	22,41383 м^3/моль
Постоянная Вина	b	$2{,}89776\cdot10^{-3}$м·К
Постоянная Стефана-Больцмана	o	$5{,}67051\cdot10^{-8}$ Вт/(м^2 К)
Постоянная Ридберга	R	109737310^{-1}
Ускорение свободного падения	g	9,80665 м/с^2
Электрическая постоянная	ε	$8{,}85419\ 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ	$1{,}2566370\ 10^{-6}$ Гн/м
Число Фарадея	F	$9{,}648456\ 10^{4}$ Кл/моль
Атомная единица массы	а.е.м.	$1{,}66054\ 10^{-27}$ кг
Радиус ядра водорода		$1{,}45\ 10^{-15}$ А м.

Таблица 2. Характеристики Солнца, Земли, Луны

Физические параметры	Солнце	Земля	Луна
Радиус (по экватору) км	696000	6378,3	1738
Средняя плотность, кг/м^3	1390	5518	3350
Расстояние до Земли (среднее),км.	149,46 10^6		384440
Масса, кг	1,984 10^{30}	5,976 10^{24}	7,35 10^{22}
Период вращения вокруг оси		23ч.56м.4,1 с.	

МЕХАНИКА

Таблица 3. Коэффициент сухого трения качения.

Материалы	μ 10^{-4} м
Автомоб. шина легковая /грунт	5
Автомоб. шина легковая /асфальт	1,5
Автомоб. шина грузовая /мостовая	4
Автомоб. шина грузовая / асфальт	2,5

Таблица 4. Коэффициент трения покоя и трения скольжения μ_0 и μ

Материалы	Трение покоя μ_0	Трение скольжение μ		
		сухое	со смазкой	с водяной смазкой
Сталь/сталь	0,15	0,03-0,09	0,01	0,25
Сталь/железо		0,19		
Сталь/лед				0,02-0,03
Металл /металл		0,15-0,20	0,15-0,20	
Металл/дерево	0,5…0,6	0,4-0,5	0,03-0,08	0,25
Дерево/дерево	0,65	0,20-0,50	0,1	0,25
Шина автомоб./асфальт	0,55	0,50-0,70	0,15	0,35-0,45
Шина автомоб./грунт		0,40-0,60		
Шина автомоб./лед		0,15-0,20		
Подшипник скольжения			0,02-0,08	

Таблица 5. Ускорение свободного падения на различных широтах на уровне моря g, 10^{-2} м/с^2

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

Нормальное значение ускорения свободного падения g Земли, м/с^2. 9,80665

Формула для вычисления ускорения силы тяжести в любом месте Земли:

g =980,616-2,5928 cos (2*широта)+0,0068 cos^2 (2*широта)-0,0003 (высота м).

Таблица 6. Упругие постоянные твёрдых веществ

Модуль Юнга E, модуль сдвига G, отношение Пуассона μ.

Упругие константы материала зависят от технологии обработки. Приводимые значения приближённые.

Вещество	E, 10^{10} Н/м^2	G, 10^{10} Н/м^2	μ
Алюминий	7,05	2,63	0,345
Дюралюминий	7,0	2,6	0,31
Железо	21,2	8,2	0,29
Сталь	20,9	8,12	0,293
Сталь литая (отпущенная)	20,0 (22,0)	7,5 (8,0)	0,28
Стали легированные	21,0-22,0		
Стали углеродистые	20,0-21,0		
Медь	12,98	4,83	0,34
Латунь	9,7-10,2	3,5	0,34-0,40

Таблица 7. Скорость звука в воздухе

Температура	v, м/с	dv/dT м/с К
20	331,36	0,54

Зависимость скорости звука в воздухе от температуры t: 331,36+0,54t

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Таблица 8. Плотность ρ при 20^0C, температурные коэффициенты линейного α и объемного β расширения (при 0-100^0C) веществ и материалов

Вещество, материал	ρ, 10^3 кг/м^3	α, 10^{-5} ^{0}C^{-1}	β, 10^{-5} ^{0}C^{-1}
Алюминий	2,71	2,38	
Дюралюминий (95%Al,4%Cu)	2,79	2,26	
Железо кованое	7,874	1,19	
Железо литое	7,85	1,02	
Чугун	7,6	1,00	
Сталь углеродистая	7,85	1,17	
Сталь нержавеющая	7,70-7,90	1,06-1,60	
Медь	8,96	1,66	
Латунь	8,30-8,70	1,84	
Бронза (80%Cu, 20%Sn)		1,75	
Титан	4,5		
Свинец	11,350	2,90	
Лёд	0,917		
Кирпич (при t=20^0C)		0,3-0,9	
Гравий(насыпная)	1,50-1,70		
Земля сухая(насыпная)	1,40-1,60		
Песок сухой(насыпная)	1,20-1,65		
Кварцевое стекло	0,6	0,6	
Стекло лабораторное		0,79-0,85	
Стекло оконное (20-200^0C)		1,0	
Фарфор		0,25-0,40	
Масло касторовое	0,960		
Трансформаторное масло	0,884.		
Керосин	0,800		96,0
Бензин			100-124
Этиловый спирт	0,789-0,791		108
Ацетон			143

Таблица 9. Коэффициент линейного расширения α ,10^{-6} $К^{-1}$

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

Таблица 10. Плотность дистиллированной воды при различных температурах

t, ^{0}C	T, К	ρ, 10^3 кг/м^3	t, ^{0}C	T, К	ρ, 10^3 кг/м^3
-10	263	0,998150	24	297	0,997299
-5	268	0,999300	25	298	0,997047
0	273	0,999841	26	299	0,996785
1	274	0,999901	27	300	0,996515
2	275	0,999941	28	301	0,996235
3	276	0,999965	29	302	0,995946
4	277	0,999973	30	303	0,995649
5	278	0,999965	31	304	0,99537
6	279	0,999941	32	305	0,99505
7	280	0,999902	33	306	0,99472
8	281	0,999849	34	307	0,99440
9	282	0,999782	35	308	0,99406
10	283	0,999701	40	313	0,992210
11	284	0,999606	50	323	0,98804
12	285	0,999498	60	333	0,98231
13	286	0,999377	70	343	0,97779
14	287	0,999244	80	353	0,97180
15	288	0,999099	90	363	0,96531
16	289	0,998943	100	373	0,95835
17	290	0,998775	150	423	0,9173
18	291	0,998596	200	473	0,8628
19	292	0,998406	250	523	0,794
20	293	0,998205	300	573	0,810
21	294	0,997994	350	623	0,574
22	295	0,997772	374,15	647,15	0,307
23	296	0,997540			

