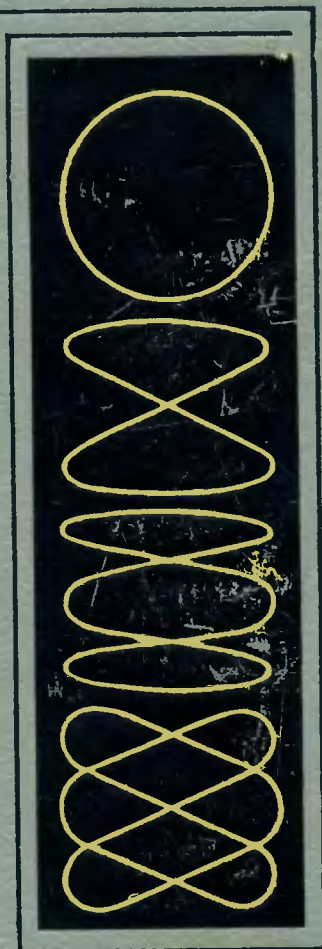


ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Н. Н. МАЙСОВА



ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Н. Н. МАЙСОВА

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено
Министерством
высшего
и среднего
специального
образования
СССР
в качестве
учебного
пособия
для студентов
зочных
высших
технических
учебных
заведений
и факультетов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА» МОСКВА—1970

Майсова Н. Н.

М14 Практикум по курсу общей физики. Изд. 2-е, переработ. и доп. Учеб. пособие. М., «Высш. школа», 1970. 44В с. с илл.

В учебном пособии изложен теоретический материал в соответствии с программой курса физики для вузов и дается описание методики проведения каждой работы. Основное внимание уделено принципам измерения физических величин, технике выполнения лабораторных работ, вычислению погрешностей, обработке результатов и графическому их отображению. Единицы измерения приведены по Международной системе единиц (СИ).

2—3—1
39—70.

53

МАЙСОВА Наталья Николаевна

ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Редактор *И. А. Иванов*
Художественный редактор *В. И. Пономаренко*
Художник *А. И. Драгункин*
Технический редактор *Н. В. Яшукова*
Корректор *Т. Г. Ловченко*

Сдано в набор 18/III 1970 г. Подп. к печати 4/VIII 1970 г. Формат 84×108¹/₃₂. Объем 14,0 печ. л. 23,52 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 20,02. Изд. № ФМ-431. Тираж 85 000 экз. Зак. 1039. Цена 74 коп. План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1970 г. Позиция № 39.

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первое издание «Практикума по курсу общей физики», вышедшее в 1963 г., уже разошлось, и возникла необходимость выпуска в свет нового издания.

Второе издание пришлось значительно переработать вследствие следующих обстоятельств:

Во-первых, требования к подготовке инженеров очень возросли.

Во-вторых, в Московском станкоинструментальном институте под руководством проф. А. С. Ахматова создана новая физическая лаборатория, которая является образцом учебных лабораторий по физике во вузах.

И в-третьих, промышленность выпускает много новых приборов, которые можно использовать при постановке лабораторных работ по физике. Эти обстоятельства учтены во втором издании.

Второе издание значительно расширено и переделано. В него вошли 24 новые работы, а некоторые старые работы дополнены и модернизированы. В раздел «Молекулярная физика и термодинамика» включены работы, которые поставлены в лаборатории физики Московского станкоинструментального института (№ 18, 20, 25, 29). Кроме того, изменено расположение работ по темам и разделам; новое расположение соответствует распределению материала в программе курса физики для вузов. Изложение теории перед разделами по возможности согласовано с соответствующими разделами курсов физики, рекомендованными в программе. Вместе с тем остался без изменения принцип написания работ, т. е. все работы по-прежнему составлены по одному

плану: дается теория метода и описание установки и указывается порядок выполнения работы и последовательность обработки результатов наблюдения и вычисления.

Большую помощь в постановке новых лабораторных работ, а в некоторых случаях и в составлении первоначального варианта описания работ, оказали следующие сотрудники кафедры физики ВЗИСИ: И. Н. Кашкарова (работы № 4, 60), Л. В. Цикота (№ 19, 30, 60), А. Д. Лиханов (№ 72, 74), А. Г. Смагин (№ 15, 32), В. Я. Доценко (№ 45), А. П. Филин (№ 61, 84, 85).

«Практикум» предназначается для студентов-заочников, однако может быть полезен и студентам вечерних и очных вузов.

Автор выражает благодарность доц. Л. А. Гончарскому, проф. В. Г. Семенову и старшему преподавателю кафедры физики ВЗИСИ И. Н. Кашкаровой за ряд ценных указаний и советов по лабораторным работам и по использованию аппаратуры.

Отзывы и пожелания автор просит присылать по адресу: Москва, Средняя Калитниковская, 30, Всесоюзный заочный инженерно-строительный институт, кафедра физики.

Автор.

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Измерить какую-либо величину — значит узнать, сколько раз заключается в ней однородная величина, принятая за единицу измерения. Непосредственно измерять данную величину (прямое измерение) приходится очень редко. В большинстве случаев производят не прямые измерения данной физической величины, а косвенные — через величины, связанные с измеряемой физической величиной определенной функциональной зависимостью.

Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, так как всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой или погрешностью. Погрешности или ошибки измерений бывают систематические и случайные.

Систематические ошибки происходят от несовершенства приборов для измерений, а также от недостаточно разработанной теории опыта (например, трудно учесть многие причины, влияющие на точность искомого результата: влияние среды, роль примесей, контакты с другими телами и т. п. — это так называемые объективные причины).

Систематические ошибки обычно дают отклонение результата от истинного значения только в одну сторону (или в сторону увеличения, или в сторону уменьшения).

Систематических ошибок можно избежать путем изучения приборов, которыми пользуются при выполнении ра-

бот, полной разработкой теории опыта, а также введением соответствующих поправок в результат измерений.

Случайные ошибки в отличие от систематических носят субъективный характер. Они могут происходить по вине экспериментатора; от несовершенства зрения, слуха или по другим причинам, которые заранее нельзя учесть.

Случайные ошибки могут изменять результаты в обе стороны, то увеличивая, то уменьшая их.

Исключить при измерениях случайные ошибки невозможно, но благодаря тому, что к случайным ошибкам можно применить законы теории вероятности, можно уменьшить влияние этих ошибок на окончательный результат измерений.

Иногда говорят о *промахах* или *просчетах* — это ошибки, возникающие в результате небрежности отсчета по приборам или неразборчивости в записи их показаний. Единственное средство устранить их: внимательно сделать повторное (контрольное) измерение. Эти ошибки в расчет не принимают.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Надо измерить некоторую величину. Пусть $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ — результаты отдельных измерений данной величины, а n — число отдельных измерений. Среднее арифметическое из этих результатов, т. е.

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1)$$

есть величина, наиболее близкая к истинному значению, называемая *средним значением*.

Отсюда следует, что каждое физическое измерение должно быть повторено несколько раз.

Разности $\Delta N_1; \Delta N_2; \Delta N_3, \dots, \Delta N_n$ между средним значением \bar{N} измеряемой величины и значениями $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$, полученными при отдельных измерениях, т. е.

$$\bar{N} - N_1 = \Delta N_1;$$

$$\bar{N} - N_2 = \Delta N_2;$$

$$\bar{N} - N_3 = \Delta N_3;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\bar{N} - N_n = \Delta N_n,$$

называются *абсолютными ошибками* и могут быть и положительными и отрицательными.

Для определения *средней абсолютной ошибки результата* берут среднее арифметическое абсолютных значений (модулей) отдельных ошибок, т. е.

$$\Delta \bar{N} = \frac{|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + |\Delta N_3| + \dots + |\Delta N_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta N_i|. \quad (2)$$

Отношения $\frac{\Delta N_1}{\bar{N}}$, $\frac{\Delta N_2}{\bar{N}}$, $\frac{\Delta N_3}{\bar{N}}$, ..., $\frac{\Delta N_n}{\bar{N}}$ называются *относительными ошибками отдельных измерений*.

Отношение средней абсолютной ошибки результата $\Delta \bar{N}$ к его среднему значению \bar{N} дает *среднюю относительную ошибку результата измерений*

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}. \quad (3)$$

Относительные ошибки принято выражать в процентах

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} \cdot 100\%.$$

Истинное значение измеряемой величины

$$N_{\text{ист}} = \bar{N} \pm \Delta \bar{N}. \quad (4)$$

Не следует думать, что величина $N_{\text{ист}}$ имеет два значения $\bar{N} - \Delta \bar{N}$ и $\bar{N} + \Delta \bar{N}$; $N_{\text{ист}}$ имеет только одно значение, а знак «+» или «-» показывает, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале

$$\bar{N} + \Delta \bar{N} \text{ и } \bar{N} - \Delta \bar{N}, \text{ т. е.}$$

$$\bar{N} - \Delta \bar{N} \leq N_{\text{ист}} \leq \bar{N} + \Delta \bar{N}.$$

Теория вероятностей дает более точную формулу для вычисления абсолютной ошибки результата, устанавливая понятие так называемой *наиболее вероятной* ошибки результата ΔN_m :

$$\Delta N_m = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\Delta N_i|^2}{n(n-1)}}. \quad (5)$$

В этом случае окончательное значение измеряемой величины

$$N_{\text{ист}} = \bar{N} \pm \Delta N_m. \quad (6)$$

Если точность прибора такова, что при любом числе измерений получается одно и то же число, лежащее где-то между делениями шкалы, то приведенный метод оценки погрешности неприменим. В этом случае измерение производится один раз и результат измерения записывается так:

$$N'_{\text{ист}} = \bar{N}' + \Delta N_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где $N'_{\text{ист}}$ — искомый результат измерения; \bar{N}' — средний результат, равный среднему арифметическому из двух значений, соответствующих соседним делениям шкалы, между которыми заключено остающееся неизвестным истинное значение измеряемой величины; $\Delta N_{\text{пр}}$ — предельная погрешность, равная половине цены деления шкалы прибора.

Иногда положение какого-либо указателя, например мениска столбика ртути в термометре, трудно различимо в пределах одного деления, равного, допустим, $0,1^\circ\text{C}$. Тогда за предельную погрешность измерения берется значение всего деления, а не его половины.

Часто в работах даются значения некоторых величин, измеренных заранее. В таких случаях абсолютную погрешность принимают равной ее предельной величине, т. е. равной половине единицы наименьшего разряда, представленного в числе. Например, если дана масса тела $m = 532,4 \text{ г}$, то $\Delta m = 0,05 \text{ г}$, следовательно,

$$m = (532,4 \pm 0,05) \text{ г}.$$

Определение погрешностей для прямых измерений удобно производить по следующей таблице:

№ измерения	N_i	$ \Delta N_i $	$\frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} \cdot 100\%$	$N_{\text{ист}} = \bar{N} \pm \Delta \bar{N}$ или $N'_{\text{ист}} = \bar{N}' \pm \Delta \bar{N}_{\text{пр}}$
1	N_1	ΔN_1	X	X
2	N_2	ΔN_2		
...		
n	N_n	ΔN_n		
Среднее значение				

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

В тех случаях, когда физическая величина не может быть измерена непосредственно, прибегают к косвенным измерениям.

Пусть для нахождения величины N пришлось измерить какие-то величины x , y и z . Величины N , x , y , z связаны функциональной зависимостью $N = f(x, y, z)$.

В этом случае *средняя абсолютная ошибка $\Delta \bar{N}$ может быть найдена по правилам дифференцирования, если значок дифференциала d заменить значком ошибки Δ и выбрать знаки таким образом, чтобы величина ошибки была максимальной*, т. е.

$$dN = \frac{\partial N}{\partial x} dx + \frac{\partial N}{\partial y} dy + \frac{\partial N}{\partial z} dz \quad (8)$$

и

$$\Delta \bar{N} = \frac{\partial N}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial N}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial N}{\partial z} \Delta z \quad (9)$$

(В частном случае, когда $N = f(x)$ формула (9) принимает вид:

$$\Delta \bar{N} = \frac{dN}{dx} \Delta x,$$

т. е. абсолютная ошибка функции равна абсолютной ошибке аргумента, умноженной на производную этой функции).

Относительная ошибка находится по формуле (3), т. е.

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}},$$

а так как дифференциал натурального логарифма

$$d(\ln N) = \frac{dN}{N}, \quad (10)$$

то

$$\Delta(\ln \bar{N}) = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}$$

или

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} = \Delta(\ln \bar{N}). \quad (11)$$

Таким образом, относительная ошибка результата равна полному дифференциалу натурального логарифма функции, определяющей зависимость данной величины от измеряемых величин. При вычислении надо брать сумму абсолютных значений дифференциалов всех членов логарифма (все частные ошибки складываются) с заменой знаков d значком Δ .

Относительную ошибку измерения $E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}$ следует вычислять в такой последовательности:

- прологарифмировать расчетную формулу;
- найти от логарифма полный дифференциал;
- если ошибка отдельных измерений входит в результат дифференцирования несколько раз, то надо сгруппировать все члены, содержащие одинаковый дифференциал и выражения в скобках, стоящие перед дифференциалом, взять по модулю; знак d заменить на Δ ; знаки выбирают так, чтобы абсолютная величина относительной ошибки была максимальной.

Пример. При определении отношения удельных теплоемкостей c_p и c_v газа γ методом адиабатического расширения расчетная формула имеет вид: $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$, где h_1 и h_2 высоты поднятия жидкости в коленях манометра. Надо найти $\gamma_{\text{ист}}$ и $E = \frac{\Delta \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}$, если результаты измерения следующие:

№ измерения	h_{1i}	Δh_{1i}	h_{2i}	Δh_{2i}	$\bar{\gamma}$	$E = \frac{\Delta \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}$	$\gamma_{\text{ист}} = \bar{\gamma} \pm \Delta \bar{\gamma}$
1	16,1	0	4,0	0,1	×	×	$1,34 \pm 0,12$
2	16,0	0,1	4,1	0			
3	16,2	0,2	4,1	0			
4	16,1	0	4,0	0,1			
5	16,1	0	4,3	0,2			
Среднее значение	16,1	0,06	4,1	0,06	1,34	0,015	

Нахождение всех величин следует проводить следующим образом:

1. Вычисляют среднее арифметическое каждой измеряемой величины. В данном случае \bar{h}_1 и \bar{h}_2 .

2. Подставляют в расчетную формулу найденные средние значения \bar{h}_1 и \bar{h}_2 и вычисляют среднее значение $\bar{\gamma}$ *:

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{h}_1}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} = \frac{16,1}{16,1 - 4,1} = \frac{16,1}{12} = 1,34.$$

3. Вычисляют абсолютные ошибки отдельных измерений $|\Delta h_{1i}|$ и $|\Delta h_{2i}|$ и всего измерения $|\Delta h_1|$ и $|\Delta h_2|$.

4. Выводят формулу для вычисления относительной ошибки по схеме, приведенной на стр. 10. Для этого:

а) логарифмируют расчетную формулу

$$\ln \gamma = \ln \bar{h}_1 - \ln (\bar{h}_1 - \bar{h}_2);$$

б) находят полный дифференциал

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = \frac{d\bar{h}_1}{\bar{h}_1} - \frac{(1 - \bar{h}_2)}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} d\bar{h}_1 - \frac{(\bar{h}_1 - 1)}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} d\bar{h}_2;$$

в) группируют все члены, содержащие одинаковый дифференциал, все минусы заменяют плюсами; берут скобки по модулю и заменяют дифференциалы d на Δ , получают:

$$E = \frac{\Delta \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} = \left| \left(\frac{1}{\bar{h}_1} - \frac{1 - \bar{h}_2}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} \right) \right| \Delta \bar{h}_1 + \left| \frac{\bar{h}_1 - 1}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} \right| \Delta \bar{h}_2.$$

В полученную формулу подставляют числовые данные.

$$E = \frac{\Delta \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} = \left| \frac{1}{16,1} - \frac{1 - 4,1}{16,1 - 4,1} \right| \cdot 0,06 + \left| \frac{16,1 - 1}{16,1 - 4,1} \right| \cdot 0,06 = \\ = 0,09 = 9\%.$$

5. Вычисляют абсолютную погрешность $\Delta \bar{\gamma} = E \bar{\gamma} = 0,09 \cdot 1,34 = 0,12$.

6. Окончательный результат записывают в виде:

$$\gamma_{\text{ист}} = \bar{\gamma} \pm \Delta \bar{\gamma} = 1,34 \pm 0,12.$$

Вычисления рекомендуется проводить с помощью логарифмической линейки или арифмометра, производя округления по правилам приближенных чисел. Необходимо твердо

* Если в исходную формулу входят константы, то при вычислении среднего результата их определяют так, чтобы число значащих цифр в них было на единицу больше числа значащих цифр в значениях измеряемых величин.

помнить, что точность результата определяется точностью измерительных приборов и тщательностью исходных измерений и не может быть повышена в дальнейшем путем искусственного набирания знаков при производстве арифметических действий.

ГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке результатов измерений часто пользуются графическим методом. Такой метод бывает необходим тогда, когда требуется проследить зависимость какой-либо физической величины от другой, например $y = f(x)$. Для этого производят ряд наблюдений искомой величины y для различных значений переменной величины x . Для наглядности эту зависимость изображают графически.

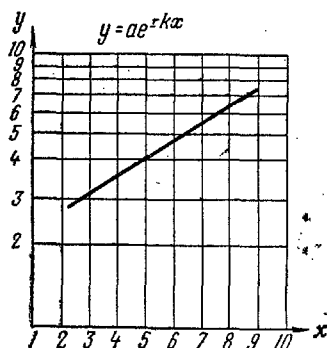


Рис. 1

В большинстве случаев пользуются прямоугольной системой координат. Значения независимого аргумента x откладывают по оси абсцисс в произвольно выбранном масштабе, а по оси ординат также в произвольном масштабе откладывают значения y . Полученные на плоскости точки соединяют между собой плавной кривой.

Если плавной кривой не получается, следовательно, в наблюдениях допущены ошибки.

Пользуясь кривой, можно также в пределах произведенных наблюдений интерполировать, т. е. находить значение величины y для таких значений x , которые непосредственно не наблюдаются.

Для этого из любой точки оси абсцисс можно провести ординату до пересечения с кривой; длина такой ординаты будет представлять значение величины y для соответствующего значения величины x .

Кроме системы координат с равномерным масштабом, применяют полулогарифмические и логарифмические шкалы. Полулогарифмическая система координат (рис. 1) очень удобна для построения кривых вида $y = ae^{\pm kx}$.

Если значения x откладывать по оси x (равномерная шкала), а значения y по оси неравномерной y (логарифмическая шкала), то график даст прямую линию.

Для угловых величин удобнее применять полярную систему координат.

По графикам можно найти эмпирическую формулу.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Выполнение каждой лабораторной работы проводят по следующей схеме:

1. Внимательно читают описание лабораторной работы в данном практикуме.

2. Знакомятся с приборами и принадлежностями, которые необходимы для проведения работы, и приступают к установке приборов или сборке установки в соответствии с описанием. Иногда работа проводится на готовой установке.

3. Производят наблюдения и отсчеты. Эта часть работы является наиболее ответственной и ее надо проводить очень аккуратно и тщательно, согласно указаниям, которые даны в данном практикуме по каждой работе для измерения и наблюдения данной физической величины. Все результаты измерений записываются в таблицы записи результатов, которые даны в конце каждой работы.

4. Обрабатывают результаты измерений: вычисляют измеряемую величину по формулам и дают оценку погрешностей измерений.

Для оформления отчетов по физическому практикуму необходимо иметь или специальный журнал экспериментальной работы, или специальные бланки для каждой работы отдельно.

Заполнение бланка или журнала отчета проводят по следующей схеме:

1. Записывают название и номер работы.

2. Дают краткое описание теории метода и приборов с показом схем приборов и установок (берут из данной работы физического практикума) и подготавливают таблицу для записи измерений.

3. В таблицу записи измерений вписывают результаты всех первичных измерений (берут из опытов).

4. По расчетной формуле проводят вычисление искомой величины.

5. Вычисляют погрешности измерения.

6. При необходимости строят график.

Второй пункт отчета рекомендуется подготовить дома.

Как показывает практика, успех всякой экспериментальной работы зависит не только от правильности выбора метода измерения, точности применяемых приборов, тщательности выполнения измерений, но и от правильной систематической записи результатов измерений. Привычка производить вычисления на случайных клочках бумаги совершенно недопустима даже в черновых отчетах.

Необходимо систематически воспитывать в себе навыки точной, аккуратной и своевременной фиксации всех измерений.

СИСТЕМА ЕДИНИЦ

Все вычисления физических величин следует проводить в Международной системе единиц (СИ).

Основными единицами этой системы являются:

1. Длина — метр (*м*).

2. Масса — килограмм (*кг*).

3. Время — секунда (*сек*).

4. Сила электрического тока — ампер (*а*).

5. Термодинамическая температура — градус Кельвина ($^{\circ}$ К).

6. Сила света — свеча (*св*).

Метр — длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Килограмм. Впервые килограмм был определен как масса 1 $дм^3$ чистой воды при температуре 4° С. В настоящее время килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда — $1/31556925,9747$ часть тропического года для 1900 г. января 0 в 12 часов эфемеридного времени.

Эфемеридным временем называется равномерно текущее время, входящее в уравнение динамики небесных тел. Понятие эфемеридного времени введено в отличие от всемирного

времени, определяемого вращением Земли, которое является неравномерным.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы (ньютонa) на каждый метр длины.

Градус Кельвина — единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение $273,16^\circ \text{K}$ (точно).

Свеча — единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины была равна $60 \cdot 10^8$ на 1 см^2 .

Система СИ содержит шесть основных единиц. Однако в различных разделах физики находят использование не все, а лишь некоторые из этих величин, так, например, в механике — три первых, в молекулярной физике — три первых и пятая, в электричестве — три первых и четвертая, в оптике — первая, третья и шестая. Таким образом, Международная система единиц как бы распадается на ряд отдельных систем единиц, сохраняющих самостоятельные значения в определенном разделе физики.

Некоторые производные единицы системы СИ и соотношения между единицами этой системы и единицами других систем приведены в таблице на стр. 16—19

НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *

1. *Энергия излучения* W — энергия, переносимая электромагнитными волнами, — измеряется в джоулях.

2. *Объемная плотность энергии* U — количество энергии W , приходящееся на единицу объема пространства V :

$$U = \frac{W}{V} \text{ (дж/м}^3\text{)}.$$

* Принятые обозначения, установленные ГОСТ 7601—55.

СИ

Физическая величина и ее определяющая формула	СИ		Соотношения между единицами измерения СИ и единицами других систем
	Единица измерения и ее сокращенное обозначение	Размер единицы измерения	
1	2	3	4
Сила $dF = m \frac{dv}{dt}$	ньютон (н)	$1 \text{ н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/1 сек}^2$	$1 \text{ н} = 10^6 \text{ дин}$, $1 \text{ кг} = 9,8 \text{ н} \approx 10 \text{ н}$
Давление $p = \frac{dF_{\perp}}{dS}$	ньютон на кв метр	1 н/м^2	$1 \frac{\text{н}}{\text{м}^2} = 10 \text{ дин/см}^2 = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ ат} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 10^{-6} \text{ бар}$
Работа, энергия, количество теплоты $dA = F \times dt$; $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$; $W_{\text{п}} = mgh$	джоуль (дж)	$1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ дж}$	$1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг} = 1,02 \times 10^{-2} \text{ л} \cdot \text{ат} = 9,87 \times 10^{-3} \text{ л} \cdot \text{атм} = 6,25 \times 10^{18} \text{ эв} = 2,78 \times 10^{-4} \text{ вт} \cdot \text{ч} = 0,24 \text{ ккал}$
Мощность $N = \frac{dA}{dt}$	ватт (вт)	$1 \text{ вт} = 1 \text{ дж/сек}$	$1 \text{ вт} = 10^7 \text{ эрг/сек}$
Количество электричества (электрический заряд) $dq = i \cdot dt$	кулон (к)	$1 \text{ к} = 1 \text{ а} \cdot 1 \text{ сек}$	$1 \text{ к} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГСЭ}_q = 0,1 \text{ СГСМ}_q = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ а} \cdot \text{ч}$
Сила тока $I = \frac{dq}{dt}$	ампер (а)	$1 \text{ а} = 1 \text{ к/сек}$	$1 \text{ а} = 0,1 \text{ СГСМ}_I$

<p>Разность электрических потенциалов (электро- движущая сила, электрическое напряжение)</p> $d\phi = \frac{dW}{q}$	<p>вольт (в)</p>	$1\text{ в} = 1\text{ Дж/к} = 1\text{ вт/а} = 1\text{ Дж/(1а} \cdot 1\text{сек)}$	$1\text{ в} = \frac{1}{300}\text{ СГСЭ}\phi = 10^8\text{ СГСМ}\phi$
<p>Напряженность электрического поля $E = \frac{d\phi}{dr}$; $E = \frac{F}{q}$</p>	<p>вольт на метр</p>	1 в/м	$1\text{ в/м} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4}\text{ СГСЭ}E = 10^6\text{ СГСМ}E = 10^{-2}\text{ в/см}$
<p>Электрическое сопротивление $R = \frac{U}{I}$, U — напряжение</p>	<p>ом (ом)</p>	$1\text{ ом} = 1\text{ в/а}$	$1\text{ ом} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}\text{ СГСЭ}R = 10^9\text{ СГСМ}R$
<p>Электрическая емкость $C = \frac{q}{\phi}$</p>	<p>фарада (ф)</p>	$1\text{ ф} = 1\text{ к/в}$	$1\text{ ф} = 9 \cdot 10^{11}\text{ СГСЭ}C = 10^{-9}\text{ СГСМ}C$
<p>Поток магнитной индукции $d\Phi = \mathcal{E}_{\text{инд}} \cdot dt$ (из закона Фарадея для электромагнитной индукции)</p>	<p>вебер (вб)</p>	$1\text{ вб} = 1\text{ к} \cdot 1\text{ ом} = 1\text{ в} \cdot 1\text{ сек}$	$1\text{ вб} = \frac{1}{300}\text{ СГСЭ}\Phi = 10^8\text{ максвелл}$

СИ			
Физическая величина и ее определяющая формула	Единица измерения и ее сокращенное обозначение	Размер единицы измерения	Соотношения между единицами измерения СИ и единицами других систем
1			
Индуктивность, взаимная индуктивность $L = \frac{\Phi_m}{I}$	генри (гн)	$1 \text{ гн} = 1 \text{ вб/1 а} =$ $= 1 \text{ в} \cdot 1 \text{ сек/1 а}$	$1 \text{ гн} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ СГСЭ}_L = 10^9 \text{ см}$
Магнитная индукция $B = \frac{d\Phi_m}{dS}$ $= \frac{I \cdot dl}{V_n}; B_n = \frac{dS}{dS}$	тесла (тл)	$1 \text{ тл} = 1 \text{ н/(1 а} \cdot 1 \text{ м)} =$ $= 1 \text{ в} \cdot 1 \text{ сек/1 м}^2 =$ $= 1 \text{ вб/1 м}^2$	$1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс (гаусс)}, 1 \text{ тл} =$ $= \frac{1}{3} \cdot 10^{-8} \text{ СГСЭ}_B$
Напряженность магнитного поля $H = \frac{IN}{l}$ (из формулы магнитного поля соленоида)	ампер на метр	1 а/м	$1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э} = 1,26 \cdot 10^{-2} \text{ э}$ (эрстед), $1 \text{ э} = 79,6 \cdot \text{а/м} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \text{ а/м}$
Магнитодвижущая сила $F = IN$	ампер	1 а (выток)	$1 \text{ аэ} = 1,26 \text{ эб (гильберт)} = 4\pi \cdot 10^{-1} \text{ эб}$
Электрическая постоянная ϵ_0	фарада на метр	1 ф/м	$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ К}^2 / (\text{н} \cdot \text{м}^2)} \left(\frac{\text{ф}}{\text{м}} \right) =$ $= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ К}^2 / (\text{н} \cdot \text{м}^2) (\text{ф/м})$

Магнитная постоянная μ_0	генри на метр	1 гн/м	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м} \left(\frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{а} \cdot \text{м}} \right) =$ $= 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ гн/м} (\text{в} \cdot \text{сек} / (\text{а} \cdot \text{м}))$
Световой поток $\Phi = I\omega = \frac{dW}{dt}$	люмен (лм)	1 лм = 1 св · 1 стер	1 лм = 1 св · 1 стер (1 вт = 1 дж/сек)
Яркость $B_{\varphi} = \frac{dI}{dS \cdot \cos\varphi}$	Свеча на кв. метр — нит (нт)	1 св/м ² = 1 нт	1 нт = 10 ⁻⁴ св (стильб) 1 св = 1 св/1 см ²
Освещенность $E = \frac{d\Phi}{dS}$	люкс (лк)	1 лк = 1 лм/1 м ²	1 лк = 10 ⁻⁴ лм/см ² (фот) 1 фот = 10 ⁴ лк
Световая энергия $dW = \Phi \cdot dt$	люмен-сек (лм · сек)	1 лм · 1 сек = 1 лм · 1 сек	1 лм · 1 сек = 1 св · 1 стер · 1 сек (1 вт · 1 сек = 1 дж)

3. Поток энергии излучения Φ_0 — количество энергии, переносимой электромагнитными волнами в единицу времени сквозь какую-либо поверхность

$$\Phi_0 = \frac{dW}{dt} \text{ (дж/сек = вт)}.$$

4. Поверхностная плотность потока излучения или интенсивность потока излучения J . Поверхностная плотность потока излучения, испускаемого с данной поверхности во всем интервале частот (длин волн), называется энергетической светимостью или интегральной излучательной способностью E_T :

$$J = \frac{\Phi_0}{S}; \quad E_T = \frac{\Phi_0}{S} \text{ (вт/м}^2\text{)}.$$

Поверхностная плотность потока излучения, падающая на данную поверхность, называется энергетической освещенностью:

$$E_0 = \frac{\Phi_0}{S} \text{ (вт/м}^2\text{)}.$$

5. Энергетическая сила света — поток энергии излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла в пределах которого излучение распространяется

$$I_0 = \frac{\Phi_0}{\omega} \text{ (вт/стер)}.$$

6. Энергетическая яркость B_0 — отношение энергетической силы света элемента излучающей поверхности ΔS к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения $\Delta S \cdot \cos \alpha$

$$B_0 = \frac{\Delta I_0}{\Delta S \cdot \cos \alpha} \text{ (вт/(м}^2 \cdot \text{стер))},$$

где α — угол между нормалью к элементу поверхности ΔS и направлением наблюдения.

Единицы 4, 5 и 6, отнесенные к определенному интервалу волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ (или частот от ν до $\nu + \Delta\nu$), определяют спектральные величины и называются: спектральная плотность энергетической светимости (освещенности), силы света, яркости.

Рассмотрим эти величины.

Спектральная плотность энергетической светимости или плотность спектрального потока, или лучеиспуска-

тельная (излучательная) способность тела — энергия электромагнитного излучения dW , испускаемого за единицу времени dt с единицы площади dS поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ (частот от ν до $\nu + \Delta\nu$):

$$E_{\lambda, \tau} = \frac{dE_{\tau}}{d\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{dS \cdot d\lambda} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\lambda} \quad (\text{дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{м})) = \\ = \text{дж}/(\text{сек} \cdot \text{м}^3) = \text{вт}/\text{м}^3);$$

$$E_{\nu, \tau} = \frac{dE_{\tau}}{d\nu} \quad (\text{дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{сек}^{-1}) = \text{дж}/\text{м}^2).$$

Спектральная плотность энергетической силы света

$$i_{\lambda} = \frac{dI_{\lambda}}{d\lambda} \quad (\text{вт}/(\text{стер} \cdot \text{м})).$$

Спектральная плотность энергетической яркости

$$b_{\lambda} = \frac{dB_{\lambda}}{d\lambda} \quad (\text{вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{стер})).$$

Наряду с излучением тела способны поглощать падающие на них электромагнитные волны. Спектральной характеристикой поглощения является коэффициент поглощения (или поглощательная способность) тела a_{λ} или A_{λ} , равный отношению потока поглощенной телом энергии $dW_{\text{погл}}$ к полному потоку энергии dW , падающих на него волн с длиной волны в интервале от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ (частотами от ν до $\nu + \Delta\nu$)

$$A_{\lambda} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW} \quad \text{или} \quad a_{\lambda} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW}.$$

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

Световыми величинами (фотометрическими) измеряют ту часть потока электромагнитного излучения, которая воспринимается человеческим глазом, т. е. все световые величины относятся только к видимому излучению. Все эти единицы основаны на физиологическом действии света.

Поэтому для измерения фотометрических величин исходят из средней чувствительности глаза, которая характеризуется величиной, называемой функцией видности V_{λ} .

Функция видности показывает ту часть от полной мощности светового потока, которая воспринимается глазом.

Наибольшие значения V_λ в интервале длин волн зеленого цвета ($\lambda = 0,555 \text{ мкм}$).

Основной фотометрической величиной в системе СИ является единица силы света источника. Эта единица называется свечой (св).

Фотометрические единицы, характеризующие источники света

1. Световой поток Φ , посылаемый источником в некоторый телесный угол $d\omega$, — величина, численно равная произведению силы света I источника на величину телесного угла:

$$d\Phi = I \cdot d\omega \text{ (св} \cdot \text{стер} = \text{люмен)}.$$

2. Световая энергия W — энергия, излучаемая источником света за время t :

$$dW = \Phi \cdot dt \text{ (лм} \cdot \text{сек)}.$$

3. Функция видности — отношение светового потока Φ к спектральному потоку излучения Φ_λ , создающему этот световой поток:

$$V_\lambda = \frac{\Phi}{\Phi_\lambda} \text{ (лм/вт)}.$$

4. Светнрсть (светимость) R — величина светового потока, испускаемого с единицы площади светящейся поверхности:

$$R = \frac{\Phi}{S} \text{ (лм/м}^2 = \text{люкс)}.$$

5. Сила света источника I в данном направлении — отношение светового потока $d\Phi$ испускаемого в этом направлении внутрь телесного угла $d\Omega$ к величине этого угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ (св)}; \quad I_{\text{ср}} = \frac{\Phi}{4\pi} \text{ (св)}.$$

6. Яркость источника B_φ — характеризует излучение светящейся поверхности в данном направлении:

$$B_\varphi = \frac{I}{S \cdot \cos \varphi} \text{ (св/м}^2 = \text{нт (нит))}.$$

Фотометрические единицы,
характеризующие освещаемую
поверхность

1. *Освещенность поверхности* E — отношение падающего на поверхность светового потока $d\Phi$ к площади этой поверхности dS :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \text{ (лм/м}^2\text{ = люкс)}.$$

2. *Количество освещения (экспозиция)* H — произведение освещенности E на время освещения t :

$$H = Et \text{ (лк} \cdot \text{сек)}.$$

**НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ
РАДИОАКТИВНОГО
И РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ.**

1. *Активность радиоактивного изотопа* B — количество атомов ΔN изотопа, распадающихся в 1 сек:

$$B = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \text{ (кюри)},$$

где N — первоначальное число атомов радиоактивного вещества; dN — число атомов, распадающихся за время dt ; λ — постоянная радиоактивного распада; 1 кюри = $3,7 \times 10^{10}$ расп/сек = $3,7 \cdot 10^4$ резерфорд = 10^6 микрокюри; 1 резерфорд — активность препарата, в котором в 1 сек совершается 10^6 актов распада.

2. *Доза рентгеновского и γ -излучения* D — мера излучения, основанная на его ионизирующей способности; измеряется в рентгенах:

$D = \frac{dW}{dM}$, где dW — энергия рентгеновских и γ -лучей, поглощенная массой dM .

Рентген (р) — доза излучения, при которой суммарный заряд (положительных или отрицательных) ионов, образующихся в $1,293 \cdot 10^{-6}$ кг воздуха, равен $\frac{1}{10c}$ (к), где c — скорость света в вакууме (м/сек).

3. *Поглощенная доза излучения* D_n — энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облучаемого вещества. Поглощенная доза измеряется в радах (*рад*).

Рад — поглощенная доза излучения, равная 0,01 дж на 1 кг облученного вещества: $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ дж/кг}$.

4. *Мощность поглощенной дозы* излучения представляет поглощенную дозу излучения в единицу времени. За единицу мощности поглощенной дозы излучения принимают рад в секунду (*рад/сек*): $1 \text{ рад/сек} = 0,01 \text{ вт/кг}$.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. АКУСТИКА

ЧАСТЬ I

Введение. Измерительная техника совершенствуется и в результате при измерении получают более точные значения. В современных измерительных приборах используются самые разнообразные физические явления, например явление интерференции при измерении длин, поляризации при измерении внутренних напряжений в твердых телах, пьезоэлектрический эффект при измерении параметров колебательных процессов и при излучении мгновенных сил.

Физика располагает обширной измерительной аппаратурой и большим количеством различных методов измерений. Для проведения какого-либо измерения физической величины, например времени, длины, массы, давления, следует из различных методов выбирать наиболее точный для данного случая и не слишком громоздкий, если это возможно. Перечислим основные методы измерения различных физических величин.

Измерение времени в физике проводят главным образом между началом и концом какого-либо явления. В зависимости от величины измеряемых промежутков времени применяются различные методы.

1. Механический — часы, секундомеры, для градуировки которых применяются маятники. Метод маятника

имеет место для измерения продолжительных промежутков времени (см. работу № 3, 4, 5 и т. д.).

2. Стробоскопический — применяется при измерении частоты быстро протекающих процессов. Основой этого метода является совпадение частоты измеряемого процесса с частотой самого прибора (см. работу № 8).

3. Электрический — применяется для точного измерения наиболее коротких промежутков времени. К электрическим методам относятся метод баллистического гальванометра (промежутков времени 10^{-1} — 10^{-3} сек (см. работу № 9), метод осциллографа (см. работы № 16, 17, 49). Осциллографы применяются для измерения самых коротких промежутков времени 10^{-9} сек.

4. Пьезоэлектрические — прецизионные кварцевые резонаторы, предел точности 10^{-7} сек (см. работу № 32).

Измерение температуры в настоящее время проводится в очень широком интервале: от температур, близких к абсолютному нулю, до температур в несколько тысяч градусов. Основные приборы: 1) газовый термометр; 2) ртутный термометр; 3) электрический термометр — термомпара (см. работы № 44, 45); 4) оптический термометр — пирометр (см. работы № 70, 71).

Измерение давлений: для измерения атмосферного давления служат барометры (ртутные, металлические — анероиды); высокое давление ($5 \cdot 10^3$ — $20 \cdot 10^3$ ат) измеряют специальными металлическими, поршневыми и электрическими манометрами; измерение низких давлений (10^{-3} — 10^{-8} мм рт. ст.) производят микроманометрами, вакуумными, термоэлектрическими, ионизационными.

Для измерения линейных и угловых величин применяются различные линейки и угломеры с линейными и угловыми нониусами. Для более точного измерения длины применяют метод микрометрического винта (см. работу № 29) и оптическими методами — интерференционными (см. работу № 62 и др.).

Измерение массы * проводят грубо на обычных технических (рычажных или пружинных) весах, точно — на аналитических весах (см. работу № 2).

* Определение массы тела дано на стр. 39 и 47.

Работа № 1 Измерение линейных и угловых величин

Приборы и принадлежности: штангенциркуль, микрометр, микроскоп с микрометрическим винтом и объективной шкалой, металлическая линейка, угломер, теодолит, измеряемые предметы.

Теория линейного нониуса. Штангенциркуль. Для измерения линейных и угловых величин пользуются различными приборами и инструментами. Наиболее простейшие из них: штангенциркуль, микрометр, микроскоп, угломер и др.

Измерение длины производят масштабными линейками. Величина наименьшего деления такой линейки называется ценой одного деления. Обычно цена одного деления линейки равна 1 мм.

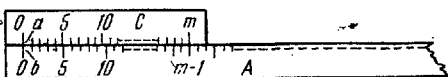


Рис. 2

Если измерение длины производят с точностью до долей миллиметра, то пользуются вспомогательной шкалой измерительного инструмента — нониусом. Нониус бывает линейный — для измерения линейных величин и угловой — для измерения угловых величин.

Линейный нониус представляет собой небольшую линейку C со шкалой, m делений которой равны $m - 1$ делениям шкалы масштабной линейки A . Нониус C может перемещаться по линейке A (рис. 2).

Если a — цена деления нониуса, b — цена деления масштабной линейки, m — число делений на нониусе, то связь между указанными делениями линейки и нониуса следующая:

$$am = (m - 1)b. \quad (1)$$

Получаемая из формулы (1) разность

$$b - a = \frac{b}{m}$$

называется точностью нониуса, т. е. точность нониуса $\frac{b}{m}$ равна отношению цены наименьшего деления масштаба к числу делений на нониусе. Точность нониуса часто бывает равна $\frac{1}{10}$ мм; в этом случае $b = 1$ мм, $m = 10$.

Измерения при помощи нониуса производят следующим образом: к нулевому делению шкалы линейки прикладывают один конец измеряемого тела B , к другому концу тела — нониус C (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что искомая длина тела B

$$L = kb + \Delta L, \quad (2)$$

где k — целое число делений масштабной линейки в мм, укладываемое в измеряемой длине; ΔL — отрезок длины, представляющий доли миллиметра.

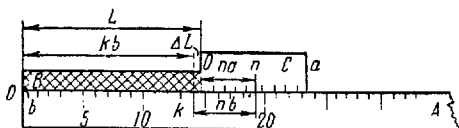


Рис. 3

Обозначим через n то деление нониуса, которое совпадает с любым каким-то делением масштабной линейки; тогда

$$\Delta L = nb - na = n(b - a) = n \frac{b}{m}. \quad (3)$$

Из формул (2) и (3) находим искомую длину

$$L = kb + n \frac{b}{m}.$$

Если положить $b = 1$ мм, $m = 10$ делений (что обычно и бывает), то искомая длина

$$L = \left(k + \frac{n}{10} \right) \text{ мм}. \quad (4)$$

Таким образом, длина измеряемого тела равна целому числу k мм масштабной линейки плюс десятые доли числа n .

Число n показывает тот номер деления нониуса, который совпадает с некоторым делением масштабной линейки.

На рис. 3 приведен пример отсчета длины:

$$L = \left(14 + \frac{5}{10} \right) \text{ мм} = 14,5 \text{ мм}, \text{ так как } k = 14 \text{ мм}, n = 5.$$

Линейный нониус используется в инструменте, который называется *штангенциркулем*.

Штангенциркуль (рис. 4) состоит из стальной миллиметровой линейки A , с одной стороны которой имеется неподвижная ножка B . Вторая ножка D имеет нониус C и может перемещаться вдоль линейки A . Когда ножки B и D соприкасаются, нуль линейки и нуль нониуса должны совпадать. Для того чтобы измерить длину предмета M , его помещают между ножками, которые сдвигают до соприкосновения с предметом (без сильного нажима), и закрепляют винтом E . После этого делают отсчет по линейке и нониусу и вычисляют длину предмета L по формуле (4).

Измерения штангенциркулем и обработка результатов измерений. Штангенциркулем измеряют высоту h и диаметр d цилиндра. Измерения производят следующим образом:

1. Цилиндр помещают между ножками B и D штангенциркуля (слегка зажав ножки) и закрепляют винт E .

2. Измеряют длину и диаметр цилиндра и производят отсчет по шкале линейки A числа целых миллиметров k , расположенных слева от нулевого деления нониуса, и числа делений n шкалы нониуса, совпадающего с любым делением шкалы A . По формуле (4) делают подсчет. Измерения повторяют три раза, слегка поворачивая цилиндр между ножками.

3. Вычисляют абсолютную и относительную ошибки измерения. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу результатов. Примерное расположение записи в таблице следующее:

k	n	h	Δh	$\frac{\Delta \bar{h}}{\bar{h}} \cdot 100\%$	k	n	d	Δd	$\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}} \cdot 100\%$
				×					×
Среднее значение	×				×	×			

Микрометрический винт. Микрометр. Микрометрический винт применяется в точных измерительных приборах (микрометр, микроскоп) и позволяет проводить измерения до сотых долей миллиметра.

Микрометрический винт представляет собой стержень, снабженный точной винтовой нарезкой. Высота подъема винтовой нарезки за один оборот называется шагом микрометрического винта.

Микрометр (рис. 5 и 6) состоит из двух основных частей: скобы *B* и микрометрического винта *A*.

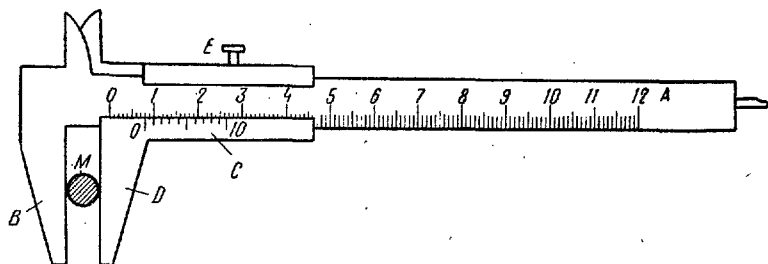


Рис. 4

Микрометрический винт *A* проходит через отверстие скобы *B* с внутренней резьбой. Против микрометрического винта, на скобе, имеется упор *E*. На микрометрическом винте закреплен полый цилиндр (барaban) *C* с делениями по окружности. При вращении микрометрического винта барабан скользит по линейной шкале, нанесенной на стебле *D*.

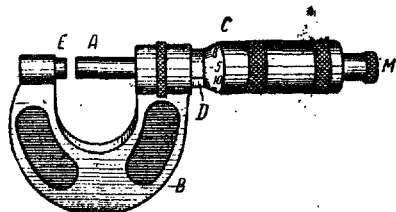


Рис. 5

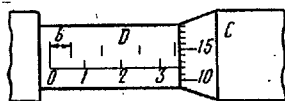


Рис. 6

Наиболее распространен микрометр, у которого цена делений линейной шкалы стебля $b = 0,5$ мм. Верхние и нижние риски шкалы сдвинуты относительно друг друга на полмиллиметра; цифры проставлены только для делений нижней шкалы, т. е. нижняя шкала представляет собой обычную миллиметровую шкалу (рис. 6).

Для того чтобы микрометрический винт *A* передвинулся на 1 мм, необходимо сделать два оборота барабана *C*. Таким образом, шаг микрометрического винта равен 0,5 мм. У такого микрометра на барабане *C* имеется шкала, содержа-

щая 50 делений. Так как шаг винта $b = 0,5$ мм, а число делений барабана $m = 50$, то точность микрометра

$$\frac{b}{m} = \frac{0,5}{50} = \frac{1}{100} \text{ мм.}$$

Для измерения микрометром предмет помещают между упором E и микрометрическим винтом A (рис. 5) и вращают винт A за головку M до тех пор, пока измеряемый предмет не будет зажат между упором E и концом винта A (вращение винта A производится только за головку M , так как в противном случае легко сбить совпадение нулей шкалы стебля D и барабана C).

Числовое значение L измеряемого предмета (в данной работе измеряют толщину проволоки и пластинки) находят по формуле

$$L = kb + n \frac{b}{m}, \quad (5)$$

где k — число наименьших делений шкалы, b — цена наименьшего деления шкалы, m — число всех делений на шкале барабана, n — номер того деления барабана, который в момент отсчета совпадает с осью шкалы стебля D .

Так как в данной работе применяется микрометр, у которого $b = 0,5$ мм, $m = 50$, то формула (5) принимает вид:

$$L = \left(0,5k + \frac{n}{100}\right) \text{ мм.} \quad (6)$$

На рис. 6 отсчет по микрометру показывает:

$$\Delta = \left(0,5 \cdot 7 + \frac{12}{100}\right) \text{ мм} = (3,5 + 0,12) \text{ мм} = 3,62 \text{ мм.}$$

Измерение микрометром и обработка результатов измерений. 1. Измеряемый предмет (толстую проволоку или металлическую пластинку) помещают между упором E и концом микрометрического винта A .

2. Находят значения k и n по шкале стебля D и барабана C . По формуле (6) производят подсчет искомого величин.

3. Измерения диаметра проволоки L и толщины пластинки h повторяют не менее пяти раз в различных местах.

4. Вычисляют абсолютную и относительную ошибки измерений. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ измерений	Проволока					Пластинка						
	k	n	L	ΔL	$\frac{\Delta \bar{L}}{\bar{L}} \cdot 100\%$	$L_{\text{ист}}$	k	n	h	Δh	$\frac{\Delta \bar{h}}{\bar{h}} \cdot 100\%$	$h_{\text{ист}}$
1												
2												
3												
4												
5												
Среднее значение результата	×	×					×	×				

Микроскоп. Микроскоп — оптический прибор, служащий для получения увеличенных изображений. Если микроскоп снабжен микрометрическим винтом или окулярным микрометром, то им можно производить отсчеты по вертикали и по горизонтали.

Микроскоп содержит две части: механическую и оптическую. Механическая часть микроскопа (рис. 7) состоит из основания A , колонки тубусодержателя B , тубуса C , кремальеры с ведущим барашковым колесиком D , предметного столика E и микрометрического винта F .

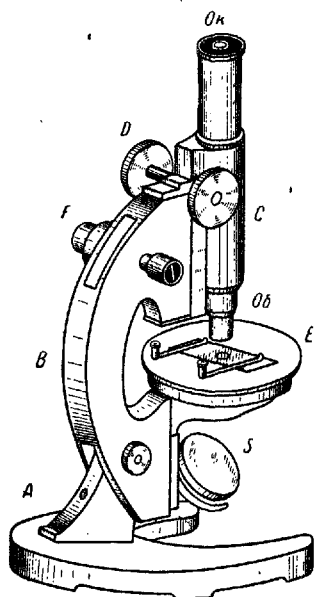


Рис. 7

Вращением барашковых колесиков осуществляется быстрое опускание и поднятие тубуса. Для медленного (точного) перемещения тубуса служит микрометрический винт F . С помощью микрометрического винта можно определять толщину (высоту) исследуемого под микроскопом предмета путем последовательных фокусировок верхней и нижней поверхностей и отсчетов показания на барабанчике микрометрического винта. Барабан микрометрического

винта имеет 50 делений. При повороте на одно деление тубус перемещается на 0,002 мм, что и указано на самом барабане.

Таким образом, шаг винта

$$L = 0,002 \cdot 50 \text{ мм} = 0,1 \text{ мм}.$$

Оптическая часть состоит из объектива *Об*, окуляра *Ок* и зеркала *S*. В фокальной плоскости окуляра микроскопа помещена прозрачная стеклянная шкала с делениями, которая называется окулярным микрометром или окулярной шкалой. При таком расположении окулярной шкалы в поле зрения микроскопа одновременно четко видна шкала и измеряемый объект.

В данной работе микроскопом надо измерить диаметр тонкой проволоки *d* (используя окулярный микрометр) и радиус шарика *r* (используя микрометрический винт).

Измерения и обработка результатов измерений. Измерение диаметра тонкой проволоки окулярным микрометром. 1. Прежде чем измерить диаметр проволоки, необходимо узнать цену деления окулярной шкалы микроскопа. Для этого поступают следующим образом: на столик микроскопа кладут миллиметровый масштаб (металлическую линейку); устанавливают микроскоп на ясное видение миллиметровой шкалы и отсчитывают, сколько мелких делений *n* окулярной шкалы микроскопа соответствуют 1 мм масштаба. Цена деления окулярной шкалы δ будет, очевидно, равна $\frac{1}{n}$ мм.

2. Затем приступают к измерению диаметра проволоки. Проволоку помещают на столик микроскопа (предварительно сняв металлическую линейку) и отсчитывают, сколько мелких делений *m* окулярной шкалы помещается на изображении проволоки.

Диаметр проволоки определяется из равенства:

$$d = m \frac{1}{n} \text{ мм}.$$

Измерение диаметра производят не менее трех раз. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу (см. таблицу на стр. 34).

Измерение радиуса шарика микрометрическим винтом. 1. Микрометрическим винтом тубус микроскопа устанавливают так, чтобы точка, нанесенная сбоку на колонке микроскопа, находилась

δ	m	d
Среднее значение	X	

против верхней черточке, нанесенной на перемещающейся части колонки. Микрометрический винт устанавливается на нуль (штрих нулевого деления барабана должен совпадать с неподвижным штрихом).

2. Измеряемый предмет (шарик) помещают на плоскость стеклянной пластинки, на которой нанесена метка — штрих. С помощью кремальберного винта D получают резкое изображение штриха, нанесенного на пластинке, т. е. фокусируют штрих.

3. Медленно поворачивая микрометрический винт F , получают резкое изображение шарика (резкое изображение края шарика по окружности). При повороте микрометрического винта отсчитывают число полных оборотов N и делают отсчет делений n по барабану микрометрического винта. Радиус шарика определяется по формуле

$$r = (NZ + 0,002 n) \text{ мм},$$

где Z — шаг винта, N — полное число оборотов микрометрического винта, n — номер деления на шкале барабана, которое приходится против неподвижного штриха, $0,002$ — цена наименьшего деления на барабане.

4. Измерение радиуса шарика производят не менее трех раз.

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу.

Z	N	n	r
Среднее значение	X	X	

Теория углового нониуса. Угломер, теодолит. Угловой (круговой) нониус представляет собой небольшую дуговую линейку A , укрепленную на особой штанге — алидаде, разделенную на градусы и на части градуса; нониус можно перемещать по окружности или полуокружности лимба L (металлического круга или полукруга с делениями, рис. 8, а). Цена деления шкалы нониуса не равна цене деления шкалы лимба. Допустим, на нониусе нанесено m делений, их общая длина равна длине $(m-1)$ делений лимба. Если

$$m\alpha = (m-1)\beta. \quad (7)$$

Точность кругового нониуса

$$\beta - \alpha = \frac{\beta}{m} \quad (8)$$

(сравните с формулами линейного нониуса).

Если φ — измеряемый угол, находящийся между k и $(k+1)$ делениями лимба (рис. 8, б), и деление нониуса n совпадает с $(k+n)$ делением лимба, то, очевидно,

$$\varphi = k\beta + n \frac{\beta}{m}, \quad (9)$$

т. е. измеряемый угол равен числу целых делений лимба, содержащихся в нем $k\beta$, сложенному с точностью нониуса $\frac{\beta}{m}$,

умноженной на номер n того деления нониуса, которое совпадает с делением лимба.

На рис. 9 угол равен $141^{\circ}51'30''$, так как $k\beta = 141^{\circ}40'$; $\beta = 20'$ (1° разбит на три части); $m = 40$ маленьких делений; $n = 23$ маленьких делений.

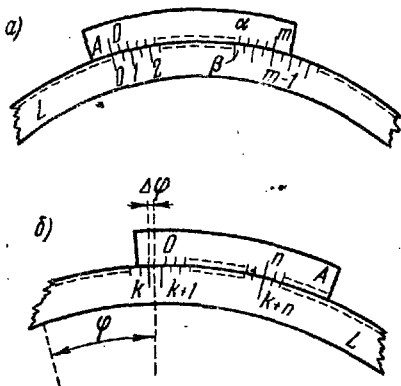


Рис. 8

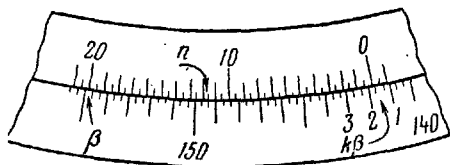


Рис. 9

Таким образом, угол $\varphi = 141^{\circ}40' + 23\frac{20}{40} = 141^{\circ}40' + 11,5 (11'30'') = 141^{\circ}51'30''$.

Угловой нониус применяется в угломерах, гониометрах, катетометрах и других измерительных приборах.

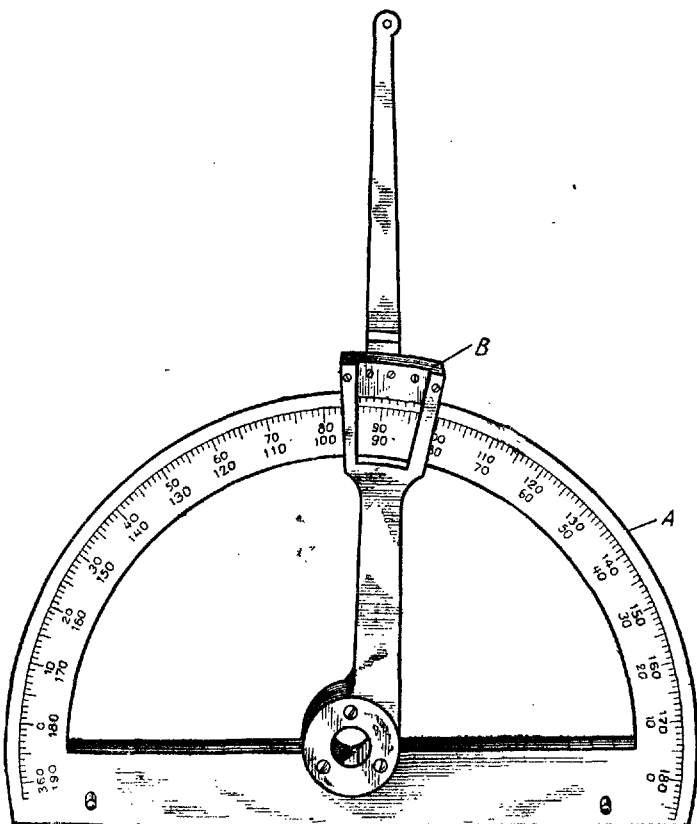


Рис. 10

Измерения и обработка результатов измерений. Измерение углов угломером. Угломер (рис. 10) состоит из двух основных частей: лимба *A* и визира *B*. Лимб представляет собой дуговую металлическую линейку, разделенную на градусы и минуты. Визиром служит радиус-указатель, укрепленный на оси в центре окружности лимба.

Отсчет визира производят при помощи дугового нониуса, укрепленного на конце радиуса. Шкала нониуса имеет нулевое деление в середине шкалы, а лимб имеет две шкалы с противоположными направлениями.

При измерении угла следует пользоваться той половиной шкалы нониуса, направление которой совпадает с направлением шкалы лимба.

Угломером измеряют в данной работе различные углы, нанесенные на поверхности пластинки. Измерения проводят в следующем порядке:

1. Определяют цену деления β лимба.

2. Определяют число малых делений m полушкалы нониуса.

3. Определяют точность нониуса $\frac{\beta}{m}$.

4. Проверяют совпадение нулевой черты нониуса с нулевой чертой лимба. Если совпадения нет, необходимо найти величину систематической ошибки. Величина систематической ошибки определяется по совпадению одной из черточек нониуса с какой-либо чертой шкалы лимба. Если нулевая черта сдвинута вправо от нулевой черты шкалы лимба, то величина систематической ошибки считается отрицательной, если влево — положительной.

5. Совмещают ось вращения визира (точки пересечения двух взаимно перпендикулярных линий) с вершиной измеряемого плоского угла, а основание угломера — с одной из сторон измеряемого угла.

6. Перемещают визир-указатель до совпадения с другой стороной измеряемого угла.

7. Производят отсчет по шкале лимба целых делений, расположенных справа от нулевого нониуса, если отсчет по лимбу производится слева, и слева от нулевого деления нониуса, если отсчет по лимбу производится справа.

8. Умножают число отсчитанных делений k на цену деления лимба β , т. е. определяют $k\beta$.

9. Производят отсчет делений по шкале нониуса, замечая и беря то деление n по шкале последнего, которое совпадает с каким-либо делением лимба.

10. По формуле (9) определяют измеряемый угол с учетом величины и знака систематической ошибки.

Измерения угла φ производят не менее трех раз, находят среднее значение $\varphi_{\text{ср}}$. Результаты измерения заносят в таблицу.

$k\beta$	β	m	$\frac{\beta}{m}$	n	φ

Измерение углов теодолитом. Наиболее распространенным прибором для измерения углов является теодолит (рис. 11). Применяется он в геодезии, авиации, артиллерии и др.

Тремя подъемными винтами A с помощью двух уровней P ось теодолита приводится в горизонтальное положение. На вертикальной оси укреплен горизонтальный лимб L — металлический горизонтальный круг, разделенный на градусы и минуты.

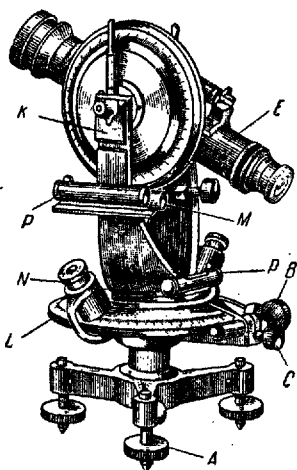


Рис. 11

В геодезии нониус принято называть верньером. Над лимбом вращается алидада. На алидаде нанесены верньеры с лупами N и укреплены подставки K для зрительной трубы E . На подставках лежит горизонтальная ось, на которой укреплена зрительная труба. Алидада и зрительная труба закрепляются винтами C и M . Поворот трубы в горизонтальной плоскости дает угол, который откладывается на горизонтальном лимбе L и отсчитывается на нем при помощи

верньеров. Для точной наводки имеются микрометрические винты B .

При измерении горизонтальных углов лимб остается неподвижным, а алидада со зрительной трубой вращаются; при измерении же вертикальных углов, наоборот, лимб со зрительной трубой вращаются, а алидада должна быть неподвижна. Для этого лимб и алидада имеют винты для

закрепления и наводящие винты для плавного и малого перемещения после закрепления.

Измерения горизонтальных углов теодолитом состоят в следующем:

1. Проверяют правильность установки прибора по уровням.

2. Определяют β — цену наименьшего деления лимба L .

3. Находят точность верньера по формуле $\frac{\beta}{m}$, где m — число делений верньера от нулевого до последнего штриха.

4. Устанавливают углы, равные $3^{\circ}21'$; $20^{\circ}33'33''$; $130^{\circ}62'30''$; $162^{\circ}53'30''$.

Установку углов показать преподавателю.

Работа № 2

Точное взвешивание

Приборы и принадлежности: аналитические весы, разновес (набор разновесок), взвешиваемое тело.

Описание весов и правила обращения с ними. Масса тела m — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела в поступательном движении. Отношение масс двух тел равно отношению их весов. На этом основано сравнение масс тел с помощью рычажных весов. Весом тела (или силой тяжести) называется сила P , с которой неподвижное относительно Земли тело давит на опору вследствие притяжения его к Земле. Так как изменение веса тел для различных точек поверхности Земли невелико, то можно считать, что на Земле тело с массой в 1 кг весит один килограмм.

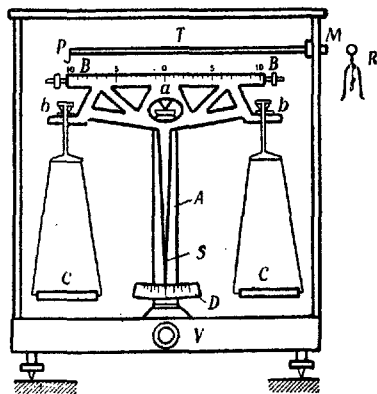


Рис. 12

Для взвешивания тел пользуются различного рода весами (техническими, аналитическими и др.). Для взвешивания небольших тел с высокой точностью (до десятых долей миллиграмма) применяются аналитические весы (рис. 12).

Основной частью аналитических весов является равноплечий рычаг BB , называемый коромыслом, опорой которого служит ребро стальной закаленной призмы a , находящейся в середине коромысла и опирающейся на агатовую полированную пластинку, укрепленную наверху колонки A . На концах коромысла имеются призмы bb , служащие для подвешивания чашек CC . Ребра крайних и средних призм параллельны и лежат в одной плоскости. Если на чашках нет грузов, то коромысло должно устанавливаться горизонтально. Для определения положения коромысла служит длинная стрелка S , прикрепленная к его середине.

Конец стрелки S движется перед шкалой D , находящейся у основания колонки A . При горизонтальном положении коромысла стрелка должна указывать на среднее деление шкалы.

Когда весы не находятся в работе, их необходимо арретировать. Это производится действием особого приспособления внутри колонки весов, при помощи которого коромысло и чашки несколько приподнимаются вверх, вследствие чего их призмы освобождаются от давления. Арретирование и освобождение коромысла производятся посредством головки V , помещающейся в нижней части весов, вращением ее в ту или иную сторону.

При взвешивании употребляются специальные разновески, вес которых известен и указан на них. Чтобы не употреблять разновесок меньше 10 мг, пользуются так называемым рейтером R , представляющим собой тонкую проволоку, согнутую в виде крючка (с ушком). Рейтер помещается на одно из плеч коромысла, разделенное обычно на 10 равных частей. Помещение и снятие рейтера производится особым приспособлением. Оно состоит из латунного стержня T , проходящего сквозь правую боковую стенку ящика весов и перемещающегося параллельно коромыслу. Стержень может вращаться вокруг своей оси; на внешнем конце он снабжен головкой M , а на внутреннем — боковым рычажком P и выступающим штифтом; этот последний вводится в ушко рейтера и подхватывает его. Если рейтер помещен на первое, второе, третье и т. д. деления плеча коромысла, считая от середины, то его действие равносильно действию положенного на чашку груза $1, 2, 3$ мг и т. д.