Таблица 11.Зависимость плотности этилового спирта от температуры

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

Таблица 12. Удельная теплоёмкость воды и скорость звука в воде при различных температурах

t, ^{0}C	c, 10^3 Дж/кг К	v, м/с	t, ^{0}C	c, 10^3 Дж/кг К	v, м/с
0	4,2174	1407	60	4,1841	1556
10	4,1919	1445	70	4,1893	1561
20	4,1816	1484	80	4,1961	1557
30	4,1782	1510	90	4,2048	
40	4,1783	1528	99	4,2145	
50	4,1804	1544			

Таблица 13. Удельная теплоёмкость веществ c, температура плавления $t_{пл}$ удельная теплота плавления λ, температура кипения t_k, удельная теплота парообразования L, (давление 101,3 кПа)

Вещество	t, ^{0}C	c, 10^3 Дж/(кг·К)	$t_{пл}$, ^{0}C	λ 10^3 Дж/кг	t_k, ^{0}C	L, 10^3 Дж/кг
Алюминий	20	0,896	660,1	322-394	2330	9220
Алюминий	0-200	0,92				
Железо чистое	0-100	0,465	1537	270-293	2450	6300
Железо	100-500	0,54				
Сталь 0,07-0,25% C	0-300	0,46-0,50	1350	205		
Чугун	20	0,540				
Медь	0-500	0,385	1084,5	213	2360	5410
Латунь (60%Cu, 40%Ni)	20	0,385				
Вода	20	4,19	0	333,7	100	2256
Вода	0					2500
Лёд	-40 ... 0	2,10	0	333,7		
Золото	20		1063	65,7	2700	1650
Серебро	20		960,8	104,5		
Цинк	20		419,5	111	908	
Свинец	20-100		327,3	23,0	1750	8600
Никель	15-100		1453	203	2800	6480
Стекло	20	0,67-0,84				
Фарфор	20	1,10				
Бетон	18	0,92				
Глицерин	0-100	2,43				
Керосин.	0-100	2,09				
Спирт этиловый	20	2,43-2,47	-114	66,6	78,3	846

Таблица 14. Температура кипения воды при различных барометрических давлениях вблизи нормального давления

P, мм.рт.ст.	t, ^{0}C	P, мм.рт.ст.	t, ^{0}C	P, мм.рт.ст.	t, ^{0}C
680	96,9138	725	98,6846	770	100,3666
685	96,1153	730	98,8757	775	100,5484
690	97,3156	735	99,0657	780	100,7293
695	97,5146	740	99,2547	785	100,9092
700	97,7125	745	99,4426	790	101,0881
705	97,9072	750	99,6294	795	101,2661
710	98,1048	755	99,8152	799	101,4079
715	98,2992	760	100,0000		
720	98,4925	765	100,1838		

Зависимость точка кипения воды давления $t_p = 100+0{,}0367\ (p-760)-2{,}3\ 10^{-5}\ (p-760)^2$

Таблица 15. Удельная теплота сгорания q различных видов топлива

Топливо	q, МДж/кг	Топливо	q, МДж/кг
Каменный уголь	26,8-31,4	Керосин	44-46
Дрова -сухие	8,4-11	Нефть	43,5-46
Бензин	44-47	Газ природный	41-50
Дизельное	42,7		

Таблица 16. Температура кипения воды $t_{кип}$ при низких давлениях

p	t,^{0}C	p	t,^{0}C	p	t,^{0}C
кПа		кПа		кПа	
0,6	0	53,7	83	147,1	110,79
0,981	6,698	58,84	85,45	196,1	119,62
1,2	10	68,65	89,45	245,2	126,79
1,961	17,20	70,1	90	294,2	132,88
2,3	20	78,45	92,99	392,3	142,92
3,923	28,64	84,5	95	490,3	151,11
4,2	30	88,26	96,18	588,4	158,08
7,4	40	90,7	96,9	686,5	164,17
9,807	45,45	93,3	97,7	784,5	169,61
12,3	50	94,7	98,1	882,6	174,53
19,61	59,67	96,0	98,5	980,7	179,04
29,42	68,68	97,3	98,9	1961	211,38
31,1	70	98,7	99,3	2452	222,90
38,5	75	100,0	99,6	4903	262,70
39,23	75,42	98,07	99,09	9807	309,53
49,03	80,86	101,325	100,00		

Таблица 17. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей σ, мН/м

Вещество	0^{0}C	10^{0}C	20^{0}C	30^{0}C	40^{0}C	50^{0}C	60^{0}C
Ацетон CH_3COCH_3	25,21	25,0	23,32	22,01	21,16	19,9	18,61
Керосин	28,9		24				
Глицерин			59,4				
Масло касторовое			36,4				
Масло оливковое			33,06				
Спирт метиловый			22,6				
Спирт пропиловый			23,8				

Таблица 18. Коэффициент поверхностного натяжения воды и этилового спирта при различных температурах

Вещество	t ^{0}C	0	5	10	15	20	25
Вода	σ10^{-3} н/м	75,60	74,83	74,22	73,33	72,71	71,81
Спирт этиловый	σ10^{-3} н/м	24,22		23,14		22,32	
	t ^{0}C	30	35	40	45	50	60
Вода	σ10^{-3} н/м	71,17	70,29	69,55	68,60	67,91	66,18
Спирт этиловый	σ10^{-3} н/м	21,70		20,60		19,80	19,10
	t ^{0}C	70	80	90	100	120	150
Вода	σ10^{-3} н/м	64,42	62,61	60,75	58,85	54,9	48,63
Спирт этиловый	σ10^{-3} н/м			16,4		13,4	10,1
	t ^{0}C	180	210	240	300	370	
Вода	σ10^{-3} н/м	42,25	35,4	28,57	14,40	0,47	
Спирт этиловый	σ10^{-3} н/м	6,7	3,3	0,1			

Таблица 19. Увеличение поверхностного натяжения воды при добавлении солей
Для каждого *г* без водной соли на 100 см^3 воды следует прибавить к значению для дистиллированной воды:

$CaCl_2$	$CuSO_4$	KCl	KOH	NaCl	NaOH	NH_4Cl
0,29	0,11	0,19	0,35	0,28	0,50	0,26

Скорость поднятия воды по капиллярам стебля подсолнечника - 0,70 м/ч.