Для предохранения от пыли и воздушных потоков весы заключены в застекленный шкафчик. При взвешивании на

аналитических весах необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не нагружать весы больше их предельной нагрузки. Предельная нагрузка весов указывается на самих весах.

2. Арретировать (освободить) коромысло весов следует медленно и плавно; если весы качаются, то арретировать надо весьма осторожно и в тот момент, когда стрелка проходит через положение равновесия, иначе коромысло получает толчки.

3. Нельзя класть на чашки или снимать с них грузы и производить перестановку рейтера до тех пор, пока весы не будут арретированы.

4. Взвешиваемое тело кладется на левую чашку, а разновески — на правую, причем разновески следует помещать последовательно, начиная с больших грузов.

5. Грузы располагаются на чашке так, чтобы общий центр тяжести приходился примерно посередине чашки.

6. Разновески можно брать только пинцетом (но не руками); мелкие разновески плоской формы (доли грамма) берутся пинцетом за загнутые уголки. Снимая разновески с весов, следует класть их обязательно в ящик на определенные места.

7. Не следует освобождать полностью коромысло, пока чашки еще мало уравновешены; его освобождают лишь настолько, чтобы можно было определить, которая из чашек перевешивает.

8. При малой разнице в весе взвешиваемого тела и разновесок коромысло совершает колебательное движение. Во время наблюдения качания коромысла дверцы весов должны быть закрыты.

9. Нельзя оставлять грузы надолго на чашках. Когда взвешивание окончено, весы надо арретировать, грузы снять и закрыть дверцы.

Измерения и обработка результатов измерений. Для того чтобы произвести взвешивание, необходимо: а) определить нулевую точку весов; б) определить чувствительность весов; в) произвести взвешивание; г) ввести поправки на кажущуюся потерю веса тела в воздухе; д) ввести поправку на неравенство плеч коромысла.

Определение нулевой точки весов. Нулевой точкой, или точкой равновесия, весов называют то деление, на котором при отсутствии трения останавливается указатель стрелки, когда коромысло перестает коле-

баться. Чтобы исключить влияние трения, не ожидают прекращения колебаний коромысла, а определяют нулевую точку по методу качаний. Осторожно освободив коромысло и пропустив несколько колебаний, замечают положение конца стрелки в моменты наибольших отклонений по шкале D (рис. 13).

Вследствие трения колебания постепенно затухают. Обычно нулевая точка ненагруженных весов определяется из пяти колебаний: берутся три отсчета в одну и два в другую сторону. Например, a_1, a_3 и a_5 — отсчеты влево, а a_2 и a_4 — вправо (рис. 13). Взяв среднее арифметическое из отсчетов в каждую сторону, получают значение нулевой точки N_0 :

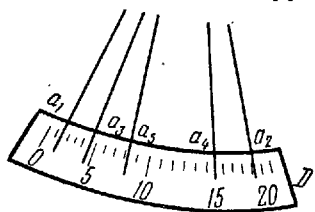


Рис. 13

$$N_0 = \frac{\frac{a_1 + a_3 + a_5}{3} + \frac{a_2 + a_4}{2}}{2} \quad (10)$$

Определение нулевой точки следует произвести несколько раз и найти среднее значение N_0 . Результаты наблюдений (и вычислений) заносятся в таблицу:

№ опыта	Отсчеты отклонения стрелки					N_0 ненагруженных весов
	влево			вправо		
	a_1	a_3	a_5	a_2	a_4	
1						$N_{0\text{ср}}$
2						
3						

Определение чувствительности весов. Если на одну из чашек точно уравновешенных весов поместить некоторый добавочный небольшой перегрузок P_n , то это вызовет смещение стрелки весов от нулевого положения на некоторое число делений n . Чем чувствительнее весы, тем на большее число делений сместится стрелка при

* Если шкала имеет нуль посередине, то тогда значения a_1, a_3, a_5 берут со знаком минус.

той же величине добавочного перегрузка P_n . Отношение числа делений шкалы n , на которое смещается стрелка весов, к весу добавочного перегрузка P_n , вызвавшего его смещение, называется чувствительностью весов:

$$\frac{n}{P_n} \left[\frac{\text{дел}}{\text{мг}} \right].$$

Обратная величина

$$\frac{P_n}{n} \left[\frac{\text{мг}}{\text{дел}} \right]$$

называется ценой одного деления.

Следовательно, чувствительность весов можно определить найдя величину смещения стрелки весов (в делениях шкалы), обусловленную хотя бы перегрузкой в 1 мг. В этом случае нулевую точку (нагруженных весов) определяют так. На первое деление правого плеча коромысла арретированных весов навешивают рейтер, что соответствует нагрузке в 1 мг. Затем, освободив коромысло, находят нулевую точку весов $N'_{\text{оср}}$ так же, как находили нулевую точку ненагруженных весов $N_{\text{оср}}$. Число делений шкалы n , на которое смещается стрелка весов под действием нагрузки P_n (в данном случае $P_n = 1 \text{ мг}$), находится как разность между $N_{\text{оср}}$ и $N'_{\text{оср}}$, т. е.

$$n = N_{\text{оср}} - N'_{\text{оср}}.$$

Результаты наблюдений и вычислений заносятся в таблицу, аналогичную таблице при определении нулевой точки весов.

В з в е ш и в а н и е. Перед взвешиванием тела на аналитических весах целесообразно приблизительно определить его вес на технических весах, т. е. более грубых. Взвешивание производится следующим образом.

Приоткрывают боковые дверки арретированных весов, кладут на левую чашку взвешиваемое тело, а на правую — гирьку из равновеса, соответствующую приблизительно весу данного тела. Закрыв дверки осторожно, освобождают арретир, наблюдая за отклонением стрелки весов. Если положенная на чашку гирька перетягивает, то, арретировав весы, снимают гирьку и вместо нее кладут другую, следующую по порядку в равновесе, и т. д. Гирьками взвешивание производится до 10 мг, а рейтером до 1 мг, что достигается перемещением его по шкале коромысла, начиная с нулевого деления, до тех пор, пока не будут найдены на

шкале коромысла два таких соседних положения рейтера, для которых N_2 соответствует перегрузке, а N_1 — недогрузке. Следовательно, N_1 лежит правее ранее найденного значения N_0 , а N_2 — левее, т. е.

$$N_2 < N_0 < N_1.$$

Значение N_1 соответствует весу P мг, а N_2 — $(P + 1)$ мг. Таким образом, для приведения весов к нулевой точке веса P мг недостаточно, а $(P + 1)$ мг много. Необходимо добавить к весу P мг добавочный груз X мг, чтобы уравновесить весы.

Так как разновесу в 1 мг соответствует отклонение $N_1 - N_2$, то вес X вызовет отклонение: $N_1 - N_0$; из пропорции:

$$\frac{X}{1} = \frac{N_1 - N_0}{N_1 - N_2}$$

получим

$$X = \frac{N_1 - N_0}{N_1 - N_2}. \quad (11)$$

Определение N_1 и N_2 производится методом, аналогичным определению нулевой точки весов $N_{\text{оср}}$.

Результаты измерений (и вычислений) заносятся в таблицу.

№ опыта	Вес разновеса P'	Вес рейтера p' для значения N_1	Отсчет отклонений стрелки						Нулевая точка весов		X	Вес тела P_1
			вправо			влево			при недогрузке N_1	при перегрузке N_2		
			a_1	a_2	a_3	a_2	a_4					
1												
2												
3												
1												
2												
3												
Среднее значение												

Таким образом, искомый вес тела в воздухе P_1 складывается из веса разновесок P' на правой чашке весов, веса рейтера p' для значения N_1 и добавочной нагрузки X , вычисляемой по формуле (2):

$$P_1 = (P' + p' + X) \text{ мг.}$$

Поправка на кажущуюся потерю веса в воздухе. На каждое тело, погруженное в воздух,

действует выталкивающая сила, равная весу воздуха в объеме тела, в результате чего при взвешивании в воздухе испытуемое тело и разновески как бы теряют в своем весе столько, сколько весит вытесненный им воздух.

В зависимости от того, имеет ли взвешиваемое тело больший или меньший объем по сравнению с уравнивающими его разновесками, оно вытесняет больше или меньше воздуха, чем разновески, вследствие чего найденное значение веса тела в воздухе P отличается от веса этого тела в вакууме P_0 . Этот вес называется истинным весом; он может быть вычислен по формуле

$$P_0 = P_1 \left[1 + \rho_v \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right],$$

где ρ_v — плотность воздуха в условиях опыта, ρ_m — плотность взвешиваемого тела, ρ_p — плотность материала, из которого изготовлены разновески.

Разница между кажущимся и истинным весом не превышает 0,2%, поэтому на практике часто ограничиваются определением только кажущегося веса.

П о п р а в к а н а н е р а в е н с т в о п л е ч к о р о м ы с л а. При взвешивании на рычажных весах возможны ошибки вследствие неравенства плеч коромысла.

Существуют различные методы взвешивания, в которых этот дефект не оказывает отрицательного влияния на точность взвешивания. В частности, метод двойного взвешивания состоит в том, что по всем приведенным выше правилам производят два взвешивания: в одном случае испытуемое тело помещают на левой чашке, в другом — на правой. Из полученных таким образом значений веса P_1 и P_2 вычисляют среднее арифметическое значение

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ И ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Введение. Простейшая форма движения — это механическое движение, которое характеризуется изменением взаимного расположения тел или их частей относительно друг друга в пространстве с течением времени.

Абсолютно твердое тело или просто твердое тело можно рассматривать как систему материальных точек, расстояние между которыми неизменно.

Любое сложное движение твердого тела состоит из простых движений: *поступательного и вращательного*.

I. *Поступательным* движением твердого тела называется такое движение, при котором каждая линия, соединяющая две любые точки тела, сохраняет свое неизменное направление в пространстве.

1. При поступательном движении, в случае *равномерного прямолинейного* движения, скорость $v = \frac{ds}{dt} = \text{const}$, путь, проходимый телом

$$s = \int_0^t v dt, \quad (1)$$

ускорение $a_t = a_n = 0$, где t — время, a_t и a_n — тангенциальное и нормальное ускорения.

Если движение *прямолинейное, но не равномерное* $a_n = 0$, $a_t \neq 0$.

При *равнопеременном прямолинейном* движении

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = a_t = \frac{dv}{dt} = \text{const} \text{ и } v = v_0 + at, \quad (1a)$$

где v_0 — начальная скорость (при $t = 0$), v — скорость в момент времени t . Для *ускоренного движения* $a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} > 0$, для *замедленного* $a < 0$. Длина пути s при этом равна:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (16)$$

Если $v_0 = 0$, то

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Для простейшего случая *криволинейного движения* — *равномерного движения материальной точки по окружности*:

$$a_t = 0; a_n \neq 0; v = \text{const}; a_n = \frac{v^2}{R} = \text{const}.$$

2. *Основной закон динамики поступательного движения* — второй закон — Ньютона — записывается и формулируется так:

$$F = ma; \quad F = m \frac{d^2s}{dt^2};$$

изменение движения пропорционально приложенной силе F и происходит в том направлении, в котором действует сила.

Силой называется векторная физическая величина, которая является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей. В результате этого воздействия тела получают ускорения.

Масса тела m — физическая величина, характеризующая данное тело и численно равная весу тела P , деленному на ускорение свободного падения g , т. е.

$$m = \frac{P}{g}.$$

Масса — величина скалярная и является мерой инертности тела в поступательном движении и служит его динамической характеристикой. Ускорение a , приобретаемое телом, по направлению совпадает с силой, действующей на тело.

Второй закон динамики можно записать в другом виде:

$$F \cdot dt = d(mv).$$

Элементарное изменение импульса тела (mv), равно элементарному импульсу действующей на него силы ($F \cdot dt$), где mv — импульс тела или количество движения тела, $d(mv)$ — элементарное изменение вектора импульса, $F \cdot dt$ — элементарный импульс силы F за малый промежуток времени dt .

II. *Вращательным движением твердого тела* называется такое движение, при котором траектории всех точек тела являются концентрическими окружностями с центром на одной прямой, называемой осью вращения.

1. Вращательное движение характеризуется *угловой скоростью* вращения ω и *угловым ускорением* ε , которые определяются по формулам:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}; \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (2)$$

где φ — угловое перемещение тела или угол поворота. Длина s дуги окружности, радиус которой r , равна: $s = \varphi r$.

Связь между линейной v и угловой ω скоростями вращающегося тела и линейным a_r и угловым ε ускорениями следующая:

$$v = \omega r, \quad a_r = \varepsilon r, \quad (3)$$

где r — расстояние вращающихся точек до оси вращения, ω и ε — векторные величины. Вектор ω направлен по оси вращения так, что из его конца вращение видно *происходящим против часовой стрелки* (правый винт) (рис. 14, б и в).

Направление вектора ε совпадает с направлением вектора ω , если ω возрастает, и вектор ε направлен в противоположную сторону, если ω убывает (рис. 14, б и в).

2. При вращательном движении тела изменение его кинематических и динамических величин зависит от действующего на тело *вращающего момента* и от *момента инерции* тела.

Вращающим моментом, или моментом вращающей силы, называется векторная физическая величина M , равная векторному произведению радиуса-вектора r проведенному из точки O в точку приложения силы A , на вектор силы F (рис. 14, а и в):

$$M = [r \times F] *.$$

Вектор M направлен по оси вращения и совпадает с направлением угловой скорости ω . Векторы r , F и M образуют правый винт, т. е. если смотреть из конца вектора M , то вращение по кратчайшему расстоянию от r к F , происходит против часовой стрелки.

Моментом силы относительно точки или неподвижной оси называется скалярная величина, численно равная произведению силы F на ее плечо l , т. е. на кратчайшее расстояние от оси вращения до прямой, вдоль которой действует сила:

$$M = Fl.$$

Так как $l = r \cdot \sin \alpha$ (рис. 14, в), то

$$M = Fr \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

* $|[r \times F]|$ — модуль векторного произведения, равен произведению $|r|$ на $|F|$ и на $\sin(\angle r, F)$.

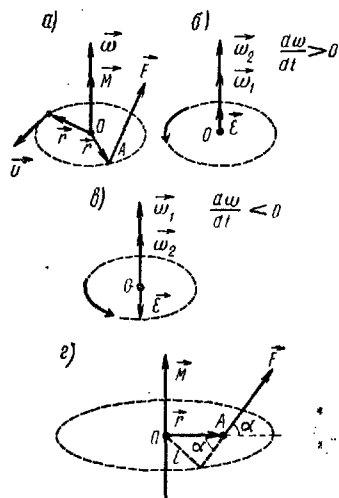


Рис. 14

Моментом инерции J материальной точки относительно какой-либо оси называется произведение массы m этой точки на квадрат расстояния ее r до оси:

$$J = mr^2. \quad (5)$$

Момент инерции тела относительно какой-либо оси равен сумме моментов инерции всех материальных точек тела относительно этой оси:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (5a)$$

Для тела с плотностью ρ момент инерции вычисляется интегрированием

$$J = \int_V \rho r^2 \cdot dV, \quad (5b)$$

где dV — элемент объема.

Момент инерции является физической величиной, характеризующей инертность тела при изменении им угловой скорости под действием вращающего момента.

Если ось вращения тела произвольна, то по теореме Штейнера момент инерции J_a тела относительно произвольной оси OO' равен сумме моментов инерции этого тела J_0 относительно оси CD , проходящей параллельно оси OO' через центр тяжести тела, и произведению массы этого тела на квадрат расстояния a между осями CD и OO' (см. рис. 34):

$$J_a = J_0 + ma^2. \quad (6)$$

Основной закон динамики вращательного движения твердого тела, для которого $J = \text{const}$, запишется так:

$$M = J\varepsilon, \quad (7)$$

где M — вращающий момент, J — момент инерции тела, ε — угловое ускорение.

Этот закон можно записать в другом виде:

$$M \cdot dt = d(J\omega). \quad (8)$$

Импульс вращающего момента $M \cdot dt$ равен изменению момента количества движения тела $d(J\omega)$, к которому приложен этот вращающий момент M . Вектор $M \cdot dt$ называется импульсом вращающего момента; он направлен так же, как и вектор M . Вектор $J\omega$ называется моментом коли-

чества движения или моментом импульса тела. Направление $J\omega$ совпадает с направлением угловой скорости ω .

Если имеем точку, вращающуюся по окружности с линейной скоростью $v = \omega r$, то момент количества движения точки $J\omega = mr^2 \frac{v}{r} = mvr$.

Вращающееся тело обладает кинетической энергией вращательного движения

$$E_B = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (9)$$

Если сопоставить законы поступательного и вращательного движения, то легко видеть, что момент инерции во вращательном движении выполняет роль массы в поступательном движении, а момент силы — роль силы. Как масса тела характеризует инертность тела в поступательном движении, так момент инерции характеризует инертность тела во вращательном движении.

Математическая запись законов поступательного и вращательного движений дана в таблице.

Поступательное движение		Вращательное движение	
Путь	s	Угловое перемещение	φ
Линейная скорость	$v = \frac{ds}{dt}$	Угловая скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
Линейное ускорение	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$
Масса	m	Момент инерции	J
Сила	F	Момент силы	M
Количество движения	mv	Момент количества движения	$J\omega$
Второй закон динамики	$F = \frac{d(mv)}{dt};$ $F = ma$	Второй закон динамики	$M = \frac{d(J\omega)}{dt};$ $M = J\varepsilon$
Закон сохранения количества движения	$\sum_{i=1}^n m_i v_i =$ $= \text{const}$	Закон сохранения момента количества движения	$\sum_{i=1}^n J_i \omega_i =$ $= \text{const}$
Работа	$A = Fs$	Работа	$A = M\varphi$
Кинетическая энергия	$E = \frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$E_B = \frac{J\omega^2}{2}$

Приборы и принадлежности: рейка на штативе длиной в 1 м с электромагнитом и отвесом, стальной шарик, электросекундомер, трансформатор (120/12 в), источник постоянного тока, выключатель.

Теория метода и описание установки. При небольших высотах падение стального шарика диаметром 2—3 см можно практически считать свободным, так как в этом случае можно принять ускорение силы тяжести постоянным и сопротивлением воздуха пренебречь.

В таком случае падение шарика будет происходить по законам равноускоренного движения без начальной скорости. Если шарик отпустить с некоторой высоты H , то

$$H = \frac{gt^2}{2}, \quad (10)$$

где H — высота падения шарика, g — ускорение силы тяжести, t — время падения шарика. Отсюда

$$g = \frac{2H}{t^2}. \quad (11)$$

Эта формула будет расчетной для определения ускорения силы тяжести*.

Установка для проведения опыта (рис. 15) состоит из рейки A длиной в 1 м с делениями, укрепленной с помощью шарнира B на массивной треноге C . Шарнирное соединение позволяет изменять наклон рейки влево и вправо. Тренога C имеет винты D . Для установки рейки в вертикальном положении необходимо пользоваться одновременно шарниром B и винтами D . Рейка имеет прямоугольные пазы, в которых может перемещаться ползунок с электромагнитом E . Электромагнит служит для удерживания стального шарика. К нижней части электромагнита с помощью винта K прикрепляется отвес. В нижней части рейки имеется

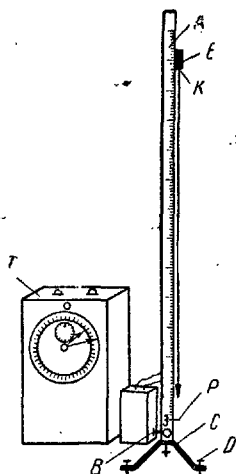


Рис. 15

* Определение силы тяжести смотрите на стр. 39 (работа № 2).

рубильник P , автоматически (при ударе шарика) выключающий электросекундомер T . Устанавливая электромагнит на различную высоту вдоль рейки, можно изменять высоту падения H шарика.

Таким образом, определяя время падения шарика с различных высот, можно найти опытным путем ускорение силы тяжести.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Ознакомиться с установкой и порядком включения приборов. Установка дается в собранном виде. По окончании работы схему установки не разбирать, а только выключить электроприборы. Установить рейку в вертикальном направлении с помощью отвеса. После установки отвес снять. Проверить попадание стального шарика на выступ рубильника при его падении.

Порядок включения приборов следующий: а) включают секундомер через трансформатор в осветительную сеть; б) включают постоянный ток для питания электромагнита; в) замыкают рубильник P у основания рейки.

Первый раз все включения произвести под наблюдением преподавателя или лаборанта. Для приведения прибора в действие надо замкнуть ключ и немедленно после падения шарика выключить его.

№ измерения	H	t^2	t^2	g	Δg	$\frac{\Delta g}{g} 100\%$	$g_{\text{нст}}$
1						×	×
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
Среднее значение		×	×				

2. Устанавливая электромагнит на различных высотах, производят наблюдения t для каждой высоты H .

3. По полученным результатам измерений вычисляют ускорение силы тяжести,

4. Строят график, откладывая по оси абсцисс t^2 , а по оси ординат H . Что будет представлять из себя этот график?

Все результаты вычислений заносят в таблицу (см. таблицу на стр. 52).

Работа № 4

Изучение движения тел по наклонной плоскости

Приборы и принадлежности: наклонная плоскость, набор тел правильной формы, ящик с песком, отсчетная линейка.

Теория метода и описание установки. Исследуемое тело (шар, цилиндр, полый цилиндр) в точке A обладает запасом потенциальной энергии mgh (рис. 16). В точке B тело приобрело кинетическую энергию поступательного движения $\frac{mv^2}{2}$ и вращательного движения $\frac{J\omega^2}{2}$.

По закону сохранения энергии

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}. \quad (12)$$

В данной работе скорость v тела в точке B находят экспериментальным путем и теоретически по формуле (12).

Определение скорости v_T тела *теоретически* можно сделать следующим образом.

Из формулы (12) и соотношения $\omega = \frac{v}{R}$

$$v_T = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \frac{J}{mR^2}}} = k \sqrt{2gh}, \quad (13)$$

где

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{J}{mR^2}}}, \quad (14)$$

R — радиус испытуемого тела, ω — его угловая скорость в точке B .

При вычислении скорости шара следует брать момент инерции $J_{ш} = \frac{2}{5} mR_{ш}^2$ (см. стр. 443), для сплошного тела —

цилиндра $J_{ц} = \frac{1}{2} mR_{ц}^2$, для тонкостенного полого цилиндра $J_{п.ц} = mR_{п.ц}^2$.

Подставляя значения J в формулу (14), находят значения k для всех тел. Из формулы (13), зная высоту наклонной плоскости h , определяют скорость v_T .

Экспериментальное определение скорости проводят так. В точке B тело имеет скорость v , которая может быть представлена в виде двух компонент v_x и v_y — скорости в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Из рис. 16 $v_x = v \cdot \cos \alpha$ и $v_y = v \cdot \sin \alpha$.

Отрезки x и y могут быть определены из законов поступательного движения (см. введение).

В нашем случае

$$\begin{aligned} x &= v_x t, \\ y &= v_y t + \frac{gt^2}{2} = \frac{v_y}{v_x} x + \frac{gt^2}{2} = \\ &= x \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{gt^2}{2}, \quad (15) \end{aligned}$$

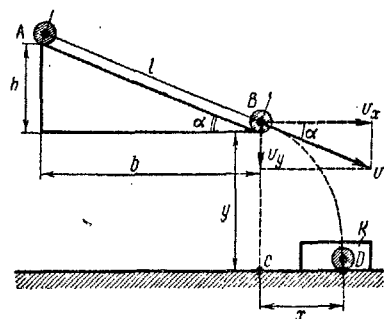


Рис. 16

где x — горизонтальное перемещение CD тела, y — путь, проходимый телом по вертикали BC , t — время перемещения тела по CD и BC одинаково и равно:

$$t = \frac{x}{v_x} = \frac{x}{v \cdot \cos \alpha}.$$

Отсюда искомая скорость

$$v = \frac{x}{t \cdot \cos \alpha}. \quad (16)$$

Из формулы (15) найдем время

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \sqrt{y - x \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (17)$$

и подставим в формулу (16). После подстановки получим окончательное выражение для определения скорости v тела экспериментальным путем

$$v = \frac{x \sqrt{g}}{\sqrt{2} \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{y - x \cdot \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (18)$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Измеряют длину наклонной плоскости l , расстояние по горизонтали b , высоту подъема h и вычисляют $\cos \alpha$ и $\operatorname{tg} \alpha$ для трех случаев высоты h .

2. Взвешивают испытуемое тело (шар, цилиндр, полый цилиндр), измеряют радиусы образцов и пускают тело из точки A по наклонной плоскости. Измеряют расстояния $x = CD$ (от точки C до отметки на песке) и $y = CB = \text{const}$ для различных высот.

3. По формуле (18) подсчитывают скорости тел в точке B . Полученные значения сравнивают со значениями, вычисленными для тех же образцов по формуле (13). По формуле (17) находят время t для различных образцов.

Все вычисления записывают в таблицу.

№ измерения	h	b	x	$\cos \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	Образец	$l =$		$y =$		
							v	J	k	v_{Γ}	t
1 2 3						Шар	$J_{\text{ш}} =$				
1 2 3						Цилиндр сплошной	$J_{\text{ц}} =$				
1 2 3						Цилиндр полый	$J_{\text{п.ц}} =$				

Работа № 5

Изучение законов вращательного движения

Приборы и принадлежности: прибор, состоящий из шкива, четырех стержней и четырех грузов (маятник Обербека), груз, штангенциркуль, масштабная линейка, секундомер.

Теория метода и описание установки. Законы вращательного движения можно изучать при помощи прибора, изображенного на рис. 17. Прибор состоит из шкива L радиуса r , закрепленного на оси O , четырех стержней, расположенных под углом 90° друг к другу, и четырех одинаковых цилиндрических грузов m , которые можно перемещать вдоль стерж-

ней и закреплять на определенном расстоянии от оси. Грузы закрепляются симметрично, т. е. так, чтобы центр тяжести совпадал с осью вращения.

Прибор приводится во вращательное движение грузом P , прикрепленным к концу шнура, навитого на шкив. Груз P , удерживаемый на высоте h над какой-либо поверхностью (например, пола), обладает некоторой потенциальной энергией m_1gh , где g — ускорение свободного падения, а m_1 — масса груза.

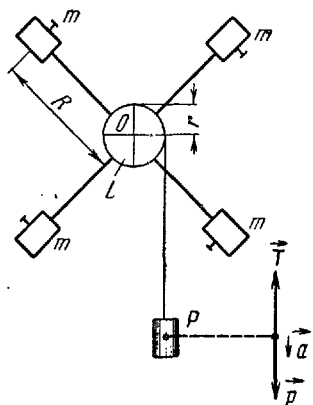


Рис. 17

Если предоставить возможность грузу P падать, то это падение будет происходить с ускорением a . При этом шкив со стержнями и расположенными на нем грузами будет вращаться с угловым ускорением ϵ .

При падении груза P потенциальная энергия соответственно переходит в кинетическую энергию поступательного движения груза $\frac{m_1v^2}{2}$ и кинетическую энер-

гию вращательного движения прибора $\frac{J\omega^2}{2}$, где J — момент инерции прибора.

На основании закона сохранения энергии

$$m_1gh = \frac{m_1v^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (19)$$

где v — скорость груза P в момент касания пола, ω — угловая скорость вращающейся части прибора.

Сила, под действием которой груз m_1 падает вниз,

$$F = P - T,$$

где P — сила тяжести, T — сила натяжения шнура.

Отсюда

$$T = P - F$$

или

$$T = m_1g - m_1a = m_1(g - a).$$

Сила T сообщает угловое ускорение вращающемуся телу
Момент этой силы

$$M = Tr = m_1 (g - a) r, \quad (20)$$

где r — радиус шкива.

Так как поступательное движение груза равноускоренное без начальной скорости, то ускорение

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (21)$$

Из формул (20), (7), (21) находим:

$$J = \frac{m_1 r^2 t^2 \left(g - \frac{2h}{t^2} \right)}{2h}. \quad (22)$$

Для определения момента инерции J нужно определить опытным путем все величины, стоящие в правой части формулы (22); ускорение g свободного падения известно.

Измерения и обработка результатов измерения. Исследование законов вращательного движения. 1. Измеряется штангенциркулем диаметр малого и большого шкива (r_1 и r_2).

2. На технических весах определяется масса m_1 груза (с точностью до 0,5 г).

3. Наматывается на шкив нить, на конце которой прикреплен груз P так, чтобы он был на высоте h над уровнем пола. Масштабной линейкой измеряется h .

4. Предоставив возможность грузу P падать, по секундомеру определяют время падения. Секундомер включают в момент начала падения груза и останавливают одновременно с ударом груза о пол.

По формулам (21), (20), (3) и (7) вычисляют линейное ускорение, вращающий момент, действующий на систему, ее угловое ускорение и момент инерции.

Опыты проводятся 3—5 раз при определенном симметричном расположении цилиндрических грузов на стержнях на одном и том же расстоянии от оси, но для различных шкивов.

Результаты измерений и вычислений записываются в таблицу.

№ опыта	r	h	t	t^2	a	M	$g = \frac{a}{r}$	$J = \frac{M}{g}$
1 2 3	r_1							
Среднее значение	×	×	×	×				
1 2 3	r_2							
Среднее значение	×	×	×	×				

О п р е д е л е н и е м о м е н т а и н е р ц и и п р и б о р а . 1. Цилиндрические подвижные грузы m закрепляются на стержнях как можно ближе к оси вращения, но так, чтобы крестовина была в безразличном равновесии.

2. Наматывают на один из шкивов нить и измеряют: время t падения груза P с высоты h для различных расположений грузов m на стержнях (как в пп. 3 и 4 предыдущего упражнения).

3. По формуле (22) находят момент инерции J прибора.

Для первого и второго случаев расположения цилиндрических грузов проводят по три опыта. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу.

№ опыта	h	t	$m =$	$r =$	J
---------	-----	-----	-------	-------	-----

Цилиндрические грузы расположены у шкива

1					
2					
3					

Цилиндрические грузы расположены на концах стержней

1					
2					
3					

Приборы и принадлежности: прибор, состоящий из махового колеса, укрепленного на стене, масштабная линейка, штангенциркуль, секундомер, шнурок с грузом.

Теория метода и описание установки. Момент инерции махового колеса и силу трения вала B в опоре можно определить при помощи прибора, изображенного на рис. 18. Прибор состоит из махового колеса A , насаженного на вал B . Вал установлен на шарикоподшипниках C_1 и C_2 .

Маховое колесо приводится во вращательное движение грузом P . Груз P на какой-то высоте h_1 обладает потенциальной энергией mgh_1 , где m — масса груза.

Если предоставить возможность грузу P падать, то потенциальная энергия mgh_1 перейдет в кинетическую энергию поступательного движения груза $\frac{mv^2}{2}$, кинетическую энергию вращательного движения прибора $\frac{J\omega^2}{2}$ и на работу $A = fh_1$ по преодолению силы трения f в опоре.

По закону сохранения энергии

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + fh_1, \quad (23)$$

где f — сила трения.

Движение груза равноускоренное без начальной скорости, поэтому ускорение a и скорость v соответственно равны:

$$a = \frac{2h_1}{t^2}, \quad v = \frac{2h_1}{t}, \quad (24)$$

где t — время опускания груза с высоты h_1 .

Найдем угловую скорость махового колеса по формуле

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h_1}{tr}, \quad (25)$$

где r — радиус вала B .

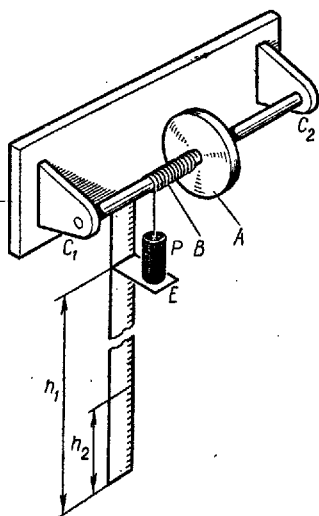


Рис. 18

Сила трения f вычисляется следующим образом. Колесо, вращаясь по инерции, поднимает груз на высоту $h_2 < h_1$ и потенциальная энергия груза на высоте h_2 будет mgh_2 .

Уменьшение потенциальной энергии при подъеме груза равно работе по преодолению силы трения в опорах C_1 и C_2 , т. е.

$$mgh_1 - mgh_2 = f(h_1 + h_2).$$

Откуда

$$f = mg \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \quad (26)$$

Подставляя в формулу (23) значения v , ω и f из (24), (25) и (26), получим окончательное выражение для вычисления момента инерции махового колеса:

$$J = mr^2 \left(gt^2 \frac{h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right). \quad (27)$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Наматывают на вал B шнур и поднимают груз до высоты h_1 .

2. Опускают платформу E (рис. 18) и измеряют время падения груза с высоты h_1 , включая секундомер.

3. Определяют высоту h_2 , на которую поднимается груз после опускания.

4. Измеряют радиус вала r и вычисляют момент инерции махового колеса и силу трения в опоре по формулам (27) и (26).

Полученные результаты сводятся в таблицу.

$$m = \qquad r =$$

№ опыта	h_1	h_2	f	t	J	$\frac{\Delta J}{J} \cdot 100\%$	$J_{\text{нст}}$
1						×	×
2							
3							
Среднее значение	×	×		×			

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ. СТОЛКНОВЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Введение. Законы сохранения являются одними из основных законов природы; они являются общими законами, составляющими основу современной физики.

Законов сохранения в физике несколько: закон сохранения массы, закон сохранения энергии, закон сохранения импульса (количества движения), закон сохранения момента импульса (момента количества движения), закон сохранения электрического заряда, законы сохранения барионных и лептонных зарядов и др. *

1. **Закон сохранения энергии.** *Единая мера различных форм движения называется энергией.* Формы движения бывают разные — механические, тепловые, электрические и т. д. Энергия системы тел количественно характеризует эту систему с точки зрения возможных в ней количественных и качественных превращений движения. Эти превращения обусловлены взаимодействием тел системы как между собой, так и с внешними (по отношению к системе) телами. *Закон сохранения и превращения энергии — общий закон природы.* Он говорит о том, что *при любых процессах, происходящих в изолированной системе ***, ее полная энергия не изменяется. Энергия при этом превращается только из одной формы в другую. Энергия — мера различных форм движения материи. В зависимости от формы движения мы имеем механическую энергию, внутреннюю, электромагнитную, химическую, ядерную и др. Закон сохранения энергии следует из *однородности хода времени*, независимости от времени и подтверждает, что *движение ма-*

* Закон сохранения электрических зарядов: алгебраическая сумма электрических зарядов в изолированной системе сохраняется постоянной. Закон сохранения барионного заряда говорит о том, что для барионов (например, нейтронов, протонов) в любой реакции число барионов в начале и в конце процесса оказывается одинаковым. Такой же закон и для лептонов (электрон, мюон, нейтрино).

** Система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы или действие всех внешних сил на тела системы уравновешивается, называется *замкнутой или изолированной*. В изолированной системе учитываются только силы взаимодействия между входящими в эту систему телами. Такие силы называются *внутренними силами*.

тери вечно и неуничтожимо, что движение материи может лишь переходить из одних форм в другие.

Однородность времени заключается в том, что протекающие физические законы в одних и тех же условиях, но в разное время их наблюдения происходит одинаково. Например, Кулон открыл закон взаимодействия электрических зарядов, в наше время этот закон проявляется точно так же, как и во времена Кулона.

В механике мы имеем дело с *механической энергией*. Механической энергией называется энергия механического движения и взаимодействия тел. Эта энергия равна сумме потенциальной $W_{\text{п}}$ и кинетической энергии $W_{\text{к}}$.

Потенциальная энергия — энергия, зависящая только от взаимного расположения взаимодействующих тел или частей одного и того же тела, она зависит от координат расположения тел. Потенциальные энергии тела в поле силы тяжести Земли и упруго деформированного тела будут выражаться формулами

$$W_{\text{п}} = mgh; \quad W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}, \quad (1)$$

где h — высота поднятия тела над Землей, x — величина деформации, k — коэффициент упругости.

Кинетическая энергия тела — энергия движения тела, зависит от скорости движения и массы тела. *Кинетическая энергия системы есть функция состояния ее движения.*

Кинетическая энергия является мерой механического движения тела и измеряется той работой, которую может совершить это тело при его торможении до полной остановки.

Кинетическая энергия

$$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где v — скорость движущегося тела.

Закон сохранения и превращения механической энергии является частным случаем закона сохранения энергии и формулируется так: *в замкнутой консервативной* системе энергия может переходить из одних видов в другие и передаваться от одного тела к другому, но ее общее количество*

* В консервативной системе действуют только консервативные силы, стр. 75.

остается неизменным, т. е. сумма кинетической и потенциальной энергии в системе с течением времени не изменяется:

$$W = W_k + W_p = \text{const}, \quad (3)$$

где W — механическая энергия системы.

2. Закон сохранения импульса. В замкнутой системе имеет место закон сохранения импульса (закон сохранения количества движения) — вектор импульса замкнутой системы тел с течением времени не изменяется:

$$\frac{dK}{dt} = 0, \text{ следовательно, } K = \sum_{i=1}^n m_i v_i = \text{const}, \quad (4)$$

где $m_i v_i$ — количества движения тел, составляющих замкнутую систему, K — вектор импульса всей системы.

Закон сохранения количества движения показывает, что взаимодействие тел, составляющих замкнутую систему, приводит только к обмену количеством движения между этими телами, но не может изменить движения системы как целого.

Закон сохранения импульса вытекает из однородности пространства (независимости от места). Однородность пространства состоит в том, что физические явления в одних и тех же условиях, но в различных местах пространства протекают одинаково. Например, один и тот же эксперимент, поставленный в Москве, или в Нью-Йорке, даст одинаковые результаты.

3. Закон сохранения момента импульса. Во вращательном движении имеет место закон сохранения момента импульса, который является продолжением основного закона динамики вращательного движения. Этот закон читается так: * если результирующий момент M внешних сил относительно неподвижной точки тела тождественно равен нулю, то момент импульса тела — момент количества движения $L = J\omega$ — относительно этой точки с течением времени не изменяется:

$$\frac{dL}{dt} = 0, \text{ следовательно, } L = \sum_{i=1}^n J_i \omega_i = \text{const},$$

где J — момент инерции; ω — угловая скорость.

* Случай для тела, закрепленного в одной точке.

Если тело вращается вокруг неподвижной оси OZ , то закон сохранения момента импульса имеет вид:

$$M_Z = \frac{dL_Z}{dt} = 0, \quad L_Z = \text{const}, \quad J_Z \omega = \text{const}, \quad (5)$$

т. е. момент импульса тела $L_Z = J_Z \omega$ относительно неподвижной оси вращения (OZ) не изменяется в процессе движения, если момент внешних сил M_Z относительно этой оси тождественно равен нулю.

Закон сохранения момента импульса следует из изотропности пространства (независимости от ориентации). Изотропность пространства говорит о том, что все направления в пространстве эквивалентны, поэтому свойства замкнутой системы не меняются при повороте всей системы на произвольный угол вокруг произвольной оси.

Рассмотренные законы сохранения являются универсальными — они имеют место как в физике элементарных частиц и космического излучения, так и в физике атома и твердого тела.

4. Применим закон сохранения энергии и закон сохранения импульса к удару упругих шаров.

Ударом называется явление конечного изменения скорости твердых тел за весьма малый промежуток времени. Удар называется *абсолютно упругим*, если в результате его не происходит превращения механической энергии системы соударяющихся тел (например, шаров) в другие виды энергии. Скорости первого шара u_1 и второго — u_2 после удара на основании законов сохранения вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}, \\ u_2 &= \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где v_1 и m_1 — скорость и масса первого шара и v_2 и m_2 — скорость и масса второго шара до удара.

Если $m_1 = m_2$, то $u_1 = v_2$ и $u_2 = v_1$ — шары как бы обмениваются скоростями. Если первый из шаров был до удара неподвижен, т. е. $v_1 = 0$, то второй шар полностью передает свою скорость первому шару, т. е. $u_1 = v_2$.

Средняя сила соударения F этих двух упругих шаров может быть вычислена по формуле

$$F = \frac{mv_2}{\tau}, \quad (7)$$

где m — масса шара, v_2 — скорость второго шара в момент перед соударением, τ — время соударения.

Если удар неупругий, то происходит превращение механической энергии в другие (немеханические) формы энергии*. В этом случае общая скорость двух шаров после удара численно равна:

$$u_{\text{общ}} = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

Работа № 7 Измерение потенциальной и кинетической энергии падающего шарика

Приборы и принадлежности: прибор Гримзеля, масштабная линейка, стальной шарик, длинные полоски белой бумаги, копировальная бумага.

Теория метода и описание установки. Прибор Гримзеля устроен следующим образом. На горизонтальной доске укреплена вертикальная стойка N , в которой имеются две горизонтальные перекладки n и n' (рис. 19).

На двух других вертикальных стойках укреплена металлическая дуга D , по которой перемещается электромагнит $ЭМ$. По обмотке электромагнита проходит ток от аккумуляторов. Ток может замыкаться и размыкаться с помощью рубильника K , укрепленного на подставке прибора.

К стойке N бифилярно подвешено медное кольцо так, что при отвесном положении нитей отверстие кольца совпадает с промежутком между перекладками n и n' . В кольцо вставляется с легким трением стальной шарик. Если кольцо с шариком отвести в сторону, в положение A , и включить ток, то электромагнит удержит шарик в этом положении. При размыкании тока шарик придет в движение по траектории, обозначенной пунктиром ABC' . Перемещая элек-

* В этом случае происходит диссипация (рассеяние) энергии.

тромагнит по дуге, можно менять высоту поднятия шарика.

В точке A шарик обладает потенциальной энергией

$$W_{пA} = mgH_1,$$

в точке B — потенциальной энергией

$$W_{пB} = mgH_2.$$

На пути AB произошло изменение потенциальной энергии шарика на

$$\Delta W_{п} = W_{пA} - W_{пB} = P(H_1 - H_2) = mg(H_1 - H_2), \quad (8)$$

одновременно шарик приобрел кинетическую энергию

$$W_{к} = \frac{mv^2}{2}, \quad (9)$$

где v — скорость шарика в точке B .

Чтобы подсчитать кинетическую энергию шарика в точке B , надо определить скорость шарика в этой точке. Ско-

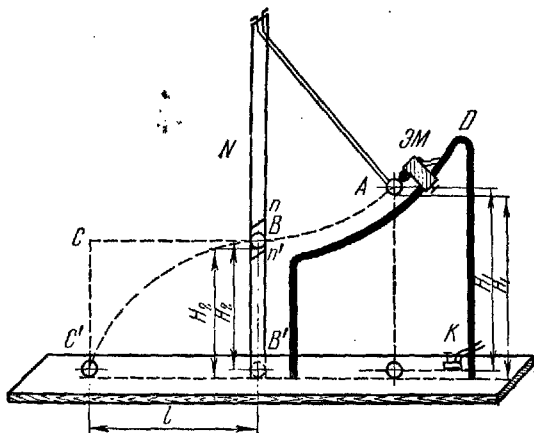


Рис. 19

рость в точке B может быть найдена исходя из следующих соображений: в случае отсутствия тяготения шарик равномерно двигался бы по инерции по направлению BC ; в случае если бы шарик не имел в точке B начальной скорости

и был отпущен, он стал бы свободно падать по вертикали BB' .
 Время падения шарика определяется из формулы

$$t = \sqrt{\frac{2H_2}{g}}.$$

При наличии же в точке B горизонтальной скорости v и под действием тяготения шарик будет перемещаться по кривой BC' , причем его горизонтальная скорость, оставаясь постоянной, будет равна скорости v в точке B . Шарик, упав на доску, покрытую листом бумаги с копиркой, оставит на ней след.

Таким образом легко измерить с помощью масштаба горизонтальное перемещение шарика $l = B'C' = BC = vt$. Так как время перемещения шарика t по прямой BC равно времени его свободного падения по вертикали BB' , то скорость шарика в точке B :

$$v = \frac{l}{t} = \frac{l}{\sqrt{\frac{2H_2}{g}}}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) кинетическая энергия шарика в точке B :

$$W_k = \frac{mgl^2}{4H_2} = \frac{Pl^2}{4H_2}. \quad (11)$$

По закону сохранения энергии величина кинетической энергии шарика в точке B [формула (9)] равна изменению потенциальной энергии между точками A и B [формула (8)], т. е.

$$W_k = \Delta W_{п}; \quad \frac{mv^2}{2} = P(H_1 - H_2) = mg(H_1 - H_2). \quad (12)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Взвешивают шарик и определяют высоту H_2 .

2. Отводят шарик в точку A , измеряют высоту поднятия шарика H_1 и вычисляют разность высот ΔH .

3. Размыкают ключ K и измеряют расстояние l (предварительно положив лист бумаги с копиркой на столик прибора).

4. Подсчитывают величину кинетической и потенциальной энергии по формулам (9) и (11).

5. Опыт продельвают пять раз, меняя высоту H_1 .

6. Сравнивают полученные значения W_k и $\Delta W_{п}$.

Результаты измерений (и вычислений) заносят в таблицу.

$$H_2 =$$

H_1	ΔH_1	l	W_K	ΔW_{II}	$\Delta W = W_K - \Delta W_{II}$
Среднее значение	×	×			

Работа № 8

Проверка закона сохранения момента количества движения (момента импульса)

Приборы и принадлежности: специальная установка со строботахометром, секундомер, масштабная линейка, штангенциркуль, эталонный груз, блок, угломер или транспортир.

Теория метода и описание установки. В данной работе проверяется закон сохранения момента количества движения (момент импульса) относительно оси (см. формулу (5) введения).

Установка состоит из якоря электромотора A (рис. 20 и 21), на котором жестко закреплен маховик B , и статора C , укрепленного в рамке R под углом α к вертикальной оси OO . Рамка R жестко скреплена с маховичком K . Якорь A может свободно вращаться относительно оси $O'O'$ в статоре C , а статор вместе с рамкой R — относительно вертикальной оси OO .

Если не учитывать трение, то данную систему относительно оси OO при определенных условиях можно считать замкнутой и для нее должен выполняться закон сохранения момента импульса. Закон сохранения момента импульса относительно оси OO проверяется следующим образом.

Сначала закрепляют рамку R винтом m , а статор C винтом m' под углом α неподвижно; мотор A включают.

Через некоторое время, когда якорь достигнет постоянной скорости ω_1 , система приобретет некоторый момент количества движения L_1 относительно оси $O'O'$:

$$L_1 = J_A \omega_1 \cos \alpha,$$

где J_A — момент инерции якоря относительно оси $O'O'$, ω_1 — угловая скорость якоря A относительно неподвижной рамки R и статора C при установившемся режиме якоря, α — угол между осями OO и $O'O'$.

Как только движение якоря установится и его угловая скорость достигнет величины ω_1 , освобождают рамку R винтом m и отключают ток от мотора. С этого момента времени момент внешних сил, действующих на систему (якорь, рамка, статор), будет равен нулю, и мы систему можем считать замкнутой.

После отключения тока якорь через некоторое время t перестанет вращаться относительно статора и вся система (рамка, статор и якорь) придут во вращение вокруг *вертикальной* оси OO с некоторой угловой скоростью ω_2 и приобретут относительно оси OO момент импульса L_2 :

$$L_2 = J_{\text{общ}} \omega_2,$$

где $J_{\text{общ}} = J_A + J_C + J_R$ — общий момент инерции системы, равный сумме моментов якоря J_A , статора J_C и рамки R с маховичком K — J_R .

Для замкнутой системы по формуле (5) имеет место закон сохранения импульса, т. е.

$$L_1 = L_2,$$

где L_1 — момент количества движения якоря в момент отключения тока.

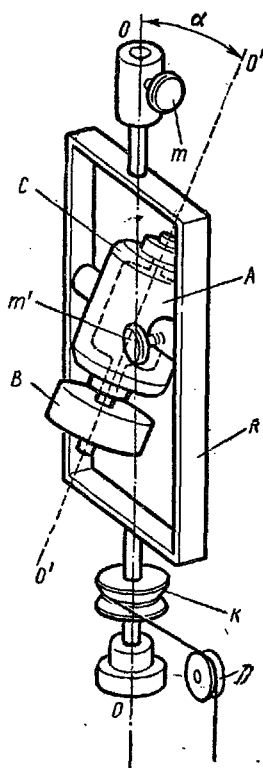


Рис. 20

Подставим в формулу значения L_1 и L_2 получим:

$$J_A \omega_1 \cos \alpha = J_{\text{общ}} \omega_2.$$

Эта формула проверяется для различных углов α ($\alpha = 0$, $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$).

Измерения и обработка результатов измерения. I. Определение общего момента инерции системы — $J_{\text{общ}}$ (мотор выключен). 1. Измеряют штангенциркулем диаметр маховичка K . Находят его радиус r .

2. Укрепляют винтом m' статор C электромотора вертикально ($\alpha = 0$). К маховичку K прикрепляют нить с грузом $P = mg$. Груз перекидывают через блок D (рис. 21).

Поворачивая рамку R , аккуратно наматывают нить на маховичок K . Рамку закрепляют стопором E .

3. Измеряют расстояние h от нижнего края груза P до пола.

4. Освобождают рамку и одновременно включают секундомер. Узнают время t падения груза с высоты h . Эти измерения следует проделать три раза.

5. Вычисляют момент инерции системы для $\alpha = 0$ по формуле

$$J_{\text{общ}}^0 = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right).$$

Эта формула получается следующим образом. Линейное ускорение a груза P связано с угловым ускорением ϵ системы соотношением $\epsilon = \frac{a}{r} = \frac{2h}{t^2 r}$, так как $a = \frac{2h}{t^2}$. Момент силы, действующей на систему:

$$M = Tr = J_{\text{общ}}^0 \epsilon,$$

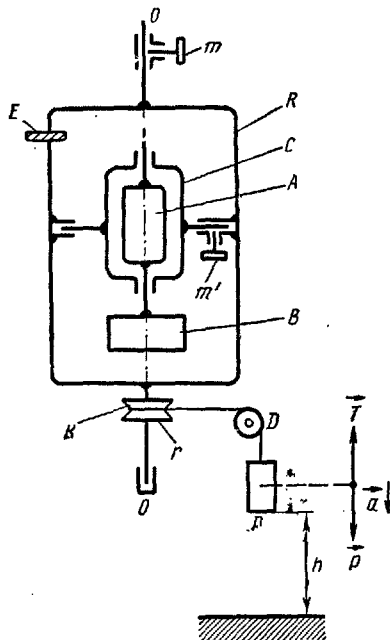


Рис. 21

где $T = P - F$ — сила натяжения нити. Отсюда

$$J_{\text{общ}}^0 = \frac{Tr}{\varepsilon} = \frac{(P - F)r^2}{a} = \frac{m(g - a)}{a} r^2 = mr^2 \left(\frac{g}{a} - 1 \right) = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right).$$

Массой блока и трением в осях пренебрегаем.

Измерения заносят в таблицу.

$\alpha =$

№ измерения	r	m	h	t	$J_{\text{общ}}^0$

6. Находят точно таким же путем общий момент инерции для углов $\alpha = 30^\circ$ ($J'_{\text{общ}}$) и $\alpha = 45^\circ$ ($J''_{\text{общ}}$).

II. Определение угловой скорости якоря мотора ω_1 . 1. Снимают с маховичка K нить и закрепляют статор C винтом m' под углом $15-20^\circ$ к оси OO . Рамку R закрепляют стопором E .

2. Включают мотор. Напряжение, подаваемое на мотор, указано на приборе.

3. Определяют частоту вращения якоря n_1 строботаксометром, для чего: а) на строботаксометре устанавливают переключатель диапазонов на цифру 3 и включают строботаксометр в сеть; б) когда якорь достигнет стационарного режима (примерно через минуту), начинают плавно менять частоту вспышек строботаксометра, наблюдая одновременно за стробоскопическим диском, нарисованным на маховике B ; в) подбирают такую частоту вспышек, при которой сектор, нарисованный на стробоскопическом диске, будет казаться неподвижным. В этом случае частота вспышек равна частоте вращения якоря. Затем рассчитывают угловую скорость по формуле

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}.$$

Определение ω_1 проводят три раза и берут среднее значение.

III. Определение угловой скорости системы ω_2 . 1. Устанавливают на строботаксометре

переключатель диапазонов на диапазон 2. Включают мотор при закрепленных рамке R и статоре C . Напряжение на моторе такое же, какое было при определении ω_1 .

2. После того как мотор достигнет стационарного режима (приблизительно через минуту), рамку отпускают и измеряют угловую скорость системы ω_2 (якорь, статор, маховичок, рамка), так же как и угловую скорость ω_1 якоря, следя за меткой на маховичке K .

3. Определяют ω_2 для углов $\alpha = 0^\circ$ (ω_2^0); $\alpha = 30^\circ$ (ω_2^1) и $\alpha = 45^\circ$ (ω_2^2).

IV. Проверка закона сохранения момента импульса. После того как определены ω_1 , $J_{\text{общ}}^0$ и ω_2 для трех углов α , подставляют их значения в формулу

$$L_1 = L_2.$$

Для угла $\alpha = 0^\circ$ формула имеет вид $J'_A \omega_1 \cos 0^\circ = J_{\text{общ}}^0 \omega_2^0$.

Для угла $\alpha = 30^\circ$ » » $J'_A \omega_1 \cos 30^\circ = J_{\text{общ}}^1 \omega_2^1$.

Для угла $\alpha = 45^\circ$ » » $J'_A \omega_1 \cos 45^\circ = J_{\text{общ}}^2 \omega_2^2$.

Момент инерции якоря J'_A дан на приборе.

Работа № 9

Изучение законов столкновения упругих шаров

Приборы и принадлежности: баллистический гальванометр, установка для упругого удара шара, реостат, конденсатор, два электромагнита, три ключа.

Теория метода и описание установки. Силы, действие которых весьма непродолжительно (порядка тысячных долей секунды), называются мгновенными. Измерить их время действия можно, например, при помощи осциллографа в соединении с фотоэлементами или конденсатором в соединении с баллистическим гальванометром и др.

В данной работе методом конденсатора определяется продолжительность удара двух упругих шаров. Установка (рис. 22) состоит из двух стальных шаров A и B , висящих на проводящих нитях. Шары при помощи электромагнитов M_1 и M_2 можно отклонять друг от друга на различные углы, которые измеряются по шкале D .

Если один из шаров, например B , отвести от положения равновесия на угол α , а потом отпустить, то по закону сохранения энергии (формула (3)) имеем:

$$mgh = \frac{mv_2^2}{2},$$

где v_2 — скорость шара в момент перед соударением, h — высота поднятия шара.

Отсюда

$$v_2 = \sqrt{2gh}. \quad (13)$$

Из треугольника OBV' (рис. 23)

$$\cos \alpha = \frac{l-h}{l}. \quad (14)$$

Из формул (14) и (13) получаем:

$$v_2 = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{gl}, \quad (15)$$

где l — длина нити.

Если шары соединить последовательно заряженным конденсатором C , который за время разрядки шаров будет разряжаться через гальванометр Γ , то время соударения шаров тождественно времени разрядки конденсатора C .

Время разрядки конденсатора

$$\tau = 2,3CR \lg \frac{q_0}{q_0 - q}, \quad (16)$$

где R — сопротивление в цепи конденсатора, через которое идет разряд (написано на установке), q_0 — заряд конденсатора в начальный момент времени, q — количество электричества, прошедшее через гальванометр за время удара (время разрядки τ), C — емкость конденсатора (написано на установке).

Начальный заряд конденсатора q_0 и количество электричества q , протекающее за время удара τ , определяются бал-

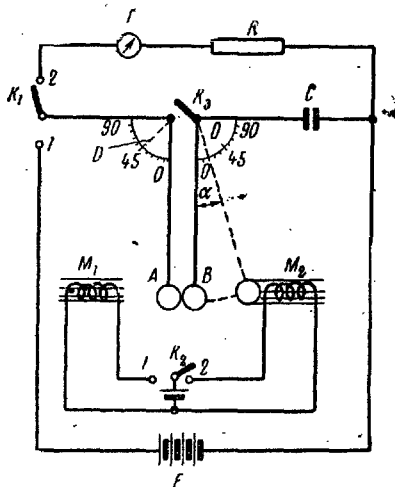


Рис. 22

листическим гальванометром. Так как показания гальванометра n пропорциональны количеству электричества q , то

$$\tau = 2,3CR \lg \frac{n_0}{n_0 - n}, \quad (17)$$

где n_0 — показания гальванометра при полной разрядке конденсатора (максимальное отклонение зайчика по шкале), n — показания гальванометра при разрядке конденсатора за время соударения τ (также отклонение зайчика по шкале).

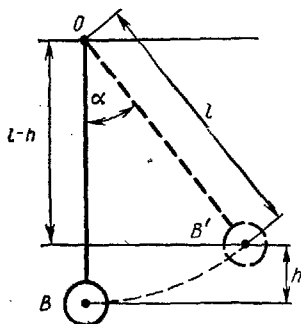


Рис. 23

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему (рис. 22). Ключи K_1 , K_2 , K_3 разомкнуты.

2. Замыкают ключ K_3 . Заряжают конденсатор C , для чего ключ K_1 ставят в положение 1, тем самым присоединяют конденсатор C к батарее E .

3. Переводят ключ K_1 в положение 2, т. е. полностью разряжают конденсатор C через сопротивление R и гальванометр Γ ,

и измеряют максимальное отклонение n_0 зайчика по шкале.

4. Снова заряжают конденсатор C . Ключ K_3 размыкают, отводят один из шаров, например шар B , к включенному электромагниту M_2 . Электромагнит M_2 включается при помощи ключа K_2 при переводе его в положение 2. Шар B удерживается электромагнитом на какой-то высоте (электромагниты M_1 и M_2 можно перемещать), соответствующей углу α .

5. Переводят ключ K_1 в положение 2. Ключ K_2 перебрасывают в положение 1 и тем самым одновременно освобождают шар B и включают электромагнит M_1 . Шар B , освободившись от электромагнита M_2 , ударяет шар A . В момент соударения шаров цепь конденсатора C замыкается и конденсатор частично разряжается через гальванометр Γ . Количество электричества, которое протекает через гальванометр Γ , в момент соударения шаров измеряется отклонением n зайчика по шкале. Шар A придет в движение, достигнув электромагнита M_1 , и удержится им.

6. По формулам (15), (17) и (7) вычисляют скорость шара в момент соударения, время соударения шаров и среднюю

силу соударения двух шаров. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

$R =$, $m =$, $l =$ написаны на приборе.

№ опыта	a	v_2	n_0	n	τ	F
1						
2						
3						

СИЛЫ УПРУГОСТИ

Введение. Сила характеризует воздействие одного тела на другое. В результате этого воздействия тело может прийти в движение или деформироваться. Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема.

Силы можно разделить на две категории: 1) силы, обусловленные взаимодействием непосредственно соприкасающихся тел (удар, давление, растяжение тела, трение и др.), и 2) силы, связанные с особой формой материи, называемой полем и осуществляющей взаимодействие между телами без их соприкосновения (силы гравитационные, электрические, магнитные, ядерные).

С другой стороны в механике, с точки зрения закона сохранения энергии, силы можно разделить на *консервативные* и *диссипативные*. Консервативные силы зависят только от положения тела (силы тяготения, силы упругости); работа, совершаемая консервативными силами, не зависит от пути, а определяется только начальным и конечным положением тела в пространстве. Поле таких сил называется потенциальным.

Диссипативные силы (силы трения) такие силы, при действии которых механическая энергия замкнутой системы уменьшается, она переходит в другие виды энергии (немеханические), например в энергию беспорядочного теплового движения частиц тела, происходит диссипация — рассеивание энергии.

При деформациях твердого тела, например металла, в нем происходят очень сложные явления, которые еще недостаточно исследованы.

Металлы представляют собой совокупность хаотически расположенных и различно ориентированных друг относительно друга мелких кристалликов. Вследствие этого упругие свойства металла по различным направлениям одинаковы и металл является изотропным телом.

Деформацию в металле грубо можно представить так: в *зоне упругих деформаций* (упругой деформацией называется такая деформация, когда тело после прекращения действия сил, вызывающих деформацию, принимает первоначальные размеры и форму) кристаллики металла изменяют свою форму, не сдвигаясь и не разрушаясь. После снятия нагрузки они возвращаются в прежнее состояние, под влиянием сил взаимодействий между кристалликами. Таким образом, в упруго деформированном теле возникают *внутренние силы, которые уравнивают внешние силы, приложенные к телу*. Физическая величина σ , численно равная упругой силе $dF_{\text{упр}}$, приходящаяся на единицу площади сечения dS тела, называется напряжением:

$$\sigma = \frac{dF_{\text{упр}}}{dS}.$$

Напряжение называется нормальным, если сила $dF_{\text{упр}}$ направлена по нормали к площадке dS , и касательным, если она направлена по касательной к этой площадке. Для нормального напряжения

$$\sigma_0 = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

В *зоне пластических деформаций* (пластические деформации возникают тогда, когда силы, действующие на тело, перешли определенный предел, называемый *пределом упругости*, определенный для каждого тела; после превышения внешними силами этого предела тело не восстанавливает свои формы и размеры) происходит кроме изменения формы кристалликов еще и скольжение в них, а также смещение их относительно друг друга и разламывание. Эти изменения уже не могут исчезнуть после снятия нагрузки. Тело остается деформированным, в нем возникают *остаточные деформации*. Если после появления в теле остаточных деформаций мы продолжаем увеличивать внешнюю силу, то наблюдается *разрушение тела*. Это явление наступает тогда, когда напряжения σ , возникающие в теле под действием деформирующей силы, переходят *предел прочности* тела.

Деформации тела бывают разные: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Мерой деформации является *относительная деформация*

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x},$$

равная отношению абсолютной деформации Δx к первоначальному значению величины x , характеризующей размеры или форму тела. При всестороннем растяжении или сжатии x означает объем V (ΔV — увеличение или уменьшение объема ΔV , вызванное деформацией), а при продольном растяжении или сжатии x означает длину l .

Зависимость между напряжением σ и относительной деформацией ε показана на рис. 24. Точка A соответствует пределу упругости; ордината AD — величина напряжения, выражает предел упругости, ордината BC — предел прочности. Английский физик

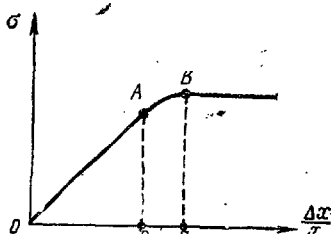


Рис. 24

Р. Гук установил законы упругих деформаций. Основной закон (закон Гука) говорит о том, что *напряжение упруго деформированного тела пропорционально его относительной деформации*

$$\sigma = k\varepsilon,$$

где k — модуль упругости.

Закон Гука справедлив только на участке OA (рис. 24).

При продольном растяжении или сжатии модуль упругости называется модулем Юнга и закон Гука запишется так:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга. Из формул (1) и (2), заменив $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, получим:

$$E = \frac{Fl}{S \cdot \Delta l}. \quad (3)$$

Если $\Delta l = l$, то модуль Юнга $E = \sigma_0 = \frac{F}{S}$, т. е. модуль Юнга равен *нормальному напряжению, которое возникло бы в образце при увеличении его длины в два раза, если бы при этих деформациях был бы справедлив закон Гука.*

Так как относительная деформация ϵ — отвлеченное число, то единица модуля упругости в системе СИ

$$[E] = \frac{н}{м^2} = \frac{кг}{сек^2 \cdot м}.$$

На практике обычно модуль упругости выражают в $кг/мм^2$.

Работа № 10 Определение модуля упругости методом изгиба

Приборы и принадлежности: две опоры, испытуемые стержни (стальной, деревянный, латунный, стеклянный), набор грузов, масштабная линейка с зеркальной шкалой или отсчетный микроскоп, микрометр.

Теория метода и описание установки. Определить модуль упругости можно методом изгиба стержня, обоими концами положенного на твердые опоры и нагруженного в середине грузом определенного веса. Действие этой силы вызовет деформацию изгиба (рис. 25). В этом случае величина деформации характеризуется так называемой *стрелой прогиба* λ ,

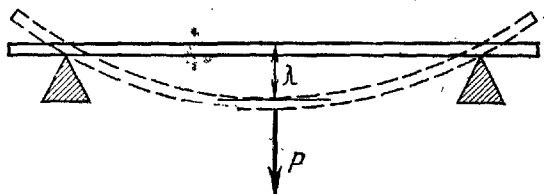


Рис. 25

т. е. тем расстоянием, на которое опускается точка приложения силы, действующей на стержень. Зная стрелу прогиба λ , находят модуль Юнга по формуле

$$E = \frac{Pl^3}{4\lambda ab^3}, \quad (4)$$

где P — сила, вызывающая деформацию (изгиб), l — длина стержня, a — ширина поперечного сечения стержня, b — высота.

Применение формулы (4) возможно лишь при условии, если стержень прямоугольного сечения и изгибающая сила

действуют параллельно той стороне сечения, которая входит в знаменатель в третьей степени.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Измеряются микрометром высота и ширина поперечного сечения стержня в нескольких местах (хотя бы в трех) и определяются средние значения.