Таблица 20. Вязкость жидкостей и газов

Вещество	t, ^{0}C	$\eta\,10^{-5}$ пуаз
Глицерин	18	139,3
Глицерин	20	83 10^4
Азот	20	18,4
Воздух	20	18,1
Кислород	20	20,9

Таблица 21. Зависимость вязкости (коэффициента внутреннего трения) касторового и трансформаторного масел от температуры. (η, 10^{-2} Па с)

Жидкость	t, ^{0}C					
	5	10	15	20	25	30
Касторовое масло	376	243	151	98,7	62,1	45,3
Трансформаторное масло		4,2		1,87	2,55	1,34
	35	40	50	70	90	100
Касторовое масло	31,2	23,1	12,9	4,9		1,69
Трансформаторное масло			0,64	0,375	0,26	0,213

Таблица 22. Вязкость воздуха при различных давлениях (η, 10^{-4} Па с)

Температура t, ^{0}C	P, 10^5 Па				
	1,0	5,07	10,1	30,4	81,0
0 25 100	1,72	18,2 19,2 22,4	19,7 20,6 23,4	28,6 28,0 28,1	

Таблица 23. Вязкость воздуха при различных температурах (давление 10^5Па)

t,^{0}C	η,10^{-5} Па с	t,^{0}C	η,10^{-5} Па с	t,^{0}C	η,10^{-5} Па с
-183,1	6,27	18	18,27	409	34,13
-104,0	11,30	40	19,04	620	39,16
-69,4	13,33	54	19,58	810	44,19
-31,6	15,39	74	21,02	1034	49,06
0	17,08	229	26,38		

Таблица 24. Газокинетические диаметры молекул

Вещество	d, 10^{-9} м	Вещество	d, 10^{-9} м
Азот	0,37	Метан	0,444
Аргон	0,36	Неон	0,354
Водород	0,27	Окись углерода	0,370
Гелий	0,215	Ртуть	0,30
Кислород	0,356	Углекислый газ	0,454
Криптон	0,314	Хлор	0,544

Таблица 25. Электроизолирующие материалы

Диэлектрическая проницаемость ε, напряжённость пробивного электрического поля $E_п$, плотность ρ', удельное сопротивление ρ веществ (при 20 ^{0}C)

Материал	t ^{o}C	ε	$E_п$, 10^6 В/м	ρ', 10^3 кг/м^3	ρ, Ом м
Воздух		1,0006			
Бумага	18	2-2,5			
Карболит			10-14,5	1,2-1,3	
Текстолит					10^8-10^9
Плексиглас		3,0-3,9	18,5	1,2	10^{11}-10^{13}
Гетинакс		3,5-6,5			
Полистирол		2,2-2,8	25-50	1,05-1,65	510^{13}-510^{15}
Полиэтилен		2,7-3,5			10^{12}-10^{14}
Слюда	18	4,5-8	50-200	2,3-3,2	10^{13}-10^{16}
Кварц					1-3 10^{16}
Стекло		5-10	30-150	2,2-4,0	10^6-10^{15}
Фторопласт		2,5-2,7		2,14	1,2 10^{16}
Эбонит		2,5-4,5	25-100	1,3	2 10^{16}
Янтарь		2,7-2,9	20-30	1,06-1,11	5 10^{18}
Резина		2,2-3,0	16-40		10^{13}
Парафин	20	2,0-2,5	15-50		10^{14}-10^{18}
Фарфор	18	4,4-6,8			7 10^{12}-4 10^{13}
Титанат бария	20	1200			

Таблица 26. Диэлектрическая проницаемость ε жидкостей при различных температурах

Вещество	t, ^{0}C						
	0	10	20	25	30	40	50
Вода	87,83	83,86	80,08	78,25	76,47	73,02	69,73
Глицерин		56,2	39,1		39,1		
Нефть, керосин		4,7	2,05				
Масло касторовое		4,8	4,5				
Масло трансформаторное			2,1-2,5				
Спирт этиловый (14,7 ^{o}C)		26,8					

Таблица 27. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов и сплавов (при 20^0C)

Вещество	t, ^{0}C	ρ, 10^{-8} Ом·м	α,10^{-3} K^{-1}
Алюминий		2,82-3,21	3,862-4,9
Железо		9,8	5,0
Железо (0,1%C)		12,0	6,2
Сталь легированная		4,5	1,5
Золото		2,42	3,6
Серебро		1,62	3,6
Медь		1,75	3,9-4,15
Латунь		2,5-8	1,5-7
Бронза оловянистая		18	
Никель		7,24	5,4
Магний		4,46	3,9
Молибден		5,6	4,7
Вольфрам		7,0	
Графит		1300	
Манганин (3%Ni, 12%Mn, 85%Cu)	100	42-48	0,02-5
Нейзильбер (65%Cu, 15%Ni, 20%Zn)	150-200	28-35	0,04-0,33
Константан (40%Ni, 1,2%Mn, 58,8%Cu)	500	44,0-52	0,03-1
Нихром (67,5%Ni, 1,5%Mn, 16%Fe, 15%Cr)	1000	110-112	0,17-0,25
Никелин (54Cu, 20Zn, 26Ni)	150-200	0,39-0,45	0,02-0,23
Инвар		78	2,0
Копель(43%Ni, 0,5%Mn, 56,5%Cu)		47	
Фехраль(3,5%Al, 80%Fe, 15%Cr)		130	

Таблица 28. Коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, индукция насыщения и магнитная проницаемость некоторых веществ

Ферромагнетик	$H_к$ Эрст	$B_{ост}$ Гс	$B_{макс}$ Гс	$\mu_{макс}$
Жёсткие ферромагнетики				
Магнетит ($FeO\ Fe_2O_3$)	50	6000		
Углеродистая сталь (1%C)	40-60	9000-7000		
Хромовая сталь (3%Cr, 1%C)	60-80	10500-8500		
Мягкие ферромагнетики				
Чистое железо (отжиг в водороде	0,025	2000	21600	280000
Мягкое железо	0,5	8400	21500	8000
Трансформаторное кремнистое железо (1%Si)	0,7	15000	25000	10000
Трансформаторное железо (4%Si)	0,35	5000	20000	15000
Углеродистое железо (0,1%C)	3,0	10000	18000	3000
Чугун отожжённый (3%C)	4,6	4000	16000	2000
Пермаллой (78%Ni, 22%Fe)	0,06	5000	10000	80000
Гиперник (50%Ni, 50%Fe)	0,05	6000	11000	70000

Напряжённость магнитного поля на магнитном экваторе - ~ 27,1А/м, у магнитных полюсов - ~ 52,5А/м. В магнитных аномалиях, напряжённость возрастает; в районе Курской магнитной аномалии она достигает~ 160А/м.