2. Испытуемый стержень *A* располагается на двух опорах; измеряется масштабной линейкой расстояние между точками опоры.

3. На стержень *A* подвешивается стремя *C* (рис. 26) и отмечается h_0 — начальное (нулевое) положение на шкале; глаз надо располагать таким образом, чтобы можно было видеть совпадение изображения проволоочки *a* в зеркальной шкале *B* с самой проволоочкой *b*.

Если измерения производятся отсчетным микроскопом, который представляет собой тубус *1* (рис. 27, *a*), объектив *2* и окуляр *3*, в поле зрения которого располагается отсчетная шкала *b* (рис. 27, *б*), то при измерении наводка микроскопа производится так, чтобы нижнее деление отсчетной шкалы микроскопа совпадало с проволоочкой. Предварительно необходимо узнать цену деления отсчетного микроскопа, для чего наводят микроскоп на миллиметровую шкалу и смотрят, сколько делений шкалы микроскопа *n* укладывается

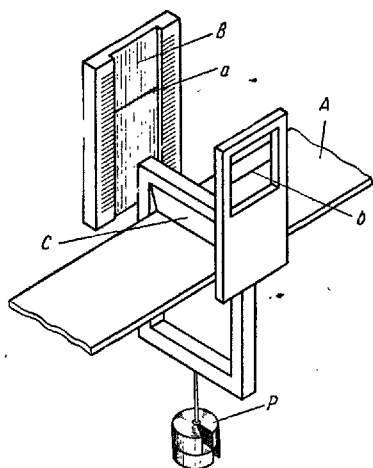


Рис. 26

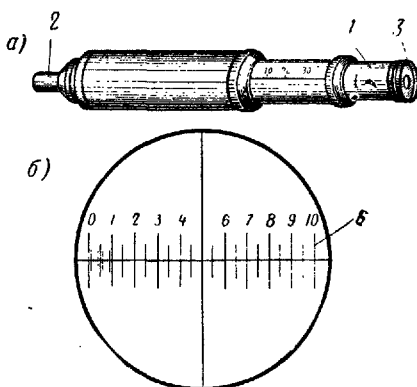


Рис. 27

в 1 мм масштабной линейки. Цена деления шкалы микроскопа

$$K = \frac{1}{n} \text{ мм.}$$

Наводка микроскопа на фокус производится перемещением тубуса 1.

4. Стремя постепенно нагружается дополнительными грузами P (50, 100, 150 и 200 г) и производятся отсчеты положения проволоочки на шкале n_1 , n_2 и n_3 (первичные отсчеты).

5. Снимая дополнительные грузы в таком же порядке, как указано в п. 4, отмечаются положения проволоочки n'_3 , n'_2 и n'_1 (вторичные отсчеты).

6. Освободив стержень от дополнительных грузов, вновь определяют нулевое положение прибора.

Вторичные отсчеты могут не совпадать с первичными. В этом случае берутся средние значения из обоих отсчетов.

Результаты измерений (и вычислений) заносятся в таблицу.

$l = a = b = n_0 =$						
№ опыта	P	n'	n''	λ	E	$\frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%$
1						
2						
3						
Среднее значение	×	×	×	×		

Удобно при вычислении подсчитать величину $\frac{l^3}{4ab^3} = \text{const}$, тогда формула (4) будет иметь вид:

$$E = \text{const} \frac{P}{\lambda}.$$

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Введение. *Колебательным движением называется движение, обладающее той или иной степенью повторяемости во времени.*

Простейшими колебаниями являются гармонические колебания, т. е. такие колебания, при которых колеблющаяся

величина (колебания маятника, поршня и т. п.) изменяется со временем по закону синуса или косинуса. Уравнение гармонического колебания следующее:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \text{ или } m\ddot{x} + kx = 0, \quad \ddot{x} + \omega^2x = 0, \quad (1)$$

где $k = m\omega^2$ — коэффициент упругости, m — масса колеблющейся системы, x — смещение колеблющейся системы, $F = -kx$ — возвращающая или центральная сила.

Решение такого уравнения имеет вид:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ или } x = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

где x — колеблющаяся величина (смещение, скорость, ускорение, сила и т. п.), t — время, A — амплитуда колебания, равная максимальному абсолютному значению x (максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия), ω — циклическая или круговая частота (рис. 28).

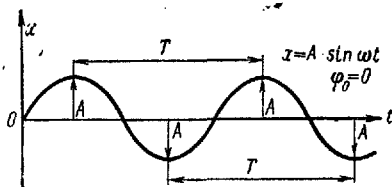


Рис. 28

Физический смысл циклической частоты состоит в том, что ω численно равна числу полных колебаний, совершаемых за 2π сек, т. е.

$$\omega = 2\pi\nu, \quad \nu = \frac{1}{T},$$

где ν — частота колебаний, т. е. число полных колебаний, совершаемых за единицу времени; T — период колебаний — время, за которое совершается одно полное колебание, $\omega t + \varphi_0 = \varphi$ — фаза колебания. Фаза колебания функция времени определяет значение x в данный момент времени t^* , φ_0 — начальная фаза колебания в момент начала отсчета времени, т. е. при $t = 0$.

Если в уравнение (1) подставить одно из решений (2), то получим:

$$-mA\omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) + kA \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = 0.$$

* Фаза колебания определяет, какую часть от амплитуды A составляет смещение x в данный момент времени: $\frac{x}{A} = \sin(\omega t + \varphi)$.

Отсюда

$$\omega^2 = \frac{k}{m}. \quad (3)$$

Формула (1) описывает гармоническое колебательное движение, происходящее вдоль какой-либо линии, такие колебания называются колебательными системами с одной степенью свободы (рис. 29, а). Если система может совершать два независимых друг от друга колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то такая система обладает двумя степенями свободы (рис. 29, б).

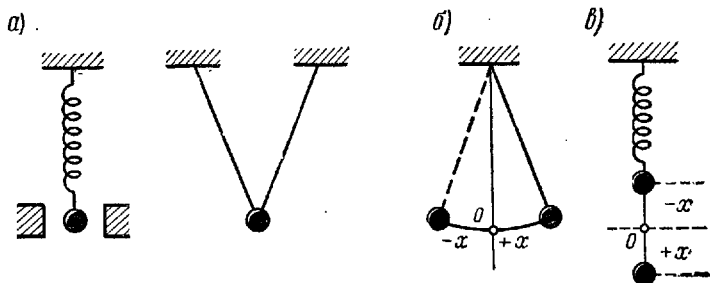


Рис. 29

Пружинный маятник может колебаться в трех независимых направлениях и называется колебательной системой с тремя степенями свободы (рис. 29, в). Если система совершает колебания около положения равновесия (после того как она каким-либо образом была выведена из положения устойчивого равновесия) без воздействия переменных внешних сил, то такие колебания называются *собственными или свободными*. Частота, с которой колеблется система (ν_0) при свободных колебаниях, называется *собственной частотой системы*.

I. Рассмотрим некоторые примеры *свободных незатухающих колебаний тел*, т. е. колебаний с неизменной амплитудой.

1. Колебания груза на пружине. Колебательное движение происходит под действием упругой или квазиупругой * силы F :

$$F = -kx.$$

* Силы, имеющие иную природу, чем упругие силы, но также удовлетворяющие уравнению $F = -kx$, называются *квазиупругими*.

Эта сила всегда направлена к положению равновесия, а смещение x — в противоположную сторону, поэтому имеем знак минус. Такая сила называется возвращающей силой. По второму закону Ньютона

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx \text{ или } \ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (4)$$

где m — масса колеблющегося тела, k — коэффициент упругости;

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (5)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ — частота; T_0 — период собственных колебаний.

Из формулы (5) легко определить период собственных упругих колебаний, например, груза на пружине. Так как

$$k = m\omega_0^2 = m \left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^2,$$

$$\text{то } T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (6)$$

2. Крутильные колебания. Система совершает *крутильные колебания*, т. е. такие колебания, при которых твердое тело A , подвешенное на вертикальной невесомой нити (или невесомом стержне B), верхний конец которой закреплен неподвижно в точке O' , а ось z совпадает с одной из свободных осей тела, колеблется в плоскости xOy , отклоняясь от оси x на угол φ вправо и влево (рис. 30).

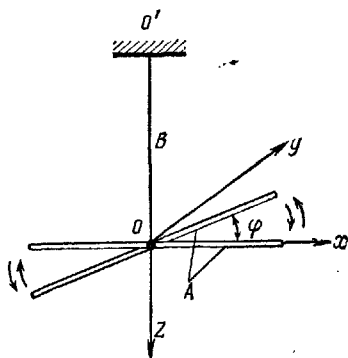


Рис. 30

При крутильных колебаниях на тело действует *возвращающий момент*, приостанавливающий отклонение тела от состояния равновесия, а затем сообщающий телу обратное движение.

Возвращающий момент M обусловлен упругими силами, возникающими в стержне при его кручении вокруг оси Oz .

В случае малых углов φ крутильные колебания можно считать гармоническими и тогда по второму закону механики для вращательного движения (см. стр. 49)

$$M = J\epsilon; \quad M = -D\varphi; \quad J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D\varphi = 0; \quad \ddot{\varphi} + \frac{D}{J} \varphi = 0, \quad (7)$$

где D — постоянная величина для данного стержня (нити), называется модулем кручения, а $\frac{D}{J} = \omega_0^2$ (см. формулу (4)).

Из формулы (6) период собственных крутильных колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}}, \quad (8)$$

где J — момент инерции тела A относительно оси Oz .

3. М а я т н и к. 1) Точечное тело, подвешенное к невесомой и нерастяжимой нити, совершающее колебания в вер-

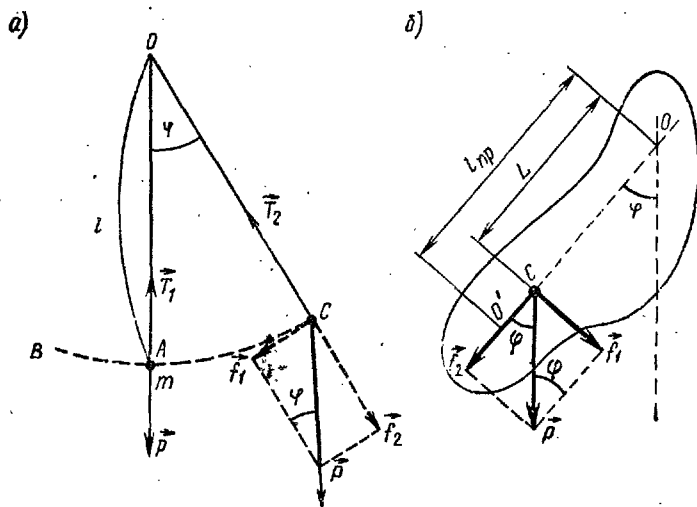


Рис. 31

тикальной плоскости под действием собственного веса, называется *математическим маятником* (рис. 31, а).

В вертикальном положении сила тяжести материальной точки $P = mg$ полностью уравнивается натяжением нити T_1 и маятник остается в покое (положение равновесия — точка A). Если маятник отклонить от положения равновесия в точку C на некоторый угол φ , то составляющая силы тяжести, направленная вдоль нити, т. е. сила $f_2 = P \cdot \cos \varphi$ уравнивается натяжением нити T_2 , другая же составляющая, т. е. сила $f_1 = -P \cdot \sin \varphi$, перпендикулярная к нити, стремится вернуть маятник в положение равно-

веса. Эта сила является возвращающей силой. В этом случае движение маятника определяется не упругой силой, а квазиупругой силой. Квазиупругая сила f_1 — сила, не упругая по своей природе, но аналогичная упругой силе по виду зависимости от смещения. Колебания, вызываемые этой силой при малых углах φ , совпадают по характеру движения с колебаниями, вызываемыми упругой силой.

Длина дуги $x = AC$, на которую маятник отклонился от положения равновесия, называется смещением. Если смещение от A к C считать положительным, а от A к B — отрицательным, то сила f_1 всегда будет направлена обратно смещению и при малых углах отклонения ($2-4^\circ$) пропорциональна смещению.

При отклонении маятника на угол φ на точку C действует вращающий момент

$$M = f_1 l; \quad M = -Pl \sin \varphi, \quad (9)$$

где l — плечо силы f_1 . Маятник будет совершать движение по окружности около точки подвеса O . По второму закону динамики для вращательного движения

$$M = J\varepsilon = ml^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (10)$$

где $J = ml^2$ — момент инерции точки. Приравнивая формулы (9) и (10), получим:

$$ml^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mgl \cdot \sin \varphi = 0 \quad \text{или} \quad \ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0 \quad (11)$$

(для малых углов $\sin \varphi \approx \varphi$, если φ измерять в радианах и $\varphi \ll 1$). Это уравнение такое же, как и уравнение (4), поэтому можно заменить

$$\frac{g}{l} = \omega_0^2$$

и период свободных колебаний математического маятника

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (12)$$

где l — длина математического маятника.

2) Если вместо точки возьмем твердое тело, совершающее колебания под действием собственного веса P вокруг неподвижной оси O , не проходящей через центр тяжести тела C , то будем иметь физический маятник (рис. 31, б). На ри-

сунке точка O — точка подвеса, C — центр тяжести. При отклонении маятника на угол φ составляющая веса P сила f_2 уравнивается реакцией оси O . Составляющая же f_1 стремится возвратить маятник в положение равновесия. Для малых углов

$$f_1 = -mg \cdot \sin \varphi = -mg\varphi.$$

Возвращающий момент M , создаваемый силой f_1 , численно равен:

$$M = f_1 L = -mg\varphi L, \quad (13)$$

где $L = OC$ плечо силы f_1 .

По второму закону динамики для вращательного движения

$$M = J\varepsilon = J \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (14)$$

где J — момент инерции маятника относительно оси O .

Из формул (13) и (14) имеем:

$$J\ddot{\varphi} + mg\varphi L = 0; \quad \ddot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) аналогично уравнениям (4), (7) и (11), поэтому

$$\frac{mgL}{J} = \omega_0^2.$$

Отсюда период собственных колебаний физического маятника

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL}}. \quad (16)$$

Выражение $\frac{J}{mL}$ называется *приведенной длиной физического маятника*.

Приведенной длиной физического маятника называется длина некоторого воображаемого математического маятника, который имеет тот же период колебаний, что и данный физический маятник.

На практике приведенная длина физического маятника определяется расстоянием между точкой подвеса маятника O и его центром качания O' (точкой, находящейся от точки подвеса на расстоянии, равном приведенной длине маятника). Центр качания лежит ниже центра тяжести маятника. Маятник, вся масса которого была бы сосредоточена в центре качания, имел бы тот же период, что и математический маятник данной длины.

II. Если колеблющаяся система находится в вязкой среде, то колебания через некоторое время прекратятся. Это явление представляет собой затухающее колебание.

Затухающими колебаниями называются колебания, энергия которых уменьшается с течением времени.

Система тел, механическая энергия которых постепенно уменьшается за счет преобразования в другие виды энергии, называется *диссипативной*. Все реальные колебательные системы являются диссипативными. Энергия в диссипативной системе расходуется на работу против сил трения. Затухающие колебания совершаются при одновременном действии двух сил: *упругой силы и силы сопротивления среды*. Уравнение *затухающего колебания* при небольших затуханиях имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0, \text{ или } ma = -kx - rv, \\ \text{или } m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = 0, \quad (17)$$

где m — масса колеблющегося тела, a — его ускорение, $-kx$ — упругая (возвращающая) сила, $F_{\text{тр}} = -rv$ — сила сопротивления среды — сила трения, r — коэффициент сопротивления среды, v — скорость движения тела в среде. Решение уравнения (17) дает зависимость смещения x от времени t

$$x = A_0 e^{-\frac{r}{2m}t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где $A = A_0 e^{-\beta t}$ — амплитуда затухающих колебаний, e — основание натурального логарифма, $\beta = \frac{r}{2m}$ — коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ — собственная циклическая частота затухающих колебаний системы, ω_0 — собственная циклическая частота *свободных* колебаний системы (в отсутствие вязкой среды).

Затухающее колебание при $\varphi_0 = 0$ показано на рис. 32.

Отношение двух последующих амплитуд одного и того же знака A_t и A_{t+T} , отстоящих друг от друга на период T , равно:

$$\delta = \frac{A_t}{A_{t+T}} = e^{\beta T} = \text{const} \quad (18)$$

и называется *декрементом затухания*.

Натуральный логарифм от этого отношения

$$\lambda = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \beta T \quad (19)$$

называется *логарифмическим декрементом затухания*.

III. Если на систему действует периодическая сила, поддерживающая колебание системы, то система совершает *вынужденные незатухающие колебания*.

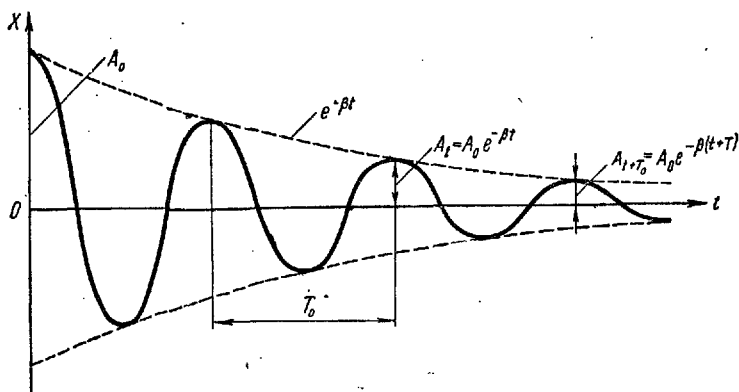


Рис. 32

Уравнение *вынужденных* *прямолинейных* *колебаний* имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F \text{ или } ma = -kx - rv + F, \\ \text{или } m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = F, \quad (20)$$

где F — периодически действующая внешняя сила, вынуждающая или возмущающая, $F = F_0 \cdot \cos \omega t$, где F_0 — амплитуда вынуждающей силы.

Работа № 11

Определение ускорения
силы тяжести
при помощи маятника

Приборы и принадлежности: маятник, секундомер.

Теория метода и описание установки. Для определения ускорения силы тяжести можно воспользоваться методом маятника, который основан на зависимости периода коле-

бания маятника от ускорения силы тяжести (см. пример 3, стр. 84).

Маятник, применяемый в физических лабораториях, представляет собой массивный шарик небольшого радиуса, подвешенный на длинной двойной нити для того, чтобы колебания происходили строго в одной плоскости.

В данном случае конструктивное оформление установки следующее (рис. 33): на перекладине между двумя жестко укрепленными вертикальными стойками подвешен на двойной нити свинцовый шарик *A*. Вдоль вертикальных стоек перемещается при помощи скользящих муфт вторая горизонтальная перекладина — линейка *B*, которая может быть закреплена на любой высоте при помощи винта на одной из муфт.

На стойках нанесена сантиметровая шкала, а с перемещающейся линейкой скреплена миллиметровая шкала.

Приведенной длиной маятника следует считать расстояние от точки подвеса *O* до центра качания шарика. Однако непосредственно определить приведенную длину маятника сложно, поэтому поступают следующим образом: подводят подвижную линейку до соприкосновения с шариком и измеряют длину $l' = l_1 + r$, где r — радиус шарика, и длину $l'' = l_2 + r$.

Затем рассчитывают периоды свободных колебаний T_1 и T_2 маятников двух различных длин l' и l'' . Из формулы (12) имеем:

$$T_1^2 = 4\pi^2 \frac{l_1}{g} = 4\pi^2 \frac{l' - r}{g} \quad \text{и} \quad T_2^2 = 4\pi^2 \frac{l_2}{g} = 4\pi^2 \frac{l'' - r}{g}.$$

Вычитая из первого выражения второе, получим:

$$T_1^2 - T_2^2 = \frac{4\pi^2 (l_1 - l_2)}{g} = \frac{4\pi^2 (l' - l'')}{g},$$

откуда

$$g = \frac{4\pi^2 (l' - l'')}{T_1^2 - T_2^2}.$$

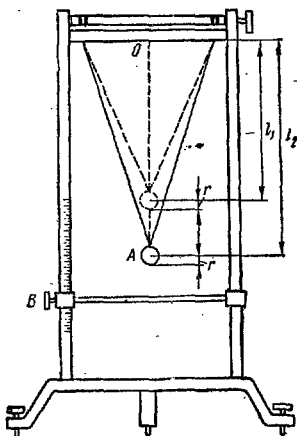


Рис. 33

Таким образом, для определения g нужно измерить лишь разности длин l' и l'' маятников. При таком способе измерения исключается необходимость измерения центра качения шарика.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Устанавливают длину маятника.

2. Подводя подвижную горизонтальную линейку к нижнему краю шарика, отмечают число делений по шкале вертикальной стойки и миллиметровой шкале.

3. Отводят маятник от положения равновесия на небольшой угол (около $5-6^\circ$)*, отпускают шарик, предоставив ему свободно колебаться. В момент наибольшего отклонения маятника пускают в ход секундомер и отсчитывают время τ_1 , в течение которого маятник совершит $n = 50$ полных колебаний. Измерение времени 50 колебаний для неизменной длины l' производится три раза и результаты записываются в таблицу.

4. Устанавливают новую длину маятника l'' , опустив шарик как можно ниже, и снова отмечают положение горизонтальной линейки, подведенной к нижнему краю шарика.

5. Для новой длины l'' измеряют время τ_2 50 колебаний способом, описанным в п. 3. Измерения производятся также три раза.

№ опыта	l	n	α	T_1	T_2	g	Δg	$g = \bar{g} \pm \Delta \bar{g}$
1	$l' =$							X
2								
3								
	Среднее значение	X	X	X	X			X
1	$l'' =$							X
2								
3								
	Среднее значение	X	X	X	X			

* При больших углах α T начинает увеличиваться.

6. По результатам измерений τ времени полных колебаний рассчитываются периоды колебаний T_1 и T_2 по формуле $T = \frac{\tau}{n}$.

7. Вычисляют g , пользуясь формулой выше.

Все измеренные (и вычисленные) результаты заносят в таблицу (см. таблицу на стр. 90).

Работа № 12 Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний

Приборы и принадлежности: кронштейн с закрепленной проволокой, испытуемое тело, два цилиндра, штангенциркуль, масштабная линейка, секундомер.

Теория метода и описание установки. Момент инерции тел правильной геометрической формы может быть вычислен теоретически. Если же тело имеет сложную форму (маховое колесо, коленчатый вал, винт и др.), то теоретически определить его момент инерции трудно. В таких случаях момент инерции определяют опытным путем.

Одним из методов экспериментального определения момента инерции тела является метод крутильных колебаний, которые совершает испытуемое тело A , подвешенное на упругой металлической проволоке B (рис. 34) так, чтобы один конец проволоки B проходил через центр тяжести тела O , а второй был закреплен в точке подвеса O' .

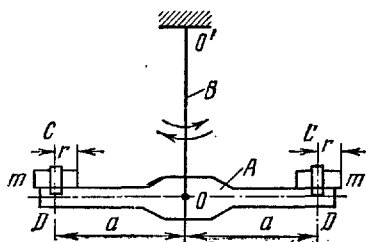


Рис. 34

Период крутильных колебаний выражается формулой (8). Из этой формулы находим момент инерции тела

$$J = \frac{T^2 D}{4\pi^2}. \quad (21)$$

Для того чтобы исключить из формулы (21) неизвестную величину D , делаем следующее: на тело симметрично оси

колебаний OO' помещаем добавочные грузы m (например, два равных цилиндра). Период свободных крутильных колебаний этой системы

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J + J_a}{D}},$$

откуда

$$D = \frac{4\pi^2 (J + J_a)}{T_1^2}.$$

Найденное значение D подставим в формулу (21) и, решив уравнение относительно J , получим:

$$J = \frac{T^2 J_a}{T_1^2 - T^2}, \quad (22)$$

где T и T_1 — периоды крутильных колебаний тела без грузов и с добавочными грузами, J_a — момент инерции двух одинаковых добавочных грузов (цилиндров) относительно оси вращения OO' , определяемый по теореме Штейнера (см. стр. 49).

$$J_a = 2 \left(\frac{mr^2}{2} + ma^2 \right), \quad (23)$$

где a — расстояние между осями CD и OO' , r — радиус цилиндров, m — масса цилиндров.

Выражение $\frac{1}{2} mr^2$ представляет собой момент инерции цилиндров относительно оси CD (оси, проходящей через центр тяжести цилиндров). Из формул (22) и (23) находим выражение для вычисления момента инерции тела:

$$J = m (2a^2 + r^2) \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}. \quad (24)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Исследуемое тело приводится в крутильные колебания. Секундомером измеряют время t (три раза), которое требуется для совершения 20 полных колебаний, и вычисляют период колебаний

$$T = \frac{t}{20}.$$

2. На одинаковых расстояниях от оси OO' закрепляют добавочные грузы и вновь определяют период колебаний (три раза)

$$T_1 = \frac{t_1}{20}.$$

3. Штангенциркулем измеряется радиус цилиндров r и линейкой — расстояние a между осями (рис. 34).

Измерения проводят три раза. Результаты измерений (и вычислений) заносятся в таблицу.

№ опыта	T	T_1	r	a	m	J	\bar{J}	$\frac{\Delta \bar{J}}{\bar{J}} \cdot 100\%$
1								
2								
3								

Примечание. Для ускорения вычислений рекомендуется вычислить множитель $A = m(2a^2 + r^2)$ в формуле (24), который является величиной постоянной.

Работа № 13 Изучение собственных колебаний пружинного маятника

Приборы и принадлежности: набор пружин и грузов, штатив, секундомер, сосуд с вязкой жидкостью.

Теория метода и описание установки. В данной работе рассматривают простейший случай собственных незатухающих колебаний пружинного маятника, а именно колебания груза на пружине. В воздухе эти колебания можно считать незатухающими. Уравнение таких колебаний имеет вид (см. стр. 83):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \text{ или } F = -kx, \quad (25)$$

где k — коэффициент упругости пружины.

Коэффициент k можно определить опытным путем, если измерить величину x , на которую растянется пружина A при подвешивании к ней груза $P = \bar{F}$ (рис. 35, а):

$$|k| = \frac{F}{x} = \frac{P}{x}. \quad (26)$$

Измерения и обработка результатов измерений. I. Определение коэффициента упругости. 1. Находят коэффициент упругости для каждой пружины по формуле (26). Измерения проводят для каждой пружины при трех различных грузах P .

2. Определяют зависимость периода собственных колебаний пружинного маятника от массы груза. Для этого измеряют секундомером период T_i собственных колебаний для одной из пружин с коэффициентом упругости k_1 при разных

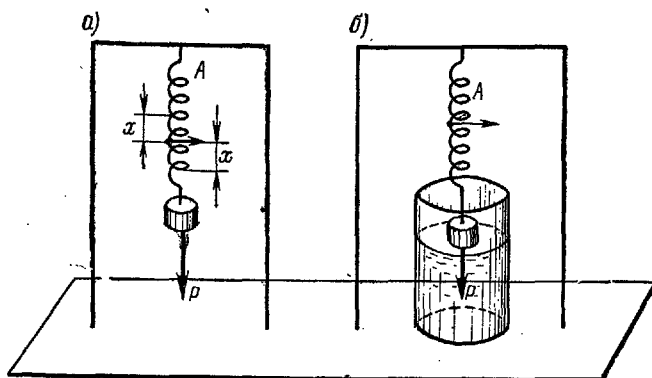


Рис. 35

грузах P и строят график зависимости T_i^2 от m (по оси x откладывают массу m).

Период T_i измеряют из 10—15 полных колебаний

$$T_i = \frac{t_i}{n_i},$$

где t_i — время n_i полных колебаний.

3. Находят зависимость собственных колебаний пружинного маятника от коэффициента упругости пружины, для чего измеряют периоды T_0 собственных колебаний пружин при одном и том же грузе P_0 и строят график зависимости T_0^2 от k (по оси абсцисс откладывают значения k).

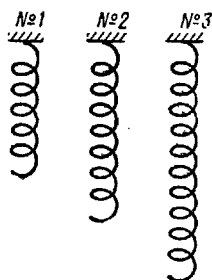


Рис. 36

4. По формуле (6) (см. введение) вычисляют теоретически коэффициенты упругости пружин

$$k_0 = \frac{4\pi^2 m}{T_0^2},$$

используя значения T_0 , полученные опытным путем. Вычисленные значения k_0 сравнивают с опытными результатами, полученными по формуле (26) для одних и тех же грузов P .

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицы для короткой пружины № 1, средней № 2 и длинной № 3 (рис. 36).

№ опыта	№ пружин						$P_0 =$			
	P	x	$k = \frac{P}{x}$	t_i	n_i	$T_i = \frac{t_i}{n_i}$	T_i^2	T_0	T_0^2	k_0
1										
2										
3										
Среднее значение	×	×		×	×	×	×	×	×	

II. Определение логарифмического декремента затухания пружинного маятника методом сравнения амплитуд. 1. Один из грузов P помещают в сосуд с вязкой жидкостью (рис. 35, б) и приводят в колебание. Измеряют время Δt , за которое начальная амплитуда A_0 уменьшится в 10 раз, т. е. $A_t = 10A_0$. Первоначальную амплитуду берут равной 70—100 мм.

Вычисляют логарифмический декремент затухания λ , для этого формулу (19) преобразуют следующим образом. Время t берут не для одного периода, а для n периодов и вычисляют отношение d двух амплитуд для времени $t = 0$ и $t = t_0 + nT_0$, т. е.

$$d = \frac{A_{t_0}}{A_{t_0 + nT_0}},$$

где T_0 — период затухающих колебаний.

В это выражение подставляют значения

$$A_{t_0} = A_0 e^{-\beta t_0} \quad \text{и} \quad A_{t_0 + nT_0} = A_0 e^{-\beta(t_0 + nT_0)}$$

и получают:

$$d = e^{\beta T_0 n}.$$

После логарифмирования будем иметь:

$$\ln d = n\beta T_0 = n\lambda,$$

отсюда

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln d = \frac{T_0}{\Delta t} \ln d, \quad (27)$$

где Δt — время, за которое маятник совершил n полных колебаний, т. е. $\Delta t = nT_0$, d — отношение двух амплитуд, отличающихся друг от друга на время Δt . В нашем случае $d = 10$ (амплитуда уменьшилась в 10 раз) и окончательная формула для λ пружинного маятника будет:

$$\lambda = \frac{T_0}{\Delta t} \ln 10 = 2,3 \frac{T_0}{\Delta t}. \quad (28)$$

По этой формуле вычисляют λ не менее трех раз, меняя начальную амплитуду A_0 . Значения T_0 берут из первого упражнения для той пружины, с которой проводили данное измерение.

2. Из формул $\beta = \frac{r}{2m}$ и (19) (см. введение) вычисляют коэффициент сопротивления (трения) среды:

$$r = \frac{2m\lambda}{T_0}.$$

Измерения и результаты вычислений записывают в таблицу.

A_0	Δt	λ	r	$T_0 = m =$
$A_0' \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix}$			×	
Средние значения	×			×
$A_0'' \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix}$			×	
Средние значения	×			×
$A_0''' \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix}$			×	
Средние значения	×			×

Приборы и принадлежности: пружинный маятник, вертикальная стойка, мотор, связанный передачей с эксцентриком, сосуд с трансформаторным маслом, вольтметр для контроля напряжения на моторе, реостат, регулирующий скорость оборотов мотора, секундомер.

Теория метода и описание установки. Если систему вывести из положения равновесия и предоставить самой себе (например, оттянуть вниз груз P на пружине), то она начнет совершать колебательное движение с некоторой определенной частотой ν_0 (собственной частотой).

Для поддержания колебательного процесса приходится прикладывать к системе периодическую внешнюю силу, которая заставляет систему совершать незатухающие *вынужденные колебания* с частотой вынуждающей силы ν .

Амплитуда вынужденных колебаний системы

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

где ω_0 — циклическая частота собственных колебаний системы, ω — циклическая частота вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения между циклической частотой вынуждающей силы ω и собственной циклической частотой ω_0 системы и от коэффициента затухания β .

Приближение собственной циклической частоты системы ω_0 к циклической частоте вынуждающей силы ω ($\omega \approx \omega_0$) называется резонансом. В случае резонанса при малом коэффициенте затухания β амплитуда вынужденных колебаний $A_{\text{рез}}$ достигает очень большой величины.

Величина резонансной амплитуды

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2m\beta\omega_0},$$

так как $(\omega_0^2 - \omega^2)^2 \approx 0$ (при резонансе).

Графически явление резонанса можно представить в виде амплитудных резонансных кривых или просто резонансных кривых (рис. 37) как функцию $A = f\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$ или $A = f\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)$,

где $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$ — частота собственных колебаний системы,

$\nu = \frac{1}{T}$ — частота вынужденных колебаний системы.

На рис. 37 кривые соответствуют различным коэффициентам затухания β .

В данной работе определяется логарифмический декремент затухания пружинного маятника и снимается его резонансная кривая.

Пружинный маятник (рис. 38) состоит из цилиндрической спиральной пружины R с грузом P на конце. Груз P представляет собой тело обтекаемой формы. Такая форма тела

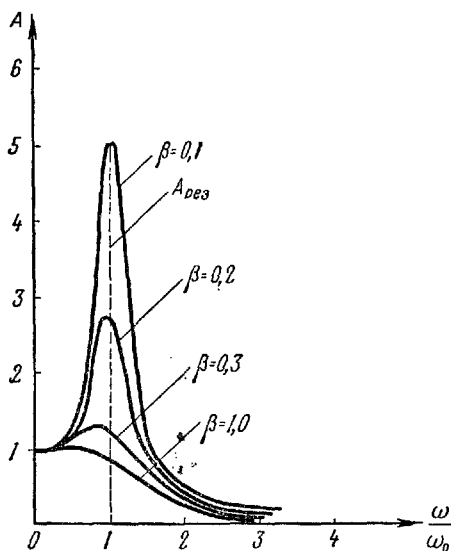


Рис. 37

предотвращает возникновение вихревых движений в жидкости — трансформаторном масле M . Верхний конец пружины соединен с нитью K , перекинутой через блок и прикрепленной к эксцентрику коллекторного электромотора. Вращение мотора с частотой ν передается грузу. Груз под влиянием вынуждающей силы (мотора) придет в колебательное движение с частотой ν (частота вынуждающей силы). Скорость мотора можно менять реостатом, включенным в цепь мотора, и поддерживать постоянной, наблюдая за вольтметром или вести регулировку при помощи регулятора, который имеется на моторе (в зависимости от конструкции мотора; цепь мотора на рисунке не показана).

Амплитуда колебаний груза P измеряется по вертикальной шкале S с помощью визира N .

Измерения и обработка результатов измерений. Для построения резонансной кривой необходимо снять не менее 15 точек, т. е. сделать измерения амплитуд A и периодов колебаний T не менее 15 раз. Точки резонансной кривой снимают следующим образом.

1. Вращая барабан регулятора числа оборотов мотора, устанавливают шкив, находящийся на одном валу с эксцентриком, на середину ведущего диска N , замыкая ключ в цепи мотора, включают мотор. Вращают регулятор оборотов до получения минимальной частоты оборотов.

2. Когда движение установится, измеряют амплитуду A_1 при минимальной частоте оборотов.

Амплитуду A_1 вычисляют по формуле

$$A_1 = \frac{n_1 - n_2}{2},$$

где n_1 — верхний отсчет по шкале, n_2 — нижний отсчет по шкале.

Измерения амплитуды A_1 проделывают не менее трех раз.

3. Определяют период T_1 , соответствующий амплитуде A_1 для 15 полных периодов:

$$T_1 = \frac{\Delta t}{15},$$

где Δt — время 15 полных периодов.

4. Медленно вращая регулятор, устанавливают амплитуду A_2 и период, соответствующий этой амплитуде T_2 . Измеряют A_2 и T_2 так же, как в пп. 2 и 3.

Такие измерения проделывают для 15 точек, постепенно меняя число оборотов мотора так, чтобы каждый раз изменение амплитуды было 10—20 мм. Амплитуду и период этих точек достаточно измерить один раз. При некотором числе

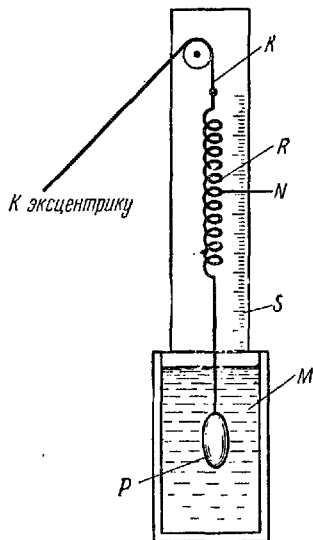


Рис. 38

оборотов мотора амплитуда колебаний маятника станет максимальной — явление резонанса, т. е. частота вынужденных колебаний (колебания, которые дает мотор) приближается к частоте собственных колебаний маятника. При дальнейшем увеличении числа оборотов мотора амплитуда начнет уменьшаться. Точку для резонансной амплитуды снимают не менее трех раз.

5. Находят значения частот $\nu = \frac{1}{T}$ для всех найденных точек кривой, а также отношения $\frac{\nu}{\nu_0}$.

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ опыта	A	$T = \frac{\Delta t}{15}$	ν	$\frac{\nu}{\nu_0}$
1	$A_1 =$	$T_1 =$	$\nu_1 =$	
2	$A_2 =$	$T_2 =$	$\nu_2 =$	
⋮	⋮	⋮	⋮	
15	$A_{15} =$	$T_{15} =$	$\nu_{15} =$	

6. Строят график зависимости амплитуды A от отношения частот $\frac{\nu}{\nu_0}$; $A = f\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)$, откладывая по оси абсцисс значения $\frac{\nu}{\nu_0}$, а по оси ординат соответствующие амплитуды.

Работа № 15

Определение логарифмического декремента затухания кристаллического тела — кварцевого резонатора

Приборы и принадлежности: измеритель параметров ИПР-1, устройство для крепления пьезокристалла, осциллограф, секундомер.

Теория метода и описание установки. В данной работе определяется логарифмический декремент затухания кварцевого резонатора. Кварцевый резонатор представляет собой электромеханическую колебательную систему. Прин-

тип работы такой системы смотрите в работе № 32. На блок-схеме (рис. 39) в держателе *B* помещена кварцевая линза (резонатор), которая приводится в колебания от измерителя параметров *A* (ИПР). Эти колебания измеряются электроизмерительным прибором, имеющимся на ИПР-1, и наблюдаются на экране осциллографа *C*.

Если к резонатору прикрепить любое твердое тело (получим составной резонатор), то можно данным методом определить логарифмический декремент затухания этого тела, а стало быть и внутреннее трение в данном твердом теле.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Включают ИПР и приводят в колебание кварцевый резонатор.

2. На электроизмерительном приборе наблюдают отклонение стрелки, а на экране осциллографа — появление синусоиды. Перед измерением устанавливают определенную амплитуду этой синусоиды.

3. Отключают резонатор от возбуждающей цепи (прибора ИПР-1), для чего нажимают на кнопку *D*. Амплитуда стрелки прибора начинает спадать, а амплитуда синусоиды на экране осциллографа при этом уменьшается. Наблюдают отклонения стрелки и изменение амплитуды несколько раз.

4. Для измерения декремента затуханий используют формулу (19), несколько ее преобразуя. Из этой формулы

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2},$$

но в нашем случае удобнее брать отношение *d* двух амплитуд *n* полных колебаний для времени $t = 0$ (A_{t_0}) к амплитуде времени $t = t_0 + nT_0$, т. е.

$$d = \frac{A_{t_0}}{A_{t_0 + nT_0}}.$$

После подстановки значения A_{t_0} и $A_{t_0 + nT}$ и логарифмирования последней формулы для λ получают следующее выражение [см. формулу (27)]

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln d = \frac{T_0}{\Delta t} \ln d = \frac{\ln d}{\Delta t \cdot \nu_0}, \quad (29)$$

где ν_0 — собственная частота колебания кварцевого резонатора, $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$; Δt — время, за которое кварцевый резонатор совершит n полных колебаний $\Delta t = nT_0$. Амплитуда стрелки прибора за время Δt уменьшилась в d раз.

В нашей работе удобнее брать уменьшение амплитуды в 2,7 раз ($d = 2,7$), так как $\ln 2,7 = 1$ и формула (29) примет простой вид:

$$\lambda = \frac{1}{\nu_0 \cdot \Delta t}. \quad (30)$$

Перед измерением вычисляют заранее значения амплитуд A_{t_0} и $A_{t_0+nT_0}$ по шкале прибора и по осциллографу.

5. Для определения λ делают следующее: а) приводят в колебание кварцевый резонатор нажимом на кнопку D и в тот момент, когда стрелка прибора достигнет вычисленного заранее значения амплитуды A_{t_0} , отключают резонатор от питания (нажимая кнопку D). В момент отключения резонатора пускают секундомер. В тот момент, когда стрелка прибора достигнет значения амплитуды $A_{t_0+nT_0}$ (заранее вычисленной), секундомер останавливают. Значение времени на секундомере и есть искомое Δt . Это измеренное время подставляют в формулу (30) и вычисляют λ . Такие измерения проделывают пять раз и подсчитывают абсолютные и относительные ошибки измерения. Значение ν_0 написано на приборе.

АКУСТИКА

Введение. Колеблующееся тело (камертон, струна, мембрана), находящееся в упругой среде, приводит в колебательное движение соприкасающиеся с ним частицы среды, вследствие чего в прилегающих к этому телу элементах среды возникают периодические деформации. Деформации (например, сжатия или разряжения среды) ведут к возникновению упругих сил, которые стремятся элементы среды вернуть в первоначальное состояние равновесия — возникают упругие колебания среды.

Так как соседние элементы среды взаимодействуют друг с другом, то эти упругие деформации будут передаваться от одних участков среды к другим.

Процесс распространения колебательного движения в среде называется волной. Волны могут быть *продольными*,

когда частицы среды колеблются вдоль линии, совпадающей с направлением распространения колебания, и *поперечными*, когда частицы среды колеблются перпендикулярно к направлению распространения волны. В жидкостях и газах возникают только продольные волны, распространяющиеся в виде чередующихся сжатий и разрежений среды. *Поверхности, до которых доходит колебание в некоторый момент времени, называются фронтом волны. Поверхности волны, в которых все частицы колеблются в одинаковой фазе, называются волновыми поверхностями.*

Для изотропной среды волновой фронт и волновая поверхность совпадают. *Механические деформации, распространяющиеся в упругой среде, называются упругими волнами.*

Если точка O совершает колебательное движение в упругой среде по закону $y(x, t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$ (рис. 40), где $y(x, t)$ — смещение колеблющейся точки, A — амплитуда (наибольшее смещение точки от положения равновесия), t — время, T — период, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая или круговая частота, φ_0 — начальная фаза колебания, то соседняя точка B среды придет в колебательное движение с некоторым запаздыванием на время

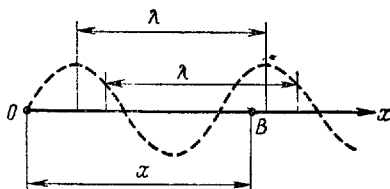


Рис. 40

где x — расстояние, на которое распространилось колебание от точки O до B , v — скорость распространения колебания от точки O до B (фазовая скорость волны).

$$\tau = \frac{x}{v},$$

Уравнение колебания смещений в точке B запишется:

$$y(x, t) = A \cos \omega(t - \tau) = A \cdot \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right). \quad (1)$$

Это — общее уравнение бегущей плоской синусоидальной волны. Оно определяет для любого момента времени t отклонение от положения равновесия колеблющихся частиц, находящихся в покое на расстоянии x от начала отсчета. Отклонение (смещение) $y(x, t)$ является функцией координаты

частицы в покое x и функции времени t . Расстояние λ , пройденное волной (определенной фазой колебания) за один период колебания, называется длиной волны, т. е. *длина волны — расстояние между соседними точками, находящимися в одинаковой фазе*, следовательно

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}; \quad \nu = \lambda\nu, \quad (2)$$

где ν — частота колебания частиц среды (частота волны).

Колебания ν частиц среды имеют ту же частоту, что и колебания источника волн. Волны, частоты колебаний частиц в которых лежат в пределах от 16 до 20 000 *гц*, называются звуковыми. В звуковой или акустической волне происходят механические колебания частиц среды с малыми амплитудами.

Звуковые волны в газах и жидкостях являются продольными и представляют собой последовательные сгущения и разрежения частиц воздуха. Звуковые волны могут распространяться только в упругой среде.

Работа № 16

Определение скорости звука и логарифмического декремента затухания методом резонанса

Приборы и принадлежности: стеклянная трубка с подвижным поршнем, звуковой генератор с телефоном, измерительная линейка, осциллограф С-1-1, микрофон МД-47.

Теория метода и описание установки. Метод определения скорости звука основан на свойствах звуковой стоячей волны. Стоячие волны являются частным случаем интерференции волн. Стоячие волны характеризуются точками, колебания в которых отсутствуют (точки B на рис. 41 — эти точки называются узлами), и точками, амплитуда колебаний в которых максимальная (точки C на рис. 41 — эти точки называются пучностями). Колебания во всех точках стоячей волны, лежащих между двумя соседними узлами, происходят с различными амплитудами, но одинаковыми фазами. Расстояния между соседними узлами или пучностями называется длиной стоячей волны ($\lambda_{ст}$). Длина звуковой (бегущей) волны

$$\lambda = 2\lambda_{ст}. \quad (3)$$

В экспериментальной установке (рис. 42), состоящей из звукового генератора $ЗГ$ с телефоном T , трубки O (в которой образуются стоячие волны) и подвижного поршня $П$, звуковые волны распространяются только вдоль трубки.

Звуковые стоячие волны образуются: 1) из прямой волны (сплошная линия), идущей от телефона T к поршню $П$ (рис. 43); 2) из отраженной (пунктир) от поршня $П$ волны, фаза которой изменилась на обратную, так как отражение происходит от среды акустически более плотной. В данном случае при отражении произошла потеря полуволны. При определенных условиях в трубке O возникнет акустический резонанс.

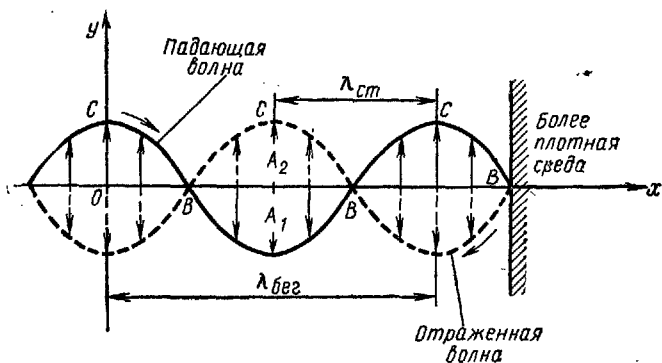


Рис. 41

Резонанс (откликаюсь) — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний в колебательной системе при приближении частоты внешней силы (вызывающей вынужденные колебания) к частоте какой-либо из собственных колебаний данной колебательной системы. В данном случае имеем акустический резонанс, т. е. явление, при котором колебания столба воздуха в трубе достигают максимальной амплитуды. Это происходит тогда, когда частота звуковых колебаний мембраны (внешняя, вынуждающая сила) приближается к одной из собственных частот воздушного столба в трубке. Эта частота называется резонансной частотой. При резонансной частоте звучание воздушного столба в трубе максимально.

Для наблюдения акустического резонанса нужно, чтобы столб воздуха в трубке O между поршнем $П$ и открытым концом K резонировал на звуковые волны, возбуждаемые

источником звука — телефоном T . Для этого необходимо, чтобы длина l столба воздуха в трубке между K и P удовлетворяла условию:

$$l = (2m - 1) \frac{\lambda_{ст}}{2}, \quad (4)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$

На рис. 43 на длине l столба воздуха в трубке укладывается пять половин стоячей волны (при $m = 3$).

В работе находят расстояние Δl между двумя ближайшими положениями поршня P — двумя соседними узлами, соответствующими наибольшей громкости звука в слуховой трубке D (на рис. 43 показано положение поршня в двух узлах, например 1 и 2). По формуле (3) длина стоячей звуковой волны $\lambda_{ст} = \Delta l$, а длина искомой звуковой волны

$$\lambda = 2\lambda_{ст} = 2 \cdot \Delta l. \quad (5)$$

Если постепенно отодвигать поршень от телефона, то можно добиться резонанса, т. е. максимального звучания воздушного столба, заключенного в трубке, и в трубке будет слышно последовательно усиление и ослабление

звучания. В трубке образуются стоячие волны, причем у поршня всегда будет узел, а у открытого конца, где подключена слуховая трубка, — пучность. Зная длину звуковой волны λ и частоту ν , которая указана на звуковом генераторе, определяют фазовую скорость распространения звуковой волны в воздухе по формуле

$$v = \lambda\nu = 2 \cdot \Delta l \cdot \nu. \quad (6)$$

Измерения и обработка результатов измерений. Излучателем в данной работе служит телефон T , подключенный к звуковому генератору $ЗГ$.

Для получения звукового сигнала надо (только с разрешения преподавателя или лаборанта) включить генератор

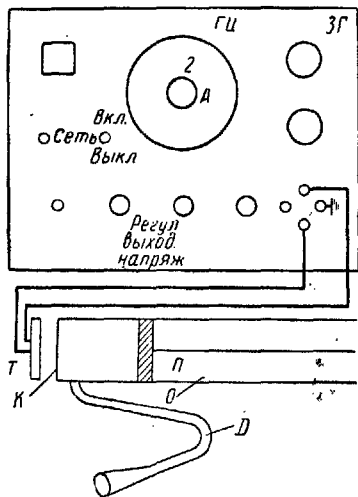


Рис. 42

в сеть, затем поставить тумблер «Сеть» на панели генератора в положение «Вкл.» (при этом загорится сигнальная лампочка) и спустя 2—3 мин вращением ручки настройки прибора установить указатель частот ГЦ на цифру, указанную преподавателем. Ставят поршень к отводной трубке и, вращая ручку регулятора выходного напряжения, устанавливают силу звука такой, чтобы сигнал был едва слышен. Остальные ручки управления генератора трогать запрещается.

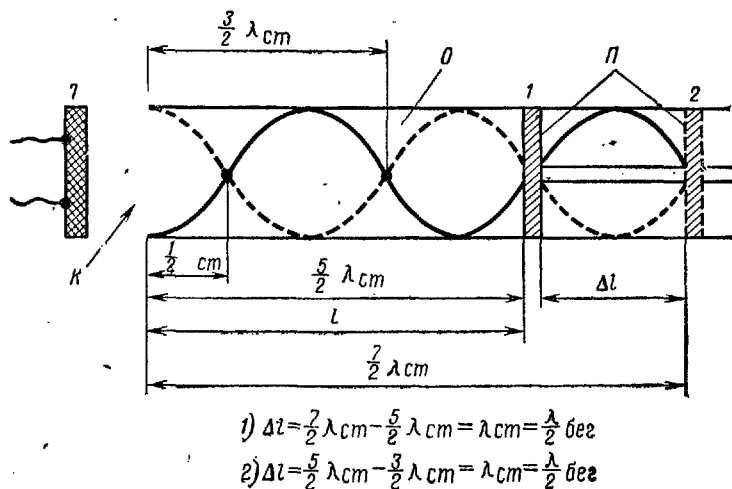


Рис. 43

Установив сигнал, приступают к измерениям.

1. Определение скорости звука в воздухе. 1. Медленно и равномерно отодвигая поршень от телефона, отмечают мелом на трубке точки резкого усиления звука по всей длине трубки.

2. Измеряют линейкой расстояния Δl между этими точками и записывают в таблицу.

3. Стерев мел, проводят еще четыре таких же измерения и выключают звуковой генератор.

4. По формуле (5) вычисляют длину звуковой волны для каждого из опытов, а по формуле (6) вычисляют фазовую скорость распространения звука также для каждого из опытов.

5. Находят среднюю скорость звука и подсчитывают ошибки измерений. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

v	l	λ	v	Δv	$\frac{\Delta v}{v} \cdot 100\%$
					X
Среднее значение	X				

II. Определение декремента затуханий упругих колебаний. Для определения декремента затухания упругих колебаний (в данной работе частиц воздуха) установку несколько изменяют.

1. К слуховой трубке D подносят вплотную микрофон, подключенный к пластинкам Y осциллографа (описание осциллографа см. на стр. 111). Для наблюдения на экране осциллографа сигнала необходимо: а) ручку «ослабление» поставить в положение 1; б) ручку «амплитуда синхронизации» в крайнее правое положение; в) «диапазон частот» в положение 130—550; г) «синхронизация» в положение «внутреннее».

2. Настраивают ZG на частоту 800 $гц$.

3. Не выключая осциллографа, устанавливают ручку «усиление» по оси X в положение 0 (нуль).

4. Медленно меняют положение поршня P в трубке O и наблюдают на экране осциллографа смещение луча. При пучностях звука смещение луча на экране осциллографа максимальное.

5. Измеряют три значения смещения луча A_1, A_2, A_3, \dots амплитуды колебания для соседних пучностей звука.

6. По формуле (19) (см. стр. 88)

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{A_2}{A_3} = \ln \frac{A_3}{A_4}$$

находят логарифмический декремент затухания, беря за A_1, A_2, A_3 две соседние амплитуды на экране осциллографа.

По найденному значению определяют коэффициент затухания

$$\beta = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu;$$

где T — период звуковых колебаний, ν — частота звуковых колебаний (800 гц).

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ опыта	A_1	A_2	A_3	λ	β
1					
2					
3					
4					
Среднее значение	×	×	×		

Работа № 17

Определение скорости звука в воздухе методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф ЭО-7, звуковой генератор ЗГ-1, динамик ГД-5, микрофон МД, усилитель, оптическая скамья.

Теория метода и описание установки. Скорость звука в воздухе можно определить из соотношения

$$v = \lambda_{зв} \nu, \quad (7)$$

где v — скорость звука, $\lambda_{зв}$ — длина звуковой волны в воздухе, ν — частота звуковых колебаний.

На отрезке z (рис. 44) разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ можно представить соотношением:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{z}{\lambda}; \quad \lambda = 2\pi \frac{z}{\Delta\varphi},$$

где $\Delta\varphi = 2\pi$.

состоящее из накаляемого током катода, анода и фокусирующего устройства (рис. 47).

Электроны, вылетающие из накаливаемого катода, разгоняются электрическим полем, имеющимся между катодом и анодом, до большей скорости; фокусирующее устройство сводит их в тонкий пучок — электронный луч. Широкое плоское дно трубки — ее экран — покрыто внутри слоем вещества, флуоресцирующего под действием ударов электронов. Хорошо сфокусированный электронный луч дает на экране небольшое светлое пятно. Между фокусирующим устройством и экраном расположены две пары управляющих пластин — два конденсатора C_1 и C_2 .

Когда конденсаторы заряжены, то один из них (C_1) создает вертикально направленное электрическое поле, а другой (C_2) — горизонтально направленное поле.

Конденсатор C_1 вызывает вертикальное перемещение электронного луча, а конденсатор C_2 — горизонтальное.

Если к конденсаторам подвести переменные напряжения, то электронный луч под действием полей обоих конденсаторов будет совершать сложное движение. В результате этого светлое пятнышко на экране трубки будет описывать кривую линию.

В ряде случаев подводимые напряжения бывают настолько малы, что они не вызывают заметного отклонения луча. Поэтому в осциллографе имеются усилители напряжений. Степень усиления можно регулировать ручками осциллографа с надписью «Усиление».

Напряжение на вертикально отклоняющие пластины

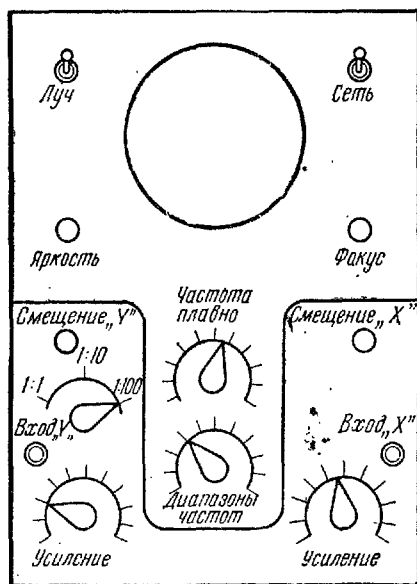


Рис. 48

подводится через клеммы осциллографа с надписью «Вход Y» и «Земля», а на горизонтально отклоняющие пластины — через клеммы «Вход X» и «Земля».

Вид передней панели осциллографа дан на рис. 48.

Электрические колебания от микрофона подводятся к вертикально отклоняющим пластинам («Вход Y»), а от звукового генератора — к горизонтально отклоняющим пластинам («Вход X»). Электронный луч, участвуя в двух взаимно перпендикулярных колебаниях по осям x и y с одинаковой частотой ω , будет описывать на экране различные траектории. Уравнения колебаний луча по осям x и y имеют следующий вид:

$$x = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1); \quad y = A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (9)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды колебаний, ω — частота, φ_1 и φ_2 — начальные фазы колебаний.

В общем случае при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний имеем *эллипс**, уравнение которого имеет вид:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (10)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ — разность фаз, складываемых колебаний.

В случае, если $\Delta\varphi = 0$ (начальные фазы одинаковы) или $\Delta\varphi = \pi, 2\pi, \dots$, уравнение (10) принимает следующий вид:

$$y = \pm \frac{A_2}{A_1} x.$$

Траектории движения луча представляют собой *прямые*, расположенные в разных квадрантах (см. рис. 45).

Если $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \dots$ уравнение принимает вид:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1,$$

т. е. имеем уравнение эллипса, приведенного к осям. Если $A_1 = A_2$, то эллипс переходит в окружность. Все остальные случаи разности фаз дают уравнения эллипсов, не приведенные к осям.

В нашем случае вид траекторий будет зависеть от разности фаз электрических колебаний, подаваемых от микро-

* Чтобы получить это уравнение, надо из уравнений (9) исключить параметр t , для чего возводим оба уравнения в квадрат и складываем.

фона и от звукового генератора. Разность фаз в свою очередь зависит от расстояния l между динамиком и микрофоном. Если это расстояние менять, передвигая микрофон, то форма траекторий будет меняться (поворачиваться). При увеличении расстояния между динамиком и микрофоном на длину звуковой волны разность фаз колебаний, подаваемых на осциллограф, увеличивается на 2π . Следовательно, траектория при этом сделает один полный оборот.

Таким образом, наименьшее расстояние $l_{\text{мин}}$ между двумя соседними положениями микрофона, при котором на экране осциллографа траектория сделает полный оборот, является длиной звуковой волны в воздухе:

$$\lambda_{\text{зв}} = l_{\text{мин}}.$$

Если при увеличении расстояния между динамиком и микрофоном траектория совершит n полных оборотов, то расстояние между первым и вторым положениями микрофона

$$l = \lambda_{\text{зв}} n.$$

Подставляя значение $\lambda_{\text{зв}}$ в формулу (7), будем иметь:

$$v = \lambda_{\text{зв}} \nu = \frac{l}{n} \nu. \quad (11)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают установку на оптической скамье AB по схеме рис. 46, расположив микрофон на скамье вплотную к динамику*.

2. Ручку осциллографа («Диапазон частот») ставят в положение «Вкл.».

3. Ручки «Усиление» по вертикали и горизонтали ставят на максимальное усиление.

4. Включают звуковой генератор, установив на нем нужную частоту ручкой «Диапазон частот». Панель звукового генератора дана на рис. 49.

5. Включают осциллограф. Если нужно, то ручками «Яркость», «Фокус», «Смещение Y » и «Смещение X » делают картину нужной яркости, резкости и располагают ее в центре экрана.

6. Ручкой звукового генератора «Амплитуда выхода» подбирают такое напряжение, чтобы траектория имела по горизонтали размеры 2—3 см.

* Так как электрические колебания в микрофоне имеют малую амплитуду, то они вначале подаются на специальный усилитель Y , а затем уже на «Вход Y » осциллографа.

7. Удаляют микрофон от динамика и, когда траектория делает полный оборот, отмечая на скамье положение микрофона, находят $\lambda_{зв} = l_{мин}$.

8. Передвигают микрофон дальше и находят новые положения микрофона на скамье, соответствующие повторению картины на экране (прямая линия), записывают n — число оборотов траектории и определяют расстояния l для данного n .

При удалении микрофона от динамика амплитуда электрических колебаний, создаваемых в микрофоне, уменьшается и траектория начинает вытягиваться вдоль горизонтали. Поэтому по мере удаления микрофона громкость звука нужно увеличивать, вращая регулятор громкости на динамике.

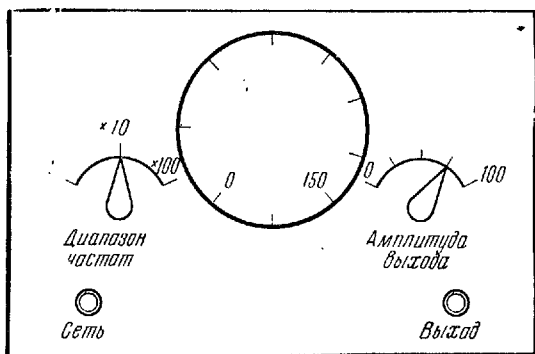


Рис. 49

9. Измерения повторяют, двигая микрофон обратно к динамику.

10. Измерения проводят для частот 1000 гц, 2500 гц и 3500 гц.

11. По формуле (11) вычисляют скорость звука.

Все полученные опытом и вычислением величины записывают в таблицу.

№ опыта	$l_{мин}$	n	l	v	Δv	$\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} \cdot 100\%$	$v_{ист} = \bar{v} \pm \Delta \bar{v}$
						×	×
Среднее значение			×				

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ЧАСТЬ II

СОСТОЯНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗА

Введение. I. В молекулярной физике и термодинамике изучаются не простые формы движения, с которыми имели дело в механике, а более сложные формы движения — движения тепловые.

При изучении кинетической теории газа рассматривают идеальный газ. *Идеальным газом называется газ, в котором пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия и объемом молекул газа.*

Считается, что при соударениях молекулы идеального газа ведут себя как абсолютно упругие шарики.

Состояние газа характеризуют основными параметрами: давлением p , температурой T , удельным или молярным объемом v .

Давление — физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности по нормали к ней:

$$p = \frac{dF_n}{dS}.$$

Температурой называется физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Для измерения температуры наиболее употребительны следующие шкалы: шкала Цельсия (стоградусная шкала), $t_0 = 0^\circ \text{C}$, $t_k = 100^\circ \text{C}$; шкала Кельвина, температура T отсчитывается от абсолютного нуля ($t = 273, 15^\circ \text{C}$) и называется абсолютной темпе-

ратурой. Связь между значениями температур по этим шкалам имеет вид:

$$T^{\circ} \text{K} = t^{\circ} \text{C} + 273,15^{\circ} \text{C}.$$

Абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул \bar{W}_k идеального газа

$$\bar{W}_k = \frac{3}{2} kT,$$

где k — постоянная Больцмана.

Удельным объемом v называется величина, обратная плотности ρ :

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

Килограмм-моль (кмоль) называется такое количество вещества, масса которого, выраженная в килограммах, численно равна его молекулярному весу μ .

Объем V_{μ} одного киломоля (или моля) вещества называется его мольным объемом:

$$V_{\mu} = \mu v = \frac{\mu}{\rho}.$$

Для идеальных газов справедливы следующие законы.

1. *Закон Бойля — Мариотта* (для изотермического процесса $T = \text{const}$),

$$pV = \text{const}.$$

2. *Законы Гей-Люссака* (для изохорического процесса $V = \text{const}$; для изобарического процесса $p = \text{const}$)

$$p = p_0 (1 + \alpha t), \quad V = V_0 (1 + \gamma t),$$

где p_0 и V_0 — давление и объем газа при $t = 0^{\circ} \text{C}$, α и γ — термический коэффициент давления и объемного расширения;

$$\alpha = \gamma = \frac{1}{273,15} \text{град}^{-1}.$$

3. *Уравнение состояния идеального газа Менделеева — Клапейрона* для одного киломоля газа имеет вид:

$$pV_{\mu} = RT, \quad (1)$$

где R — универсальная газовая постоянная, численно равная работе, совершаемой одним киломолем газа при изобарном нагревании его на один градус.

4. Авогадро установил закон, по которому килограмм-моли различных газов при одинаковых давлениях и температурах занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях, т. е. при $T_0 = 273,15^\circ \text{K}$, $p_0 = 1,0132 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ один киломоль любого газа занимает объем $v_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

Число молекул, находящихся в 1 см^3 идеального газа при нормальных условиях, называется числом Лошмидта — оно равно $n_0 = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Из закона Авогадро и уравнения Менделеева — Клапейрона следует, что универсальная газовая постоянная $R = \frac{pV_\mu}{T}$ является величиной одинаковой для всех газов,

$$\begin{aligned} R &= \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 22,4}{273} \frac{\text{н} \cdot \text{м}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{н} \cdot \text{м}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = \\ &= 0,0821 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 1,99 \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = \\ &= 8,31 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{моль} \cdot \text{град}}. \end{aligned}$$

Если рассматривать не один киломоль газа, а M килограммов газа, то уравнение Менделеева — Клапейрона для любого числа киломолей газа запишется так:

$$pV = \frac{M}{\mu} RT, \text{ или } p\mu = \rho RT, \quad (2)$$

где μ — молекулярный вес газа, $V = \frac{M}{\mu} V_\mu$ — полный объем газа, $\frac{M}{\mu}$ — число киломолей газа, $\rho = \frac{M}{V}$ — плотность газа.