ОПТИКА

Таблица 29. Показатель преломления n (относительно воздуха при 20^0C 101,3 кПа для =589,3 нм)

Вещество	n	Вещество	n
Алмаз	2,4173	Каменная соль	1,5443
Лёд	1,31	Слюда	1,56-1,60
Вода	1,33299	Канадский бальзам	1,542
Глицерин	1,4695	Кварцевое стекло	1,4584
Исландский шпат, необыкновенный луч	1,48643	Этиловый спирт	1,3617
Исландский шпат, обыкновенный луч	1,65836	Кронглас FK 3 Кронглас BK 1	1,46444 1,51002
Флинтглас F 3 Флинтглас SF 4	1,61279 1,75496	Кронглас BK 7 Кронглас 1 K 3 Кронглас SK 1	1,51625 1,51814 1,61016
Спирт метиловый	1,33	Спирт этиловый	1,362

Таблица 30. Показатель преломления стекол для различных длин волн (20^0C).

Стекло	7590 Å красный	6563 Å	5893 Å жёлтый	4861 Å голубой	4340 Å	3970 Å фиолетовый
Легкий крон	1,510	1,5136	1,5160	1,5217	1,5262	1,531
Тяжелый крон		1,5852	1,5881	1,5949	1,6003	
Лёгкий флинт		1,5746	1,5787	1,5888	1,5973	
Тяжелый флинт		1,6415	1,6469	1,6607	1,6724	

Таблица 31. Показатель преломления воды при различных длинах волн (при 20^0C)

λ, A	n	λ, A	n	λ, A	n
3082	1,3567	4861	1,3371	7590	1,3290
3611	1,3474	5460	1,3345	7682	1,3289
3970	1,344	5893	1,3330	10280	1,3245
4341	1,3403	6562	1,3311		
Температурный коэффициент $-8{,}010^{-5}$ град$^{-1}$					

Таблица 32. Показатель преломления воды при различной температуре t^0C

Длина волны	0	10	15	20	25	30	40
6563 λ Å		1,3318	1,3315	1,3 3115	1,3307	1,3302	
5863 λ Å	1,3339	1,33374	1,33341	1,33299	1,33252	1,33192	1,3306
4861 λ Å		1,3378	1,3375	1,33714	1,3366	1,3360	
4340 λ Å		1,3411	1,3408	1,34055	1,3398	1,3392	
Длина волны	50	60	70	80	90	100	
6563 λ Å							
5863 λ Å	1,3289	1,3272	1,3251	1,3229	1,3205	1,3178	
4861 λ Å							
4340 λ Å							

Таблица 33. Зависимость показателя преломления от длины волны

Об-ласть волн	λ	Стекло (15^0C)		Кварц (18^0C)		Плавл кварц	Вода 20^0C	Сильви-нит (KCl) 18^0C
		Лёгкий крон	Тяжёлый крон	n_o	$n_н$			
ИК	22300 9429 4200 2172 1256	 1,4946 1,5042	 1,6153 1,6268	 1,4569 1,5180 1,5316	 1,5261 1,5402		 1,3210	1,3712 1,4587 1,4720 1,4750 1,4778
Види-мые	670,8 643,8 589,3 486,4 404,7	1,5140 1,5149 1,5170 1,5230 1,5318	1,6434 1,6453 1,6499 1,6637 1,6852	1,5415 1,5423 1,5443 1,5497 1,5572	1,5505 1,5514 1,5534 1,5590 1,5667	1,4561 1,4568 1,4585 1,4632 1,4697	1,3308 1,3314 1,3330 1,3371 1,3428	1,4866 1,4877 1,4904 1,4983 1,5097
УФ	303,4 214,4 185,2	1,5552		1,5770 1,6305 1,6759	1,5872 1,6427 1,6901	1,4869 1,5339 1,5743	1,3581 1,4032	1,5440 1,6618 1,8270
Температурный коэфф. 10^{-6} K^{-1}		-1	3	-5	-6	-3	-80	-40

Таблица 34. Отражательная способность прозрачных веществ (в воздухе, при нормальном падении света)

Показатель преломления	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Отражательная способность, %	4,0	5,3	6,7	8,2	9,6	11,0	12,6	14,0	15,5	17,0	18,4

Таблица 35. Удельная вращательная способность (с - концентрация вещества в граммах на 100 $см^3$ раствора в растворителе воде, λ=589,3 нм, 20^0C)

Вещество	градусы	с
Сахароза (тростниковый сахар)	$66,473+0,0127p-0,000377p^2$	0-50
Декстроза (глюкоза)	$52,50+0,0188p+0,000517p^2$	0-35
Инвертный сахар	$-19,447-0,0607p+0,000221p^2$	10-65

Таблица 36. Световой поток Ф, светоотдача Ф/Р, к.п.д. η, сила света J и яркость В источников света.

	Р, Вт	Ф, лм	Ф/Р, лм/Вт	η %	J, кд	Т,К	В кд/$м^3$
Бытовые лампы (220 В) (прозрачные, D двойная вольфрамовая спираль)	15 25 40D 60D 75D 100D 150 500 1000	220 415 715 950 1350 2090 2920	10	1,6	10 18 30 51 103 173 695 1530	2460	$15\cdot10^5$- $20\cdot10^5$
Люминесцентная лампа			40-60	6,4		?	$1,5\cdot10^4$

Таблица 37. Яркостная температура $T_{як}$, цветовая температура $T_{цв}$, излучательность $R_Э$, коэффициент М перехода $T_{як}$ - Т, удельное сопротивление ρ вольфрама.

Т К	t ^{0}C	$T_{як}$ К	$T_{цв}$ К	$R_Э$, 10^{-4} Вт м$^{-2}$	М 10^{-5}	ρ; 10^{-8} Ом•м
1000	693	966		0,65	-3,520	25,7
1100				1,07		28,8
1200	876	1149		1,69	-3,699	32,0
1300				2,57		35,2
1400	1057	1330		3,82	-3,759	38,2
1500				5,55		41,8
1600	1235	1508		7,77	-3,813	45,2
1700				10,59		48,6
1800	1411	1684		14,22	-3,827	52,1
1900				18,55		55,6
2000	1584	1857	2030	23,72	-3,850	59,1
2100	1670	1943		29,82		62,6
2200	1754	2027	2238	37,18	-3,879	66,2
2300	1838	2111		45,90		69,9
2400	1919	2192	2447	55,80	-3,954	73,5
2500	2002	2275		67,60		77,2
2600	2083	2356	2660	80,80	-3,983	81,0
2700	2164	2437		96,20		84,7
2800	2242	2515	2874	112,90	-4,047	88,5
2900	2322	2595		132,10		92,3
3000	2401	2674	3092	153,90	-4,064	96,2

Таблица 38. Относительная видность K_α дневного зрения

Длина волны, нм	K_α	Длина волны, нм	K_α	Длина волны, нм	K_α
400	0,0004	520	0,710	640	0,175
420	0,0040	540	0,954	660	0,061
440	0,023	560	0,995	680	0,017
460	0,060	580	0,870	700	0,0041
480	0,139	600	0,631	720	0,00105
500	0,323	620	0,381	740	0,00025
				760	0,00006

Таблица 39. Длины волн характерных пектральных линий некоторых элементов в видимой части спектра λ А

H	6562,784	4861,327	4340,466	4340,466		
Hg	4046,56	4077,81	4347,50	4358,35	4916,04	5460,74
Hg	5675,86	5769,59	5789,66	5790,66	6123,46	6907,16
Na	4668,60	4982,84	5149,09	5153,64	5688,22	5688,22
Na	5889,965	5895,932	6154,23	6160,76		

Серия Бальмера в спектре водорода возбуждается в газовом разряде

Таблица 40. Длины волн ртутной лампы ПРК-4

Линия	Яркость	λ А	Линия	Яркость	λ А
Жёлтая	10	5790,6	Фиолетово-синяя	8	4358,3
Жёлтая	8	5769,6	Фиолетовая	1	4077,8
Зелёная	10	5460,7	Фиолетовая	2	4046,6
Голубая	1	4916,0			

Таблица 41. Атомные веса химических элементов.

Элемент	Символ	Ат. номер	Атомный вес	Валентность
Азот	N	7	14,0067	1 2 3 4 5
Алюминий	Al	13	26,9815	3
Аргон	Ar	18	39,948	0
Водород	H	1	1,00797	1
Железо	Fe	26	55,847	2 3 4
Калий	K	19	39,102	1
Кальций	Ca	20	40,08	2
Кислород	O	8	15,9994	2
Медь	Cu	29	63,54	1 2 3
Натрий	Na	11	22,9898	1
Свинец	Pb	82	207,19	2 4
Углерод	C	6	12,011	
Хлор	Cl	17	35,453	1 3 4 5 7

Таблица 42. Работа выхода электронов из металлов

Металл	Алюминий	Железо	Медь	Серебро	Цинк
А, эВ	4,23	4,77	4,24	4,45	4,39

Таблица 43. Формулы погрешностей

Формула	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка	Форму-ла	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка
A+B	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\lvert A+B\rvert}$	$\frac{A}{B}$	$\frac{B\Delta A+A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}+\frac{\Delta B}{\lvert B\rvert}$
A-B	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\lvert A-B\rvert}$	A^n	$nA^{n-1}\Delta A$	$n\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}$
A·B	$\Delta AB+\Delta BA$	$\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}+\frac{\Delta B}{\lvert B\rvert}$	$\sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n}A^{\frac{1-n}{n}}\Delta A$	$\frac{1}{n}\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}$
sinA	cosA Δ A	$\lvert ctgA\rvert\Delta A$	cosA	$\lvert\sin A\rvert\Delta A$	$\lvert ctgA\rvert\Delta A$

ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные физические константы ГСССД 1-87 /М.: Госкомстандарт СССР. 1987.

2. Гольдин Л.Л. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л.Л. Гольдин - М.: Наука, 1973.

3. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - М.: Мир, 1982.

4. Скороходов Е.А. Общетехнический справочник / Е.А. Скороходов. -М.: Машиностроение, 1982.

5. Кошкин Н.И., Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. - М.: Наука, 1980.

6. Чайлдс У. Физические постоянные / У. Чайлдс. - М.: ГИЗ, 1962.

7. Карякин Н.И., Краткий справочник по физике. / Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. - М. ВШ, 1964.

8. Енохович А.С. Справочник по физике и технике /. А.С Енохович. - М.: Просвещение, 1983.

Формулы для студентов

1. $\upsilon = \upsilon_0 \pm at$, $s = \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}$ уравнения кинематики при равнопеременном горизонтальном движении
2. $\upsilon = \upsilon_0 \pm gt$, $h = \upsilon_0 t \pm \frac{gt^2}{2}$ уравнения кинематики при равнопеременном вертикальном движении
3. Центр масс $\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$ - координаты, $\vec{\upsilon}_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\upsilon}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$ - скорость центра масс
4. $\upsilon_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}$ средняя скорость
5. $\upsilon = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ скорость $a = \frac{\Delta \upsilon}{\Delta t}$ ускорение
6. $\upsilon = \sqrt{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 + 2\upsilon_1 \upsilon_2 \cos\alpha}$ формула сложения скоростей
7. $T = \frac{1}{\nu} = \frac{t}{N}$ связь периода и частоты при движении по окружности
8. $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ круговая частота [1/с]
9. $a_{цс} = a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$ центростремительное ускорение
10. $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, $a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$, $a_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R$
11. $\vec{p} = m\vec{v}$ импульс $\vec{L} = J\vec{\omega}$ момент импульса
12. Моменты инерции $J_{точки} = mR^2$, $J_{цилинр(диска)} = \frac{mR^2}{2}$, $J_{шара} = \frac{2mR^2}{5}$, $J_{стержня} = \frac{mL^2}{12}$, $J_{куба} = \frac{ma^2}{6}$
13. $J = J_c + md^2$ теорема Штейнера
14. $M = Fh$ момент силы
15. 2 зак. Ньютона $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}_p$ импульсная форма $a = \frac{\vec{F}_p}{m}$ для тела постоянной массы
16. $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_p$ Основной закон динамики вращательного движения $\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}_P}{J}$

17. $\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma$ Закон Гука

18. $F = -kx$ Закон Гука для пружин, k - коэффициент жесткости пружины $k_O=k_1+k_2$ - при параллельном соединении $\frac{1}{k_o} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ - при последовательном соединении

19. $F_{TP} = \mu F_{Д} = \mu N$ закон трения

20. $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ закон всемирного тяготения