Число молекул, содержащееся в одном киломоле, одинаково для всех газов

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}$$

и называется числом Авогадро.

Величина $k = \frac{R}{N_A}$ называется постоянной Больцмана: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ дж/град}$.

Из уравнения (1) можно выразить давление

$$p = \frac{RT}{V_\mu},$$

где V_μ — объем киломоля. Подставляя вместо $R = kN_A$, получаем:

$$p = \frac{kN_A}{V_\mu} T = knT, \quad (3)$$

где $n = \frac{N_A}{V_\mu}$ — число молекул в единице объема газа.

II. Атомы и молекулы газов находятся в состоянии непрерывного теплового движения. Движение это хаотично.

Распределение молекул газа по скоростям поступательного движения проходит по статистическому закону Максвелла для идеального газа. По закону Максвелла существуют три скорости, характеризующие состояние газа:

$$\left. \begin{aligned} \text{наиболее вероятная } u_v &= \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = 1,4 \sqrt{pV}, \\ \text{средняя арифметическая } \bar{u} &= \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = 1,6 \sqrt{pV}, \\ \text{средняя квадратичная } c = u_{\text{кв}} &= \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = 1,73 \sqrt{pV}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Молекулы непрерывно соударяются друг с другом. Между двумя последовательными соударениями молекулы двигаются прямолинейно и равномерно, проходя в среднем определенное расстояние, называемое *средней длиной свободного пробега молекулы* $\bar{\lambda}$.

Столкновение двух молекул характеризуется *эффективным поперечным сечением* соударения. Для молекул, диаметр которых $a \approx 10^{-8}$ см, эффективное газокинетическое поперечное сечение σ_0 равно площади круга с радиусом d .

Этот радиус называется *эффективным диаметром* молекулы. *Эффективный диаметр молекулы d определяет то минимальное расстояние между центрами двух молекул, на котором появляются силы отталкивания, производящие действие, подобно удару.* Зависимость между $\bar{\lambda}$ и d :

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi d^2 n} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \sigma_0}, \quad (5)$$

где n — число молекул в единице объема газа.

Связь между параметрами состояния газа (макроскопические величины) с характеристиками движения его молекул (микроскопические величины) выражает *основное уравнение кинетической теории газов*

$$pV = \frac{2}{3} W_k, \quad p = \frac{1}{3} n m u_{\text{кв}}^2,$$

где W_k — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа, находящихся в данном объеме V , W_k представляет собой величину, определяемую массой и средней квадратичной скоростью молекул газа, p — давление газа, V — объем газа, n — число молекул в единице объема, $u_{кв}$ — средняя квадратичная скорость молекул газа, m — масса молекул газа.

Эта формула легко объяснима, в самом деле: $p \sim n$ — пропорционально концентрации молекул, т. е. чем больше молекул, тем больше ударов о стенки сосуда, $p \sim m$ — пропорционально массе молекулы газа, $p \sim u_{кв}^2$ — пропорционально средней квадратичной скорости молекул (чем больше скорость молекул, тем чаще и сильнее удары молекул о стенки сосуда).

Работа № 18

Определение
универсальной газовой
постоянной
методом откачки

Теория метода и описание установки. В данной работе универсальная газовая постоянная измеряется методом откачки. Экспериментальная установка (рис. 50) состоит из объемного стеклянного баллона A (объемом V), соединенного с U-образным манометром B .

Уравнение Менделеева — Клапейрона (2) для объема V , при комнатной температуре t , атмосферном давлении p_1 , для массы воздуха M_1 в баллоне A запишется:

$$p_1 V = \frac{M_1}{\mu} R (T + t), \quad (6)$$

где $M_1 = m_1 - m_0$; m_0 — масса пустого баллона A , m_1 — суммарная масса баллона A и воздуха в нем при давлении p_1 . Если откачать насосом H воздух из баллона A до давления p_2 (при той же температуре t), то уравнение (6) запишется так:

$$p_2 V = \frac{M_2}{\mu} R (T + t), \quad (7)$$

где $M_2 = m_2 - m_0$; m_2 — суммарная масса баллона A и воздуха в нем при давлении p_2 (после откачки).

Из уравнения (6) и (7) найдем универсальную газовую постоянную

$$R = \frac{\mu (p_1 - p_2) \cdot V}{(m_1 - m_2) (273 + t)}. \quad (8)$$

Разность давлений $p_1 - p_2$ связана с показанием манометра B соотношением: $p_1 - p_2 = \rho gh$, где h — разность уровней манометра, ρ — плотность ртути, g — ускорение силы тяжести.

Подставляя $p_1 - p_2$ в уравнение (8); окончательно получим:

$$R = \frac{\mu \rho gh V}{(m_1 - m_2) (273 + t)}. \quad (9)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Аккуратно отсоединяют резиновые трубки C от баллона A , баллон A снимают с подставок D . На аналитических весах при открытых кранах a и b определяют суммарную массу m_1 (баллона A и воздуха в нем до откачки).

2. Баллон A закрепляют на подставках D и соединяют резиновыми трубками E и C с манометром B через сосуд F и насосом H .

3. Насосом H откачивают воздух из баллона A .

4. Когда давление в баллоне установится, т. е. прекратится колебание уровней ртути в коленах манометра B , по шкале манометра B производят отсчет разностей уровней ртути h в манометре.

5. Закрывают краны a и b . Отсоединяют баллон A от трубок C и E и при закрытых кранах a и b на аналитических весах определяют суммарную массу m_2 баллона и содержащегося в нем воздуха (после откачки). Измерения проделывают не менее трех раз при различных h .

6. По формуле (9) вычисляют искомую величину R .

Все полученные опытом (и вычислением) результаты записывают в таблицу.

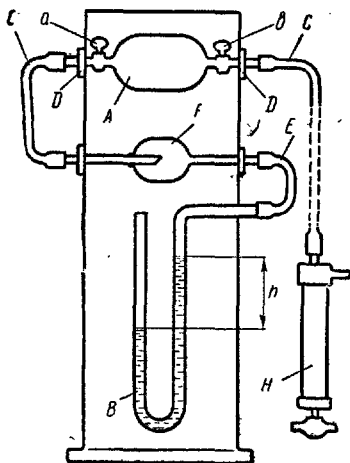


Рис. 50

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Наливают в кювету A эмульсию краски, накрывают покровным стеклом C и помещают на столик микроскопа D (рис. 51).

2. Настраивают микроскоп B так, чтобы отчетливо были видны частицы краски на одном из нижних уровней h_0 .

3. Отсчитывают число частиц n_0 , одновременно появляющихся в поле зрения микроскопа через каждые 10 сек. Произвести 30 отсчетов.

4. Пользуясь микрометрическим винтом, поднимают тубус микроскопа на некоторую высоту h и производят снова 30 отсчетов частиц n . При определении h необходимо учесть, что перемещение тубуса h' , отсчитанное по микрометрическому винту, соответствует кажущемуся расстоянию между слоями. Для определения истинного значения h нужно учесть показатель преломления среды $h = n_B h'$.

Подставляют в формулу (12) значения h и P . Получают:

$$N_A = \frac{RT \ln \frac{n_0}{n}}{(D - D_0) Vgh'n_B} \quad (13)$$

5. Подсчитывают N_A число Авогадро по формуле (13).

Все полученные опытным и вычислением результаты записывают в таблицу.

$$t = 10 \text{ сек}; \quad V = 1,4 \cdot 10^{-21} \text{ м}; \quad D = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad D_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3; \\ n_B = 1,33.$$

№ опыта	n_0	n	h	N_A
1				
2				
3			×	×
4				
5				
Среднее значение				

Приборы и принадлежности: особая установка, смонтированная на штативе, секундомер, стеклянный стаканчик с делениями, весы, термометр, барометр.

Теория метода и описание установки. Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, связывающие макроскопические параметры газа (давление, объем, температура) с его микроскопическими параметрами (размеры и масса молекулы, ее скорость, средняя длина свободного пробега). Пользуясь этими формулами, можно на основании измеренных макропараметров газа найти его микроскопические параметры. Для нахождения средней длины свободного пробега молекул газа $\bar{\lambda}$ используют формулу, выражающую зависимость коэффициента внутреннего трения (вязкости) η от $\bar{\lambda}$ и \bar{u} :

$$\eta = 0,5 \rho \bar{\lambda} \bar{u}, \quad (14)$$

где ρ — плотность газа, \bar{u} — средняя арифметическая скорость молекул газа.

Подставляя в формулу (14) значения ρ и \bar{u} из формул (2) и (4), получим:

$$\eta = 0,5 \frac{\mu p}{RT} \bar{\lambda} \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (15)$$

В данной работе используется зависимость коэффициента вязкости η от параметров трубки l (рис. 52), через которую проходит газ, и разности давлений Δp , возникающей на концах этой трубки. Эта зависимость выражает формулу Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Vl} \cdot \Delta p \tau, \quad (16)$$

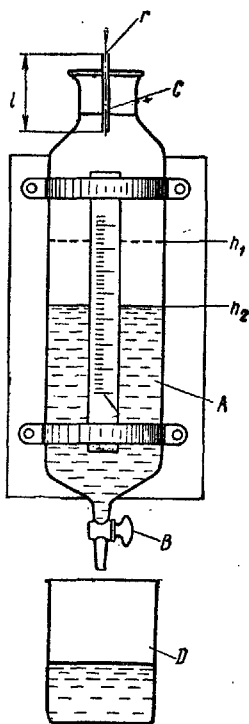


Рис. 52

где V — объем газа, в данном случае воздуха, проходящего через трубку C , длины l и радиуса r , за время τ , Δp — разность давлений на концах трубки C .

Из формулы (15) и (16) средняя длина свободного пробега молекул воздуха

$$\bar{\lambda} = \frac{\pi r^4 \sqrt{\pi R T} \Delta p \tau}{8 l p \sqrt{2} \mu V}. \quad (17)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Наполняют баллон A на три четверти водой и отмечают уровень воды h_1 .

2. Открывают кран B и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из баллона каплями, подставляют предварительно взвешенный стаканчик и включают секундомер.

3. Когда в стаканчике будет приблизительно $50-80 \text{ см}^3$ воды, закрывают кран B и одновременно останавливают секундомер.

4. Отмечают новый уровень воды h_2 .

5. Взвешивают стаканчик с водой.

Вес вытекшей из баллона воды $P = P_1 - P_0$, где P_1 — вес стаканчика вместе с водой, P_0 — вес пустого стаканчика.

По весу воды в стаканчике определяют объем воды. Объем вытекшей из баллона воды в стаканчике будет одновременно объемом воздуха V , вошедшего в баллон A через трубку C .

6. По формуле (17) подсчитывают среднюю длину свободного пробега молекул воздуха. Разность давлений вычисляют по формуле

$$\Delta p = \rho_0 g \frac{h_1 + h_2}{2},$$

где ρ_0 — плотность воды при температуре опыта, h_1 и h_2 — разности уровней в баллоне A .

Формулу (17) лучше написать в виде:

$$\bar{\lambda} = \text{const} \frac{\Delta p \cdot \tau}{V}, \quad (18)$$

где const (для данного опыта) = $\frac{\pi r^4 \sqrt{\pi R T}}{8 l p \sqrt{2} \cdot \mu}$.

7. Опыт повторить три раза.

8. По формуле (5) подсчитывают эффективный диаметр молекулы воздуха, предварительно заменяя в формуле n выражением

$$n = n_0 \frac{p T_0}{p_0 T}.$$

После замены окончательная формула для эффективного диаметра молекулы

$$d = \sqrt{\frac{T\rho_0}{V^2 \cdot \pi n_0 \rho T_0 \bar{\lambda}}} \quad (20)$$

В этой формуле: n_0 — число Лошмидта (стр. 118), $\rho_0 T_0$ — давление и температура при нормальных условиях, $\bar{\lambda}$ — средняя величина из трех значений λ , вычисленных по формуле (18), ρ , T — давление и температура, при которых протекает опыт, берут из показаний термометра и барометра, находящихся в лаборатории.

Результаты измерений (и вычислений) заносят в таблицу.

№ опыта	τ	h_1	h_2	Δp	V	λ	$\Delta \lambda$	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 100\%$	$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta \lambda$	d
1											
2											
3											
Среднее значение											

$$\begin{array}{lll}
 r = & T = 273 + t = & T_0 = \\
 l = & p = & p_0 = \\
 \mu_{\text{возд}} = & \rho_0 = & n_0 = \\
 R = & &
 \end{array}$$

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА (В ГАЗАХ, ЖИДКОСТЯХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ)

Введение. В результате хаотического движения молекул и соударений между ними происходят непрерывные изменения их скоростей и энергий в веществе. Если в веществе существует пространственная неоднородность плотности, температуры или скорости упорядоченного движения отдельных слоев вещества, то на беспорядочное тепловое движение молекул вещества накладывается упорядоченное движение, которое ведет к выравниванию этих неоднородностей. Это движение называется *явлением переноса*.

К явлениям переноса относятся *теплопроводность, внутреннее трение и диффузия*. Во всех трех явлениях имеется много общего, а именно в среде происходит направленный перенос какой-либо величины (энергии, количества движения, массы) из одной части вещества в другую до тех пор, пока данная величина не распределится равномерно по всему объему.

1. *Явление теплопроводности* состоит в направленном переносе энергии и возникает тогда, когда различные части среды имеют различную температуру, т. е. обладают *различной внутренней энергией*. Перенос тепла в теле происходит

в направлении точек тела, имеющих более низкую температуру.

В общем случае произвольного теплового состояния тела температура в его отдельных точках не только различна, но и изменяется со временем. Температура в различных точках тела является функцией координат точек x, y, z

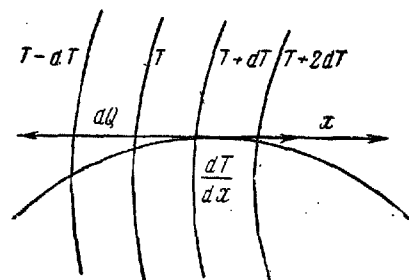


Рис. 53

и времени t . Этот случай известен как случай переменного теплового состояния тела и трудно поддается математическому анализу.

Значительно упрощается решение задачи о теплопроводности, если считать температуру в каждой отдельной точке постоянной, т. е. неизменяющейся со временем. Иначе говоря, температура в различных точках тела является функцией только координат точек x, y, z . Таким образом, можно написать:

$$t = \varphi(x, y, z).$$

Это случай стационарного теплового состояния. Поверхности одинаковой температуры, уравнения которых можно представить в виде:

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}$$

называются *изотермическими поверхностями*. Положение и форма изотермических поверхностей при стационарном тепловом состоянии со временем не изменяются. Нормали

к изотермическим поверхностям определяют те направления, по которым в теле распространяется тепло. На рис. 53 показан ряд изотермических поверхностей и нормали к ним.

В теории теплопроводности количество теплоты dQ , которое проходит внутри тела через элемент поверхности dS , определяется следующим уравнением (*уравнение Фурье*):

$$dQ = -K dS \frac{dT}{dx} dt, \quad (1)$$

где dt — время, K — коэффициент теплопроводности, $\frac{dT}{dx}$ — падение (градиент) температуры по направлению x , которое служит нормалью к изотермической поверхности.

Градиент температуры показывает изменение температуры на единицу длины по нормали к направлению движения тепла.

Знак минус в уравнении Фурье показывает, что энергия переносится в сторону убывания температуры T .

Коэффициент теплопроводности K численно равен количеству тепла, переносимому через единицу поверхности за единицу времени, при градиенте температуры, равном единице.

Размерность коэффициента теплопроводности, как следует из уравнения (1),

$$K = \text{кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}.$$

В системе СИ

$$K = \text{дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}.$$

В отличие от газов и жидкостей металлы обладают хорошей теплопроводностью, причем теплопроводность металлов тем больше, чем больше их электропроводность. Процесс теплопроводности в металлах в основном осуществляется за счет переноса энергии свободными электронами.

2. *Явление внутреннего трения* (вязкости) наблюдается в телах при всех агрегатных состояниях, но большое практическое значение это явление имеет для жидкостей и газов.

При движении жидкости или газа возникают *силы внутреннего трения*. Эти силы возникают вследствие того, что движение жидкости или газа слоистое и скорости перемещающихся слоев разные.

Силы внутреннего трения направлены к уравниванию скорости движения всех слоев. Уравнивание скорости слоев осуществляется путем передачи молекулами более быстрого слоя количества движения mv молекулам слоя, движущегося медленнее. Это приводит к увеличению скорости движения более медленного слоя. Слой же, движущийся быстрее, начинает двигаться медленнее, так как молекулы из медленного слоя, попадая в более быстрый слой, получают в быстром слое некоторое количество движения, что приводит к его торможению.

Таким образом, внутреннее трение обусловлено *переносом количества движения* mv молекулами вещества, которые

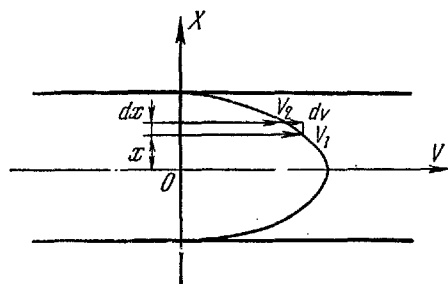


Рис. 54

переходят из слоя в слой и создают возникновение сил трения между слоями газа или жидкости, перемещающимися параллельно друг другу с различными скоростями.

Опыт показал, что сила внутреннего трения F пропорциональна величине площади соприкосновения движущихся слоев S , градиенту скорости $\frac{dv}{dx}$ движения слоев, коэффициенту пропорциональности η , который называется коэффициентом вязкости (закон Ньютона):

Опыт показал, что сила внутреннего трения F пропорциональна величине площади соприкосновения движущихся слоев S , градиенту скорости $\frac{dv}{dx}$ движения слоев, коэффициенту пропорциональности η , который называется коэффициентом вязкости (закон Ньютона):

$$F = -\eta S \frac{dv}{dx}. \quad (2)$$

Градиентом скорости $\frac{dv}{dx}$ называется изменение скорости dv на единицу длины dx в направлении, перпендикулярном скорости движения слоев (рис. 54). Коэффициент вязкости

$$\eta = -\frac{F}{S \frac{dv}{dx}}.$$

Коэффициент вязкости, или коэффициент внутреннего трения, есть физическая величина, числом равная силе внутреннего трения, между двумя слоями с площадью, равной единице при градиенте скорости, равном единице. В СИ $[\eta]$ кг/(м·сек).

Знак минус в формуле Ньютона показывает, что сила F направлена противоположно изменению скорости.

3. *Явление диффузии* возникает тогда, когда состав среды в различных частях различен и заключается в самопроизвольном взаимном проникновении и перемешивании частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел.

Явление диффузии связано с направленным *переносом массы вещества*. Перенос массы вещества подчиняется первому закону Фика

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} \cdot dS \cdot dt, \quad (3)$$

где dM — количество вещества, которое переносится за время dt через элементарную площадку dS в направлении нормали x к рассматриваемой площадке в сторону убывания плотности ρ , $\frac{d\rho}{dx}$ — *градиент плотности* (концентрации), изменение плотности на единицу длины по нормали x к слоям. Минус означает, что масса переносится в сторону убывания плотности, D — коэффициент диффузии,

$$D = -\frac{dM}{\frac{d\rho}{dx} \cdot dS \cdot dt}.$$

Коэффициентом диффузии D называется физическая величина, численно равная количеству массы вещества, переносимой через единицу площади за единицу времени при градиенте скорости, равном единице в направлении нормали x к рассматриваемой площади dS .

Работа № 21

Определение коэффициента теплопроводности металлов калориметрическим методом

Приборы и принадлежности: калориметрический цилиндр, весы с разновесками, электрическая плитка или горелка.

Описание установки. Коэффициент теплопроводности различных тел изменяется в широких пределах. Металлы обладают высоким коэффициентом теплопроводности (от 2

до $360 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$), а строительные и теплоизоляционные материалы — сравнительно малым (от $0,02$ до $2,5 \text{ ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$) *.

Прибор, служащий для определения коэффициента теплопроводности (рис. 55), состоит из металлического стержня A , укрепленного на резиновых пробках B . Во избежание тепловых потерь боковая поверхность стержня окружена теплоизоляционной стеклянной ватой C . К нижнему торцу D стержня через трубку E подводится водяной пар, а на верхний торец N , который является дном калориметрического стакана M , кладется лед или снег.

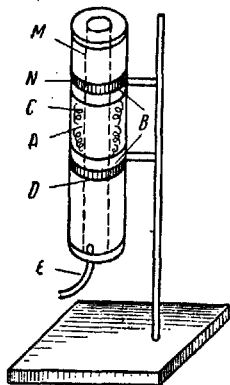


Рис. 55

На плавление льда идет количество тепла

$$dQ = mr, \quad (4)$$

где r — удельная теплота плавления льда.

Подставив в формулу (1) значение dQ из формулы (4), получаем:

$$mr = -K \frac{dT}{dt} \cdot dS \cdot dt, \text{ так как } dx = dl,$$

откуда

$$K = \frac{mr \cdot dl}{dS \cdot dT \cdot dt}. \quad (5)$$

Знак минус опускаем, так как K характеризуется только величиной dl , которая совпадает с длиной стержня l .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Подготавливают прибор к проведению опытов при постоянной разности температур на концах стержня. Эта подготовка состоит в следующем:

а) Формуют из снега или льда цилиндр и закладывают его в калориметр. Одновременно с этим подают снизу пары кипящей воды; отмечают температуру паров, соответствующую барометрическому давлению.

б) Отсасывают резиновой грушей воду, образующуюся при плавлении снега или льда; снег не должен всплывать.

Через 10 — 15 мин установится постоянная температура верхнего и нижнего торцов стержня, что соответствует тем-

* В технике принято коэффициент теплопроводности измерять в внесистемных единицах.

пературам кипящей воды и тающего льда ($\Delta T = 100^\circ \text{C}$ при нормальном давлении).

2. Опыты проводят два раза. Порядок проведения опытов следующий:

а) Формуют из снега или льда второй цилиндр и взвешивают его. Как только первый цилиндр растает и вода будет удалена, сейчас же закладывают второй цилиндр в калориметр; при этом отмечают время начала опыта.

б) Как только второй снежный цилиндр растает, отмечают время и закладывают третий цилиндр, предварительно взвешенный на весах.

При проведении опытов необходимо помнить, что точность результатов зависит от того, чтобы температура верхнего основания стержня оставалась постоянной.

3. Полученные из опыта данные и результаты вычислений по формуле (5) заносятся в таблицу, форму которой следует разработать самостоятельно. Вычисляют абсолютную и относительную ошибки измерений.

Размеры стержня dS и dl указаны на приборе; r взять из таблиц.

Работа № 22

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом температурного градиента

Приборы и принадлежности: калориметрический прибор, набор образцов, паровой бачок, электрическая плитка, трубки резиновые, термометры или термопары.

Теория метода и описание установки. Одним из методов определения коэффициента теплопроводности является метод температурного градиента.

Представление о методе температурного градиента можно получить из простого опыта (рис. 56). Испытуемый стержень (рис. 56, а) концом 1 погружен в сосуд I с кипящей водой, а концом 2 — в калориметр II, в котором находится вода при более низкой температуре (предполагается, что стержень окружен теплоизоляцией). Измерив температуру в калориметре до начала опыта, через некоторый промежуток времени dt можно вычислить количество тепла, dQ , прошедшее через стержень 1—2.

Если стержень состоит из двух различных материалов, границей которых служит сечение AB (рис. 56, б), то будет наблюдаться следующее. Через некоторое время после начала опыта процесс станет стационарным, т. е. количество тепла dQ_1 , приходящее к площади dS сечения AB от тела с более высокой температурой, будет равно количеству тепла dQ_2 , уходящему от этого сечения к телу с более низ-

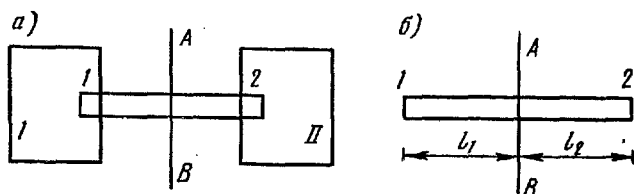


Рис. 56

кой температурой. Таким образом, когда $dQ_1 = dQ_2$, то на основании уравнения (1) имеем:

$$K_1 \frac{dT_1}{dl_1} \cdot dS \cdot d\tau = K_2 \frac{dT_2}{dl_2} \cdot dS \cdot d\tau, \quad (6)$$

где l_1 и l_2 — длины стержней из одного и другого материалов. Сокращая на $dS \cdot d\tau$, получим:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\frac{dT_2}{dl_2}}{\frac{dT_1}{dl_1}}. \quad (7)$$

Из этого соотношения следует, что падение температуры (градиент температуры $\frac{dT}{dl}$) будет меньше в стержне из материала, у которого коэффициент теплопроводности больше (имеем обратную зависимость между коэффициентом теплопроводности и температурным градиентом).

На этом принципе устроен прибор, показанный на рис. 57, состоящий из нижнего медного сосуда A , через который протекает проточная холодная вода, и такого же верхнего сосуда B , куда поступают пары кипящей воды.

Между обоими сосудами находятся три толстые медные пластинки C_1 , C_2 и C_3 со вставленными в них термометрами t_1 , t_2 и t_3 или термопары. Между верхней и средней пластинками помещается слой испытуемого вещества E , теплопроводность которого K_1 надо определить, а между средней

и нижней пластинками — слой вещества D с известной теплопроводностью K_2 . Оба слоя берутся с площадью поперечного сечения, равной площади сечения пластинок C_1 , C_2 и C_3 .

Показания терморпар или термометров t_1 , t_2 и t_3 в начале опыта изменяются, но через некоторый промежуток времени становятся неизменными, т. е. процесс — стационарный. В результате этого через сечения слоев E и D проходят в одинаковое время равные количества тепла.

Количество тепла, проходящее за время $d\tau$ через испытуемый слой E ,

$$dQ_1 = \frac{K_1(T_1 - T_2)S \cdot d\tau}{l_1},$$

где l_1 — толщина испытуемого слоя E .

Количество тепла, проходящее за время $d\tau$ через слой D ,

$$dQ_2 = \frac{K_2(T_2 - T_3)S \cdot d\tau}{l_2},$$

где l_2 — толщина слоя D .

Так как $dQ_1 = dQ_2$ (установившийся поток тепла — стационарный процесс), то

$$K_1 = \frac{K_2(T_2 - T_3)l_1}{l_2(T_1 - T_2)}. \quad (8)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Измеряют толщины испытуемого материала l_1 и известного материала l_2 .

2. Устанавливают прибор по описанной схеме.

3. Открывают водопроводный кран так, чтобы вода небольшими количествами выходила из сосуда A (трубка с вытекающей из сосуда водой отводится в раковину).

4. К верхнему сосуду B от парового бачка подводят пар.

5. При установлении стационарного процесса показания терморпар (термометров) T_1 , T_2 и T_3 записывают в таблицу отсчета.

6. Зная K_2 — коэффициент теплопроводности слоя D , находят по формуле (8) коэффициент теплопроводности K_1 испытуемого материала (слой E).

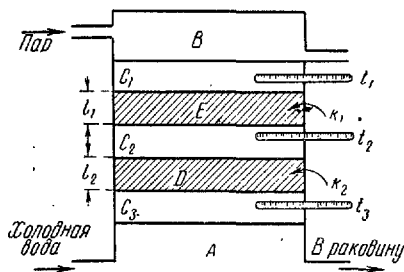


Рис. 57

7. Опыт повторяют, переменяя местами испытуемые материалы D и E .

Все полученные опытом и вычислением результаты заносят в таблицу.

№ опыта	Показания верхнего термометра (термомары) t_1	Показания среднего термометра (термомары) t_2	Показания нижнего термометра (термомары) t_3	Толщина		K_1	ΔK_1	$\frac{\Delta \bar{K}_1}{\bar{K}_1} \cdot 100\%$	$K_{\text{ист}} = \bar{K} \pm \pm \Delta \bar{K}$
				l_1	l_2				
								X	X
Среднее значение				X	X				

Работа № 23

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса)

Приборы и принадлежности: стеклянный цилиндр на подставке, микроскоп с предметным стеклом и осветителем, секундомер, пинцет, миллиметровая бумага, шарики.

Теория метода и описание установки. Коэффициент вязкости может быть определен методом падающего шарика в вязкой среде (метод Стокса). Рассмотрим свободное падение тела (в нашем случае — свинцового шарика) в вязкой покоящейся жидкости. На шарик, свободно падающий в такой жидкости, действуют:

1. Сила тяжести

$$P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g, \quad (9)$$

где r — радиус шарика, ρ_2 — плотность шарика, g — ускорение свободного падения.

2. Выталкивающая сила (по закону Архимеда)

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g, \quad (10)$$

где ρ_1 — плотность жидкости.

3. Сила сопротивления движению, вычисленная Стоксом, обусловленная силами внутреннего трения между слоями жидкости,

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (11)$$

где v — скорость слоев жидкости.

Подчеркиваем, что здесь играет роль не трение шарика о жидкость, а трение отдельных слоев жидкости друг о друга, так как при соприкосновении твердого тела с жидкостью к поверхности тела тотчас же прилипают молекулы жидкости. Тело обволакивается слоями жидкости и связано с ними межмолекулярными силами. Непосредственно прилегающий к телу слой жидкости движется вместе с телом со скоростью движения тела. Этот слой увлекает в своем движении соседние слои жидкости, которые на некоторый период времени приходят в плавное безвихревое движение (если малые скорости и маленькие шарики). Направление этих сил показано на рис. 58.

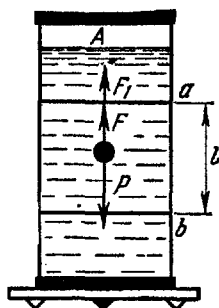


Рис. 58

Равнодействующая сил, действующих на шарик,

$$R = P - (F_1 + F). \quad (12)$$

Вначале скорость движения шарика будет возрастать, но так как по мере увеличения скорости шарика сила сопротивления будет также возрастать, то наступит такой момент, когда сила тяжести P будет уравновешена суммой сил F и F_1 , равнодействующая сила R станет равной нулю, т. е.

$$P - (F_1 + F) = 0. \quad (13)$$

С этого момента движение шарика становится равномерным с какой-то скоростью $v = v_0$.

Подставляя в (13) соответствующие значения P , F_1 и F , получим для коэффициента вязкости выражение

$$\eta = \frac{2}{9} (\rho_2 - \rho_1) \frac{gr^2}{v_0}. \quad (14)$$

Экспериментальная установка состоит из стеклянного цилиндра A , наполненного исследуемой жидкостью (рис. 58). На цилиндре нанесены две горизонтальные метки (проволочные кольца) a и b , расположенные друг от друга на расстоянии l (верхняя метка должна быть ниже уровня жидкости на 5—8 см).

Диаметры шариков измеряют микроскопом и окулярным микрометром. Окулярный микрометр представляет собой тонкую стеклянную пластинку с нанесенной на ней шкалой. Эта пластинка установлена в фокальной плоскости окуляра микроскопа. Рассматривая шарик в микроскоп, в поле зрения окуляра одновременно можно видеть изображение шарика и шкалы окулярного микрометра.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Для определения диаметров шариков необходимо установить цену деления окулярного микрометра.

Для этого помещают на предметное стекло кусочек миллиметровой бумаги и, сфокусировав на нее микроскоп, считают, сколько маленьких делений шкалы укладывается в одном делении миллиметровой бумаги. Если в данном миллиметре укладывается n делений шкалы, то цена делений

$$k = \frac{1}{n} \text{ мм} = \frac{1}{10n} \text{ см.}$$

2. Измеряют диаметр одного шарика следующим образом: шарик помещают на предметное стекло микроскопа; считают, сколько делений шкалы окулярного микрометра укладывается в диаметре D шарика и умножают число этих делений на цену деления шкалы. Таких измерений диаметра шарика делают три, поворачивая окуляр микроскопа вокруг оси и меняя, таким образом, ориентацию шарика относительно шкалы микроскопа. Находят три значения для диаметра шарика D_1 , D_2 , D_3 и берут среднее значение.