21. $F = -\frac{dW_{П}}{dx}$ Связь силы и потенциальной энергии

22. $m\vec{\upsilon}_1 + m\vec{\upsilon}_2 = m\vec{u}_1 + m\vec{u}_2$ з-н сохр. импульса

23. $J_1\vec{\omega}_1 + J_2\vec{\omega}_2 = J_1'\vec{\omega}_1' + J_2'\vec{\omega}_2'$ з-н сохр. момента импульса

24. работа $dA = Fds\cos\alpha$ при поступательном движении $dA = Md\varphi$ при вращательном движении

25. $N = \frac{dA}{dt}$ Формула для определения мощности [Вт]

26. $N = F\upsilon\cos\alpha$ Мощность постоянной силы

27. $N = M\omega$ Мощность при вращательном движении

28. кинетическая энергия $E = \frac{mv^2}{2}$ поступательного движения $E = \frac{J\omega^2}{2}$ - вращательного движения

29. $E = \gamma \frac{mM}{R}$ потенциальная энергия тела на поверхности планеты [Дж]

30. $E = mgh$ изменение потенциальной энергии тела при подъеме над поверхностью планеты [Дж]

31. $E = \frac{kx^2}{2}$ потенциальная энергия упруго деформированного тела - работа упругой силы [Дж]

32. $E_{k1} + E_{n1} + E_{k2} + E_{n2} = E'_{k1} + E'_{n1} + E'_{k2} + E'_{n2}$ закон сохранения механической энергии

33. $E_{k1} + E_{n1} + E_{k2} + E_{n2} = E'_{k1} + E'_{n1} + E'_{k2} + E'_{n2} + Q$ закон сохранения энергии

34. $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}$ релятивистская масса $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}$ Релятивистский интервал времени

35. $\ell = \ell_0\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}$ релятивистская длина, $\Delta E = \Delta mc^2$ релятивистская связь массы и энергии

36. $ma = F_{возвр} = -kx$ уравнение динамики гармонических колебаний

37. $x = A\cos(\omega_o t + \varphi_0)$ уравнение кинематики гармонических колебаний – смещение

38. $\upsilon = -A\omega_o \sin(\omega_o t + \varphi_0)$ уравнение зависимости скорости от времени для гармонических колеб.

39. $a = -A\omega_o^2 \cos(\omega_o t + \varphi_0)$ уравнение зависимости ускорениости от времени для гармонических колеб

40. $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = \frac{F}{m}\cos\Omega t$ дифференциальное уравнении колебаний

41. $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$ Амплитуда суммы двух гармонических колебаний одного направления

42. $tg\varphi_o = \frac{A_1\sin\varphi_{OI} + A_2\sin\varphi_{O2}}{A_1\cos\varphi_{OI} + A_2\cos\varphi_{O2}}$ Начальная фаза суммы двух гармонических колебаний одного направления

43. $\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} - \frac{2xy}{A_xA_y}\left(\sin\varphi_{ox}\sin\varphi_{oy} + \cos\varphi_{ox}\cos\varphi_{oy}\right) = \sin^2\left(\varphi_{oy} - \varphi_{ox}\right)$ Уравнение эллипса

44. $\omega = \frac{2\pi}{T}$ Связь периода и круговой частоты

45. Периоды колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ - груз на пружине $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ - математический маятник

46. $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mg\ell}}$ Период колебаний физического маятника

47. $E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2A^2}{2}$ энергия гармонически колеблющейся системы (груз на пружине)

48. $\lambda = \upsilon T$ связь длины волны, скорости распространения и периода волны

49. $\xi = A\sin\left(\omega t + \frac{\omega}{\upsilon}x\right)$ Уравнение волны

50. $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda}$ разность фаз точек волны

51. $\rho = \frac{m}{V}$ плотность вещества

52. $m_0 = \frac{m}{N} = \frac{\mu}{N_A}$ масса молекулы

53. $\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}$ количество вещества - число молей

54. $PV = \frac{m}{\mu}RT$ уравнение Менделеева-Клапейрона

55. $P_1V_1 = P_2V_2$ изотерма, $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ изобара, $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ изохора

$P = \frac{2W}{3V} = \frac{2}{3}n\frac{m_0\upsilon^2}{2}$ основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

56. $E = \frac{m_0 \upsilon^2}{2} = \frac{ikT}{2}$ энергия одной молекулы

57. $P = nkT$ связь давления и температуры Кельвиновской

58. $v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$ скорость молекулы идеального газа

59. $\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \frac{im}{2\mu} R\Delta T + P\Delta V$ ЗСЭ в термодинамике

60. $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ КПД тепловой машины

61. $dS = \frac{dQ}{T}$ изменение энтропии

62. $\Delta S_T = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \partial A}{T} = \frac{1}{T}\int_1^2 PdV = \frac{1}{T}\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$. изменение энтропии при изотермическом процессе

63. $\Delta S_V = \frac{m}{\mu} C_V Ln \frac{T_2}{T_1}$. изменение энтропии при изохорном процессе

64. $\Delta S_P = \Delta S_V + \Delta S_T = \frac{m}{\mu} C_V Ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$.изменение энтропии при изобарном процессе

65.изменение энтропии при адиабатном процессе ∂Q=0 и ΔS=0,

66. $\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \frac{im}{2\mu} R\Delta T + P\Delta V$ ЗСЭ в термодинамике

67. $\Delta S = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \partial A}{T} = \frac{1}{T}\int_1^2 PdV = \frac{1}{T}\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$ Изменение энтропии при изотерм ическом процессе

68. $\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$ Изменение энтропии при изохорном процессе

69. $\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$ Изменение энтропии при изобарном процессе

70. $\Delta S == 0$ изменение энтропии при адиабатном процессе

71.

72. $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ КПД тепловой машины

73. $dS = \frac{dQ}{T}$ Энтропия

74. $F = K\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$ закон Кулона

75. $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ напряженность электрического поля

76. $F = K\frac{q}{\varepsilon r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$ напряженность электростатического поля точечного заряда

77. $\vec{E}_0 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha}$ принцип суперпоз. для напряженн.

78. $A = \Delta\varphi d = Ud$ работа по перемещению заряда в электростатическом поле

79. $\varphi = \frac{A}{q_0}$ потенциал электростатического поля [В]

80. $\varphi = K\frac{q}{\varepsilon r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$ потенциал электростатического поля точечного заряда

81. $\varphi_0 = \varphi_1 + \varphi_2$ принцип суперпозиции для потенциала электростатического поля

82. $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \quad U = Ed$ связь напряженности и потенциала электростатического поля

83. $C = \frac{q}{U}$ электроемкость конденсатора

84. $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ электроемкость плоского конденсатора

85. $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$ электроемкость сферы

86. $C_0 = C_1 + C_2 + C_3 +$ электроемкость при параллельном соединении конденсаторов

87. $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} +$ электроемкость при последовательном соединении конденсаторов

88. $W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$ энергия электрического поля заряженного конденсатора (тела)

89. $\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$ плотность энергии электростатического поля

90. $I = \frac{dq}{dt}$ сила тока

91. $j = \frac{I}{S}$ плотность тока

92. $j = qn\upsilon$ плотность тока, q - заряд, n -количество носителей в единице объема, v - скорость заряда

93. $I = \frac{U}{R}$ закон Ома для однородного участка цепи, $I = \frac{E}{R+r}$ закон Ома для замкнутой цепи

94. $I_{K3} = \frac{E}{r}$ ток короткого замыкания

95. $R = \frac{\rho l}{S}$ сопротивление проводника ρ - удельное сопротивление [Ом/м]

96. $R_o = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$ сопр. при последоват. $\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$ е при паралл. соед.

97. $\Delta Q = UI\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t$ з-н Джоуля-Ленца $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ мощность в эл. цепи

98. $\eta = \frac{R}{R+r}$ КПД источника

99. $j = \frac{1}{\rho}E = \sigma E$ З-н Ома в дифференциальной форме

100. $F_A = IBdl\sin\alpha$ закон Ампера

101. $B = \mu\mu_0 H$ связь индукции и напряженности магнитного поля

102. $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$ индукция магнитного поля прямого тока

103. $F_o = q\upsilon B\sin\alpha$ сила Лоренца, действующая на заряд q, движущийся со скоростью v в магнитном поле

104. $F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R}l$ сила взаимодействия проводников с токами

105. $\Phi = BS\cos\alpha$ магнитный поток

106. $E = -\frac{Nd\Phi}{dt}$ закон электромагнитной индукции

107. $E = Bl\upsilon\sin\alpha$ ЭДС индукции в движущемся проводнике

108. $E = -L\frac{dI}{dt}$ закон самоиндукции,

109. $N\Phi = LI$ связь магнитного потока и силы тока

110. $W = \frac{LI^2}{2}$ энергия магнитного поля

111. $\omega = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$ плотность энергии магнитного поля

112. $T = 2\pi\sqrt{LC}$ - электромагнитный контур

113. $E = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$ энергия в колебательном контуре

114. $\frac{Sin\alpha}{Sin\beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ закон преломления, $Sin\alpha = \frac{1}{n}$ формула для полного внутреннего отражения

115. $\Delta L = 2k\frac{\lambda}{2}$ - Условие максимума интерференции, $\Delta L = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ - Условие минимума

116. $\Delta L = \frac{xdn}{\ell}$ Разность хода в схеме Юнга

117. $\Delta L = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2}$ Разность хода в тонкой пленке

118. $\Delta x = \frac{\ell \lambda}{nd}$ Ширина интерференционного максимума в схеме Юнга

119. $d \sin\varphi = k\lambda$ формула дифракционной решетки

120. $J_2 = J_1 \cos^2 \varphi$ Закон Малюса

121. $R = \sigma T^4$ Закон Стефана – Больцмана, $\lambda_m = \frac{b}{T}$ Закон Вина

122. $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ энергия фотона

123. $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = A_{ВЫХ} + \frac{mv^2}{2} = A_{ВЫХ} + eU_З$ уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

124. $h\frac{c}{\lambda_{KP}} = A_{ВЫХ}$ уравнение для красной границы фотоэффекта

125. $i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi$ - уравнение Шрёдингера

126. $\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + (E - U)\psi = 0$ стационарное уравнение Шрёдингера

127. $\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E + \frac{Ze^2}{r}\right)\psi = 0$ стационарное уравнение Шрёдингера для гармонического осциллятора

128. $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E - \frac{m\omega_O^2 x^2}{2}\right)\psi = 0$ стационарное уравнение Шрёдингера для атома водорода

129. $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$ стационарное уравнение Шрёдингера для одномерной потенциальной ямы

130. $W = \int_a^b |\psi|^2 dx$ Вероятность обнаружения частицы на участке пропорциональна площади под графиком модуля волновой Ψ- функции.

131. $\Delta x \Delta p \geq \hbar$, $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ - соотношения неопределенностей Гейзенберга

132. $(m\upsilon)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2}\cos\varphi$ формула эффекта Комптона

133. $\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}d\vec{S}$ Уравнения Максвелла (133-139)

134. $\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j}_{np} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right)d\vec{S}$

135. $\oint_S \vec{D}d\vec{S} = \int_V \rho dV$

136. $\int_S \vec{B}d\vec{S} = 0$

137. $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$

138. $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$

139. $\vec{j}_{np} = \sigma\vec{E}$

Равноускоренное движение

График зависимости пути от времени

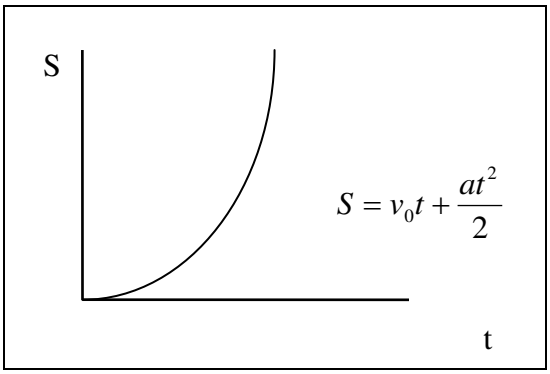
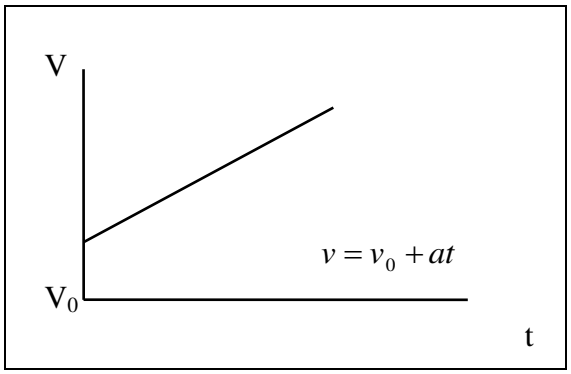
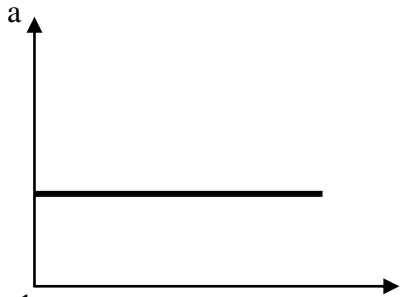


График зависимости скорости от времени



Равномерное движение

График зависимости ускорения от времени



a=const

График зависимости пути от времени

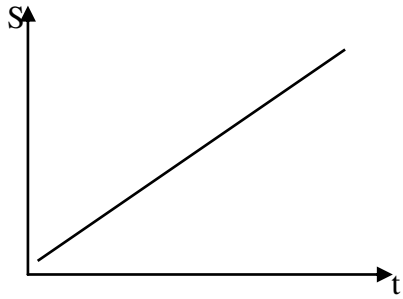


График зависимости скорости от времени

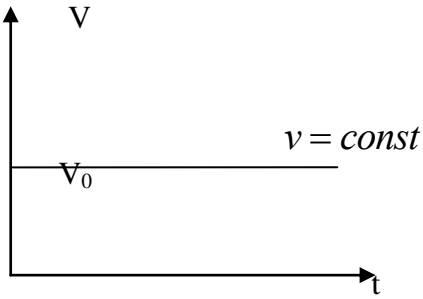
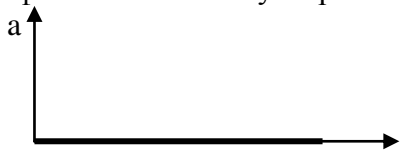


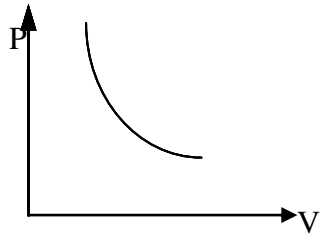
График зависимости ускорения от времени

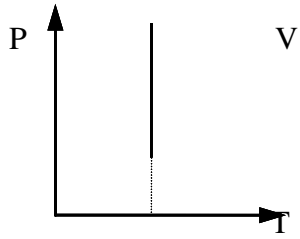


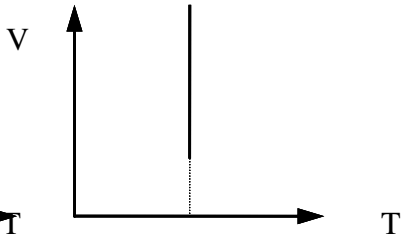
a=0

Газовые законы (изопроцессы)

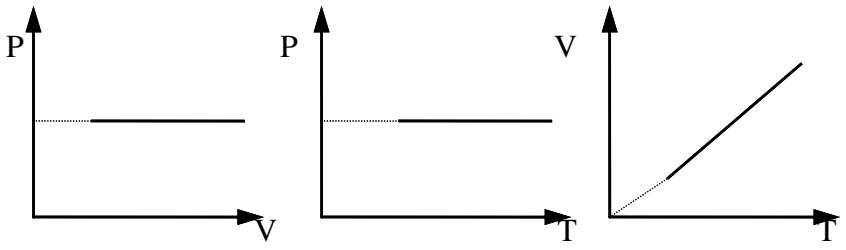
Изотермический процесс T=const



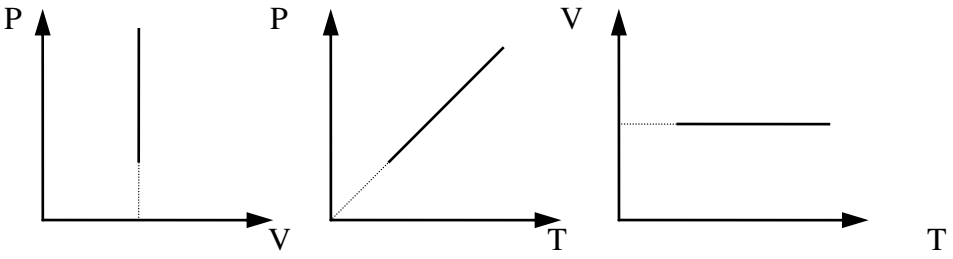




Изобарный процесс P=const

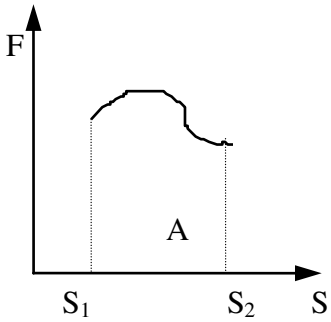


Изохорный процесс V=const

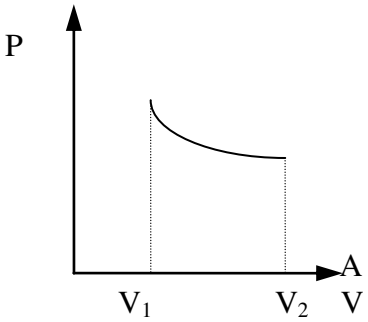


Графическое представление работы (Работа - площадь под кривой)

Работа в механике $A=F\cdot\Delta S\cdot\cos\alpha$

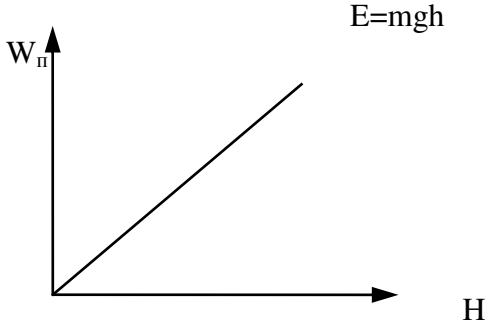


Работа в термодинамике $A=P\cdot\Delta V$



Зависимость потенциальной энергии тела, поднятого на высоту h над Землей, от высоты

$E=mgh$



Учебное издание

Леонтьев Николай Георгиевич, канд. физ-мат наук, доцент,

Белоусов Александр Васильевич, канд. физ-мат наук, доцент,

Гуриненко Людмила Александровна, канд. техн наук, доцент

Портаков Александр Борисович, канд. техн наук, доцент

Лабораторный практикум по физике.

Механика. Механические колебания. Молекулярная физика и термодинамика. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика

Авторская редакция

Объём ЭИ: 4,608 Мб.
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF).

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ
347740, г. ЗЕРНОГРАД Ростовской области, ул. Ленина,21.