3. Измерив диаметр шарика, пицетом или острием опускают шарик в жидкость, как можно ближе к оси цилиндра. Глаз наблюдателя должен быть при этом установлен против верхней метки так, чтобы она сливалась в одну прямую. В момент прохождения шариком верхней метки пускают в ход секундомер. В момент прохождения шариком нижней метки секундомер останавливают. Отсчет по секундомеру дает время t прохождения шариком пути l . Так как скорости шариков довольно значительны, то, прежде чем производить отсчеты времени движения изме-

репного шарика, полезно провести пробные измерения времени движения шариков неизмеренных.

При наблюдении падения шариков следует осветить приборы со стороны наблюдателя.

4. Масштабной линейкой измеряют расстояние l между метками a и b .

Опыт повторяют 5—7 раз.

Полученные опытом и вычислением результаты сводятся в таблицу.

№ опыта	k	$\dot{D}_{\text{ср}}$	$r_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{ср}}}{2} k$	t	l	$v_0 = \frac{l}{t}$	η	$\Delta\eta$	$\frac{\Delta\bar{\eta}}{\bar{\eta}} \cdot 100\%$
1									
2									X
Средние значения									

Примечания. 1. При вычислении η формулу (14) удобно написать так:

$$\eta = A \frac{r^2}{v_0}, \text{ где } A = \frac{2}{9} (\rho_2 - \rho_1) g.$$

2. Плотность металлического шарика ρ_2 и плотность жидкости ρ_1 указаны на приборе.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Введение. Термодинамика изучает условия превращения энергии из одного вида в другой и характеризует эти превращения с количественной стороны. Термодинамика оперирует с макроскопическими характеристиками изучаемых ею объектов.

Законы, лежащие в основе термодинамики, носят название *начал термодинамики*. Известно три таких закона. Эти законы установлены на основании обобщения экспериментальных данных; их достоверность подтверждается результатами опытов.

Термодинамической системой называется совокупность макроскопических объектов, обменивающихся энергией в форме работы и в форме тепла как друг с другом, так и с внешней средой. *Термодинамическим процессом* называется всякое изменение состояния термодинамической системы.

Мы рассмотрим два начала (закона) термодинамики.

А. Первое начало термодинамики

Первый закон термодинамики выражает всеобщий закон сохранения и превращения энергии* и читается так: *теплота dQ , сообщаемая системе, расходуется на увеличение внутренней энергии системы dU и на совершение системой работы dA против внешних сил:*

$$dQ = dU + dA, \quad (1)$$

где dU — *внутренняя энергия системы*, т. е. сумма всех видов кинетической и потенциальной энергии всех составных частей системы: молекул, атомов, электронов и т. д. (для идеального газа внутренняя энергия представляет собой только кинетическую энергию хаотического теплового движения молекул); dQ и dA — соответственно *теплота*, подводимая к системе, и *работа, совершаемая системой против внешних сил*. Работа и теплота — две формы передачи энергии от одного тела к другому.

Работа сводится к тому, что энергия упорядоченного движения одного тела переходит в энергию упорядоченного движения другого тела, например расширяющийся газ перемещает поршень. Передача энергии в виде теплоты происходит при непосредственном обмене энергией между хаотически движущимися частицами взаимодействующих тел, например при взаимодействии холодного тела с горячим быстро движущиеся молекулы горячего тела сталкиваются с молекулами медленно движущимися холодного тела и передают им часть своей кинетической энергии, что приводит к нагреванию холодного тела, т. е. к увеличению его внутренней энергии. Работа и теплота существуют лишь в процессе передачи энергии.

Работа газа против сил внешнего давления

$$dA = p \cdot dV, \quad (2)$$

где p — внешнее давление, dV — приращение объема газа.

Рассмотрим первое начало термодинамики в применении к изопроцессам для одного киломоля газа. *Изопроцессами* называются термодинамические процессы, протекающие при постоянном значении одного из параметров состояния.

* Может быть применен и к тепловым процессам.

1. *Изохорический процесс* — процесс протекает при $V = \text{const}$, т. е. $dV = 0$ и $dA = p \cdot dV = 0$. Первое начало термодинамики имеет вид:

$$dQ_V = c_V \cdot dT = dU,$$

т. е. все тепло, подводимое к системе, идет на увеличение ее внутренней энергии, т. е. на нагревание системы; c_V — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме — физическая величина, численно равная количеству тепла dQ_V , которое нужно сообщить единице массы газа (1 кг), чтобы нагреть ее на 1°K при постоянном объеме.

Молярная теплоемкость при постоянном объеме C_V — теплоемкость одного киломоля:

$$C_V = c_V \mu,$$

где μ — молекулярный вес.

При изохорическом процессе

$$c_V = \frac{dU}{dT}. \quad (3)$$

Отсюда внутренняя энергия киломоля газа

$$U = c_V \int_{T_1}^{T_2} dT = c_V (T_2 - T_1).$$

Для любой массы газа m

$$U = \frac{m}{\mu} c_V (T_2 - T_1).$$

2. *Изобарический процесс* — процесс, протекающий при постоянном давлении $p = \text{const}$, т. е. $dp = 0$. В этом случае количество тепла, подводимое к системе:

$$dQ_p = c_p \cdot dT, \quad (4)$$

где c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении — физическая величина, численно равная количеству тепла dQ_p , которое надо сообщить единице массы газа, чтобы нагреть ее на 1°K при постоянном давлении.

Первое начало термодинамики для изобарического процесса запишется так:

$$dQ_p = dU + p \cdot dV$$

или из формул (3) и (4)

$$c_p \cdot dT = c_V \cdot dT + p \cdot dV.$$

Поделив все на dT , получим:

$$c_p = c_v + p \frac{dV}{dT}.$$

Из уравнения состояния газов $p \cdot dV = R \cdot dT$, учитывая, что $p = \text{const}$, $dp = 0$, имеем:

$$c_p = c_v + R. \quad (5)$$

Формула (5) — уравнение Майера, показывает, что при нагревании единицы массы газа при изобарическом процессе часть теплоты, равная c_v , идет на увеличение внутренней энергии газа, а часть, равная R , — на работу против внешних сил.

При изобарическом процессе газ не только нагревается, но и расширяется и совершает работу по преодолению внешнего давления. В этом случае газу нужно сообщить, кроме тепла, идущего на увеличение внутренней энергии, еще некоторое добавочное количество тепла, эквивалентное совершенной им внешней работе. Следовательно,

$$c_p > c_v. \quad (6)$$

3. *Изотермический процесс* — процесс, протекающий при постоянной температуре $T = \text{const}$; $dT = 0$.

Первое начало термодинамики запишется так:

$$dQ = dA, \quad \text{так как} \quad dU = 0.$$

Тепло в этом случае идет только на совершение работы против внешних сил; внутренняя энергия системы при изотермическом процессе остается без изменения $U = \text{const}$.

4. К этим основным процессам добавляется еще *адиабатический процесс*, такой процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой, т. е. $dQ = 0$.

Для адиабатического процесса первый закон термодинамики имеет вид:

$$dA = -dU \quad \text{или} \quad p \cdot dV = -c_v \cdot dT, \quad (7)$$

т. е. внешняя работа совершается за счет внутренней энергии системы. Если система расширяется, то ее температура понижается, так как уменьшается ее внутренняя энергия.

Для адиабатического процесса имеет место уравнение Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (8)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Б. Второе начало термодинамики. Функции состояния

Первый закон термодинамики не позволяет определить *направление протекания термодинамических процессов*, т. е. в его формулировке нет запрета для процесса передачи тепла от холодного тела к горячему. На самом деле так процесс идти не может. Второе начало термодинамики формулируется так: *Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме тепла от холодного тела к горячему*. Другую формулировку второго закона термодинамики можно дать через одну из функций состояния системы — энтропию: *энтропия термодинамических систем есть однозначная функция состояния этих систем*. *Функцией состояния* называется такая физическая характеристика системы, изменение которой при переходе системы из одного состояния в другое не зависит от вида соответствующего этому переходу термодинамического процесса, а целиком определяется значениями параметров начального и конечного состояний.

Важнейшими функциями состояния системы являются *внутренняя энергия U , энтропия S , свободная энергия $F = U - TS$* (TS — связанная энергия, представляющая собой ту часть внутренней энергии тела, которая не может быть передана в форме работы в изотермическом процессе). Все эти величины являются однозначными функциями состояния системы, т. е. при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 изменение, например, ее внутренней энергии ΔU не зависит от вида процесса и равно $\Delta U = U_2 - U_1$.

Если система совершает круговой процесс *, то

$$\oint dU = 0,$$

т. е. полное изменение ее внутренней энергии равно нулю.

Энтропией называется функция dS состояния системы, дифференциал которой в элементарном обратимом процессе равен отношению бесконечно малого количества тепла dQ , сообщенного системе, к абсолютной температуре последней T :

$$dS = \frac{dQ}{T}; \quad \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \quad (9)$$

* Круговым процессом (циклом) называется термодинамический процесс, в результате совершения которого система возвращается в исходное состояние.

Эти формулы дают возможность подсчитать только изменение энтропии. По знаку изменения энтропии системы в обратимом процессе можно судить о направлении теплообмена (при нагревании тела энтропия возрастает $S_2 > S_1$, при охлаждении убывает $S_2 < S_1$). При *равновесных** *адиабатных процессах* $dQ = 0$ и $S_2 = S_1 = \text{const}$ — энтропия не изменяется.

При других процессах — изохорическом, изобарическом, изотермическом энтропия изменяется. В частности при равновесном изотермическом процессе $T = \text{const}$ изменение энтропии равно:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ. \quad (10)$$

В *неизолированных термодинамических системах энтропия всегда возрастает* и уравнение запишется в общем случае так:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}; \quad S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Знак равенства относится к обратимым** процессам, а знак неравенства к необратимым.

Все реальные процессы необратимы, поэтому энтропия всегда возрастает.

Рассмотрим еще одну функцию состояния — свободную энергию. Из второго закона термодинамики $dS = \frac{dQ}{T}$. Подставляя в уравнение (1) $dQ = T \cdot dS$, имеем:

$$T \cdot dS = dU + \delta A;$$

$$\delta A = -dU + T \cdot dS = -d(U - TS) - S \cdot dT.$$

Для обратимого изотермического процесса $dT = 0$ и

$$A_{\text{изотерм}} = \int_0^A \delta A = - \int_1^2 d(U - TS);$$

$$A_{\text{изотерм}} = - (U - TS)_2 + (U - TS)_1.$$

* Равновесным процессом называется термодинамический процесс, при котором система проходит непрерывный ряд равновесных состояний (равновесным состоянием называется такое состояние, в котором система при отсутствии внешних воздействий может пребывать сколь угодно долго). *Равновесные процессы обратимы.*

** Обратимые процессы — такие процессы, которые можно провести в обратном направлении через те же самые состояния.

Выражение $(U - TS)$ называется *свободной энергией* системы и является также функцией состояния системы.

Свободная энергия является мерой той максимальной работы, которую могла бы совершить эта система в обратимом изотермическом процессе. Связь между внутренней энергией системы U и свободной энергией F выражается соотношением

$$U = F + TS$$

и приводит к важным выводам:

1) *Внутренняя энергия системы U равна сумме его свободной энергии и связанной энергии TS . Связанная энергия TS представляет собой ту часть внутренней энергии системы, которая не может быть передана в изотермическом процессе в форме работы. Это как бы «обесцененная» часть внутренней энергии, которая при прочих равных условиях тем больше, чем больше энтропия. Поэтому можно сказать, что энтропия является мерой «обесцененности» энергии.*

2) *При изотермическом процессе в работу превращается только свободная энергия системы.*

3) *Чем больше энтропия системы S , тем меньше свободная энергия системы.*

Работа № 24

Определение отношения
удельных теплоемкостей
газа методом
адиабатического
расширения

Приборы и принадлежности: закрытый стеклянный баллон, манометр насос.

Теория метода и описание установки. Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона A (рис. 59), соединенного с манометром B и с насосом (на рисунке не показан). Посредством крана C баллон A может быть соединен с атмосферой. Если при помощи насоса накачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри баллона повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравняется с температурой внешней среды t_1 .

Давление, установившееся в баллоне,

$$p_1 = H + h_1,$$

где H — атмосферное давление, h_1 — добавочное давление, измеряемое разностью уровней жидкости в манометре.

Таким образом, состояние воздуха внутри баллона, которое назовем *I состоянием*, характеризуется параметрами

$$p_1 = H + h_1; \quad V_1 \quad \text{и} \quad t_1.$$

Если открыть на короткое время кран C , то воздух в баллоне будет расширяться. Этот процесс расширения можно считать адиабатическим. Давление в сосуде установится равным атмосферному H , температура газа понизится до t_2 , а объем будет равен V_2 (см. п. 4 введения, стр. 142).

Следовательно, в конце адиабатического процесса, что назовем *II состоянием*, параметры будут:

$$H; \quad V_2 \quad \text{и} \quad t_2 < t_1.$$

Применяя к *I* и *II* состояниям уравнение (8), получим:

$$(H + h_1) V_1^\gamma = H V_2^\gamma, \\ \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \frac{H}{H + h_1}. \quad (11)$$

Охладившийся при расширении воздух в баллоне через некоторое время вследствие теплообмена нагреется до температуры внешней среды t_1 : давление возрастет до некоторой величины

$$p_2 = H + h_2,$$

где h_2 — новая разность уровней в манометре; объем воздуха не изменится и будет равен V_2 .

Таким образом, это состояние воздуха, которое назовем *III состоянием*, характеризуется параметрами

$$p_2 = H + h_2; \quad V_2 \quad \text{и} \quad t_1.$$

Так как в *I* и *III* состояниях воздух имеет одну и ту же температуру (*процесс изотермический*), то применяем закон Бойля — Мариотта ($pV = \text{const}$):

$$(H + h_1) V_1 = (H + h_2) V_2, \\ \frac{V_1}{V_2} = \frac{H + h_2}{H + h_1}. \quad (12)$$

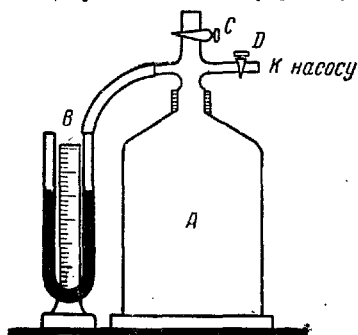


Рис. 59

Возведя обе части уравнения (12) в степень γ

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{H + h_2}{H + h_1}\right)^\gamma \quad (13)$$

и пользуясь выражением (11) и (13), получим:

$$\frac{H}{H + h_1} = \left(\frac{H + h_2}{H + h_1}\right)^\gamma.$$

Логарифмируя последнее выражение и решая относительно γ , находим:

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

Так как давления H , $H + h_1$ и $H + h_2$ мало отличаются друг от друга, то разности логарифмов можно принять пропорциональными разностям самих давлений и приближенно положить

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{(H + h_1) - H}{(H + h_1) - (H + h_2)}, \\ \gamma &= \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Убедившись в том, что кран C закрыт, осторожно с помощью насоса нагнетают воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет 60—100 мм.

2. Когда давление в баллоне полностью установится, показателем чего служит прекращение колебания уровней жидкости в коленах манометра, производят по шкале отсчет разности уровней жидкости в манометре h_1 .

3. Быстро открывают кран C и тотчас же (как только уровни жидкости в манометре сравняются) его закрывают. Когда давление окончательно установится, производят второй отсчет разности уровней в манометре h_2 .

Опыт повторяют 5—7 раз, меняя величину h_1 .

4. Подставляя в формулу (14) значения h_1 и h_2 , взятые из каждого отдельного опыта, вычисляют γ_1 , γ_2 , γ_3 и т. д.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты измерений сводятся в таблицу.

№ опыта	h_1	h_2	γ	$\Delta\gamma$	$\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\bar{\gamma}$
1					
2					
3					
Средние значения					

Работа № 25

Определение приращения энтропии при плавлении олова

Приборы и принадлежности: тигельная печь, тигель с оловом, термopара, милливольтметр, проградуированный на градусы, латунный сосуд с маслом, термометр, секундомер.

Теория метода и описание установки. В данной работе рассматривается изменение энтропии при плавлении олова. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре — температуре плавления и является изотермическим. Изменение энтропии в этом случае можно найти по формуле (10).

Определение приращения энтропии олова при его плавлении проводится следующим образом. Тигель *A* с оловом (рис. 60) помещают в тигельную печь *B*. Термопарой *E* измеряют температуру олова.

Количество теплоты, которое надо затратить, чтобы нагреть олово от комнатной (начальной) температуры T_K до температуры плавления T_{II}

$$Q_1 = \int_{T_K}^{T_{II}} cm \cdot dT,$$

где c и m — теплоемкость и масса олова.

Количество теплоты Q_2 , необходимое на плавление олова при температуре плавления T_{II} ($T_{II} = \text{const}$), равно:

$$Q_2 = \lambda m,$$

где λ — удельная теплота плавления олова.

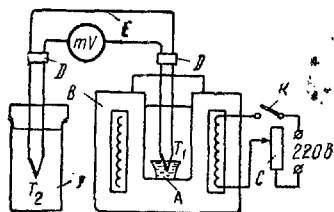


Рис. 60

Приращение энтропии при плавлении олова можно подсчитать по формулам (9) и (10):

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{dQ}{T}.$$

Подставим вместо Q его значение $Q_1 + Q_2$. Получим:

$$\Delta S = \int_{T_K}^{T_{II}} \frac{cm}{T} \cdot dT + \frac{\lambda m}{T_{II}} = cm \cdot \ln \frac{T_{II}}{T_K} + \frac{\lambda m}{T_{II}}. \quad (15)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему (рис. 60): на рисунке A — тигель с оловом, B — тигельная печь (дана в разрезе), C — лабораторный автотрансформатор, D — держатели из текстолита для термопар, E — термопара, F — латунный сосуд с маслом, mV — милливольтметр или гальванометр, проградуированный на градусы, K — ключ. Измерение температуры проводится термопарой E , один спай которой находится в тигле с оловом A при температуре $T_1 = T_{II}$, а спай второй — в сосуде с маслом (термостате) F при постоянной температуре $T_2 = T_K$. Температура T_2 известна. Концы термопары присоединяются к милливольтметру mV , шкала которого проградуирована на градусы температуры T_1 для определенного значения T_2 . Температура T_2 практически комнатная.

2. Включают цепь печи (замыкают ключ K) и доводят олово до жидкого состояния. Расплавление олова наблюдают непосредственно при открывании крышки печи.

3. Измеряют температуру, T_{II} плавления олова по милливольтметру mV .

4. Вычисляют по формуле (15) приращение энтропии при плавлении олова.

Величины c и λ берут из таблиц, $T_K = T_2 = t_0 + 273^\circ$, где t_0 — комнатная температура, $T_{II} = T_1$ получают из эксперимента в момент плавления олова.)

ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

1. Поверхностное натяжение жидкостей

По своим свойствам жидкости похожи и на газы и на твердые тела. Этот двойственный характер связан с особенностью движения молекул жидкости. В твердом теле мо-

лекулы составляют кристаллическую решетку и колеблются около своего положения равновесия (тепловое их движение). В жидкостях среднее расстояние между молекулами больше, чем у кристаллов, и поэтому молекулы жидкости могут отходить от своих правильных положений. *Молекулы жидкости совершают колебания около временных положений равновесия.* Побыв в таком положении некоторое время, молекула «перескакивает» в другое место и снова какое-то время живет в этом месте (совершая колебания) «оседлой жизнью». В «оседлом» состоянии молекулу жидкости удерживают упругие силы. Эти упругие силы обусловлены действием соседних молекул, расположенных на близком расстоянии. Молекулярные силы очень быстро убывают с увеличением расстояния. Если по отношению к какой-то молекуле M (рис. 61), находящейся

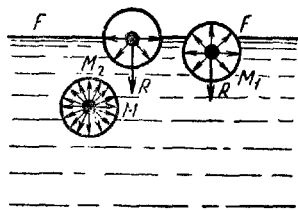


Рис. 61

ся внутри жидкости, соседние молекулы расположены симметрично, то равнодействующая R всех сил, приложенных к молекуле M , равна нулю $R = 0$. Однако вследствие теплового движения равновесие нарушается, и молекула приходит в движение под влиянием равнодействующей силы $R \neq 0$.

При сближении молекул друг с другом силы взаимного притяжения до определенного расстояния возрастают; при каком-то расстоянии между молекулами $r = r_0$ силы взаимодействия превращаются в нуль; если же расстояние между молекулами $r < r_0$, то вступают в действие силы отталкивания. В жидкости молекулы в основном находятся на расстоянии друг от друга меньшем r_0 , т. е. в жидкости преобладают силы отталкивания. Этим объясняется слабая сжимаемость жидкостей.

Молекулы жидкости, расположенные на поверхности, находятся в особом состоянии, например молекулы M_1 и M_2 . Действие на эти молекулы со стороны молекул жидкости больше, чем со стороны молекул пара или воздуха, и поэтому равнодействующая всех действующих на молекулу M_1 и M_2 молекулярных сил направлена внутрь жидкости нормально к ее поверхности. Отсюда следует, что на все молекулы, расположенные в тонком поверхностном слое, действуют силы, стремящиеся втянуть их внутрь жидко-

сти. Благодаря этому поверхностный слой давит с большой силой на жидкость, создавая в ней так называемое внутреннее или молекулярное давление. Это давление очень велико (для воды, например, около $11 \cdot 10^8$ н/м²).

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избытком энергии сравнительно с молекулами, находящимися внутри жидкости. Эта избыточная энергия называется *свободной поверхностной энергией* или просто *поверхностной энергией*. Указанными свойствами поверхностного слоя обусловлено особое его состояние, которое подобно состоянию натянутой упругой пленки, стремящейся сократить свою поверхность до малых размеров. Это *стремление жидкости сократить свою свободную поверхность называется поверхностным натяжением*.

Силы поверхностного натяжения F направлены по касательной к поверхности жидкости и действуют нормально к любой линии, проведенной на этой поверхности.

Для количественной характеристики силы поверхностного натяжения жидкости вводят *коэффициент поверхностного натяжения α* , который численно равен силе F , действующей на единицу длины произвольной линии L , мысленно проведенной на поверхности жидкости:

$$\alpha = \frac{F}{L}. \quad (1)$$

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения измеряется в ньютонах на метр (н/м).

Из рассмотрения свойств поверхностного слоя можно показать, что коэффициент поверхностного натяжения численно равен свободной поверхностной энергии W , рассчитанной на квадратный метр поверхности жидкости S

$$\alpha = \frac{W}{S}.$$

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения измеряется в джоулях на квадратный метр (дж/м²).

Коэффициент поверхностного натяжения различен для разных жидкостей. Он зависит от рода жидкости, температуры (уменьшается с повышением температуры) и от степени чистоты поверхности (изменяется от малейшего загрязнения).

Растворение в жидкости различных веществ (поверхностно-активных) изменяет коэффициент поверхностного

натяжения. Эти вещества адсорбируются на поверхности раздела и уменьшают свободную поверхностную энергию. Такими веществами являются жирные кислоты, их соли, спирты, эфиры и др.

Повышенная концентрация (адсорбция) поверхностно-активных веществ в поверхностном слое объясняется тем, что перенос молекул этих веществ к поверхности требует меньшей затраты энергии, чем перенос молекул воды.

Капиллярные явления. В узких стеклянных трубках, капиллярах, опущенных в жидкость, хорошо заметно поднятие или опускание жидкости. Поверхностная пленка жидкости в трубке под действием молекулярных сил жидкости и стекла принимает вогнутую форму (вогнутый мениск). На такой искривленной поверхности силы поверхностного натяжения вызывают *добавочное*

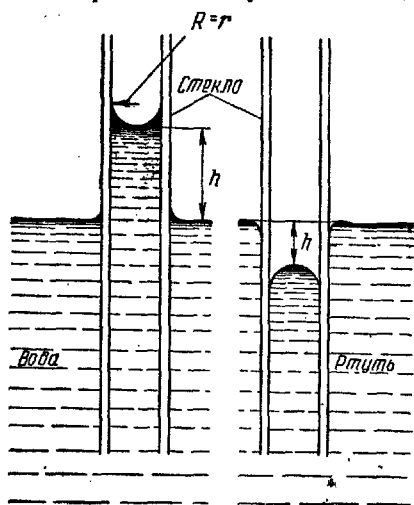


Рис. 62

давление Δp , обусловленное кривизной поверхности, направленное всегда в сторону вогнутой поверхности.

Величина добавочного давления над произвольной поверхностью вычисляется по *формуле Лапласа*

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностного слоя. Если поверхность сферическая, то $R_1 = R_2$ и

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R},$$

где R — радиус кривизны поверхности.

Этим добавочным давлением, т. е. давлением, обусловленным кривизной мениска, вызываются явления поднятия (а в случае несмачивающей жидкости — опускания) жид-

кости в капиллярах. Жидкость поднимается или опускается в капилляре до тех пор, пока добавочное давление не сравняется с гидростатическим давлением поднявшегося или опустившегося столба жидкости (рис. 62).

Если считать, что жидкость полностью смачивает поверхность трубки, то радиус кривизны мениска R совпадает с внутренним радиусом трубки r . По равенству добавочного и гидростатического давлений можно написать:

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{r} = \rho gh, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, h — высота ее поднятия, g — ускорение силы тяжести.

Из равенства (2) определяем коэффициент поверхностного натяжения:

$$\alpha = \frac{r\rho gh}{2}. \quad (3)$$

Капиллярные явления приходится учитывать в строительном деле, так как многие строительные материалы (песок, известь, бетон), керамические изделия, пористая глина, неглазированный фарфор пронизаны капиллярными ходами, по которым может проникать влага в помещения.

С другой стороны, если твердое гигроскопическое пористое тело, содержащее влагу в капиллярах, начнет высыхать, то лишь часть капилляров окажется заполненной жидкостью. Возникающие вследствие этого капиллярные силы могут быть столь значительны, что это приведет к заметному сжатию твердого тела. Таков, по-видимому, механизм усадки бетона при высыхании.

Работа № 26

Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца

Приборы и принадлежности: технические весы с разновесом, штангенциркуль, металлическое кольцо, сосуд с испытуемой жидкостью.

Теория метода и описание установки. Сущность метода состоит в том, что измеряются силы, которые необходимо приложить, чтобы оторвать тонкое металлическое кольцо от поверхности жидкости.

Экспериментальная установка представляет собой технические весы A , у которых на одно коромысло, кроме чашки, горизонтально подвешено тонкое алюминиевое кольцо (рис. 63). Под кольцо на штативе со столиком помещается сосуд с испытуемой жидкостью B .

Если подвести сосуд под кольцо так, чтобы оно нижним основанием касалось поверхности жидкости, то кольцо как бы прилипнет. Для отрыва кольца от поверхности надо приложить силу F . Отрыв (а точнее разрыв поверхности)

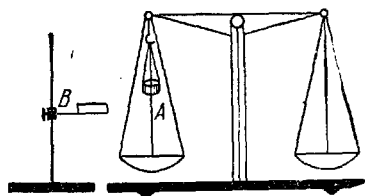


Рис. 63

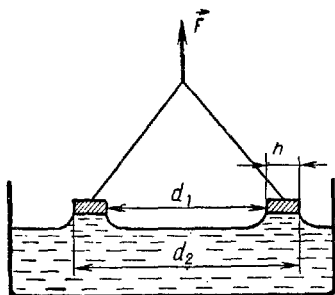


Рис. 64

происходит по двум окружностям, диаметры которых d_2 и d_1 равны внешнему и внутреннему диаметрам кольца (рис. 64).

Общая длина линий разрыва

$$\Delta = \pi d_1 + \pi d_2.$$

Обозначая толщину стенок кольца через h , имеем:

$$d_1 = d_2 - 2h.$$

Подставив последнее в выражение вместо d_2 , находим:

$$\Delta = 2\pi (d_2 - h).$$

На основании (1) получаем уравнение, по которому и вычисляем α :

$$\alpha = \frac{F}{2\pi (d_2 - h)}. \quad (4)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Измеряется штангенциркулем внешний диаметр d_2 и определяется толщина стенок кольца h .

2. Кольцо подвешивают на левое коромысло и уравновешивают весы разновесками.

3. Помещают под кольцо сосуд с испытуемой жидкостью. Подводят постепенно жидкость к кольцу до тех пор, пока кольцо не коснется своим основанием поверхности жидкости.

4. Правую чашку весов *осторожно* нагружают разновесками до тех пор, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости. Вес разновесок равен силе поверхностного натяжения F . Рекомендуется класть разновески на предварительно арретированные весы.

Опыт производят 3—5 раз.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу. Примерное расположение записи в таблице следующее:

№ опыта	d_2	h	F	α	$\Delta\alpha$	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot 100\%$
1						
2						
3						
Средние значения						

Работа № 27

Определение коэффициента поверхностного натяжения методом поднятия жидкости в капиллярах

Приборы и принадлежности: набор капиллярных трубок (радиусы трубок указаны на трубках), держатель капиллярных трубок, стакан для испытуемой жидкости, сосуды с растворами для промывания капилляров, катетометр или отсчетный микроскоп на ползушке, термометр, отвес.

Теория метода и описание установки. При определении коэффициента поверхностного натяжения при помощи капилляров используют формулу (3). Эта формула справедлива только при условии полного смачивания стекла жидкостью. Поэтому надо особо строго следить за чистотой капилляра.

В данной работе берут несколько капилляров, например три, радиусы которых r_1 , r_2 , r_3 . В этом случае коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = \frac{r_1 h_1}{2} \rho g = \frac{r_2 h_2}{2} \rho g = \frac{r_3 h_3}{2} \rho g.$$

Отсюда

$$h_1 - h_2 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1} - \frac{2\alpha}{\rho g r_2}; \quad h_1 - h_3 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1} - \frac{2\alpha}{\rho g r_3}.$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} (h_1 - h_2) \rho g = \frac{r_1 r_3}{2(r_3 - r_1)} (h_1 - h_3) \rho g.$$

Заменяя $h_1 - h_2 = \Delta H_2$; $h_1 - h_3 = \Delta H_3$ и подставляя в формулу (4), будем окончательно иметь:

$$\alpha = \frac{r_1 r_2 \rho g}{2(r_2 - r_1)} \Delta H_2 = \frac{r_1 r_3 \rho g}{2(r_3 - r_1)} \Delta H_3, \quad (5)$$

где ΔH_2 и ΔH_3 — разности отсчетов между нижними краями менисков (рис. 65).

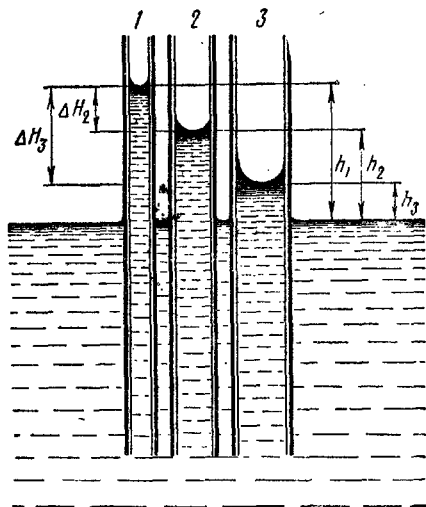


Рис. 65

Отсчеты ΔH_2 и ΔH_3 делают при помощи катетометра или отсчетного микроскопа. Описание и метод измерения отсчетным микроскопом даны в работе № 10.

Плотность жидкости при данной температуре находят по таблице.

На рис. 66, *a* дан общий вид установки: *A* — корпус отсчетного микроскопа, *B* — тубус микроскопа на подставке *O*, *C* — капилляры (вид сбоку), *D* — отвес, *E* — стойка, на которой укреплены капилляры, *K* — стакан с исследуемой жидкостью, *N* — подставка для двух параллельных стержней *R*, по которым при помощи винта *M* перемещается на ползушке *P* отсчетный микроскоп.

Измерения и обработка результатов измерений.

1. Чистые капилляры известного радиуса опускают по отвесу в сосуд с исследуемой жидкостью так, чтобы нижние концы капилляров были ниже уровня жидкости на 5—6 см. Через 1—2 мин их приподнимают, не вынимая из воды.

2. Отсчетным микроскопом находят величины ΔH_2 и ΔH_3 . Измерения микроскопом производят таким образом, чтобы деления сетки окулярной шкалы были касательными к мениску (рис. 66, *b*). Если все три трубки не попадают одновременно в поле зрения микроскопа, то микроскоп передвигают винтом *M* (см. рис. 66, *a*).

Изображение менисков в поле зрения перевернутое.

3. Подставляя в правую часть равенства (5) значения r_1 , r_2 , r_3 , ΔH_2 , ΔH_3 , ρ и g , находят коэффициент поверхностного натяжения.

Результат, полученный по формуле (5), более точный, чем по формуле (3), так как в нее входит не высота столбика жидкости, а разность отсчетов положений менисков.

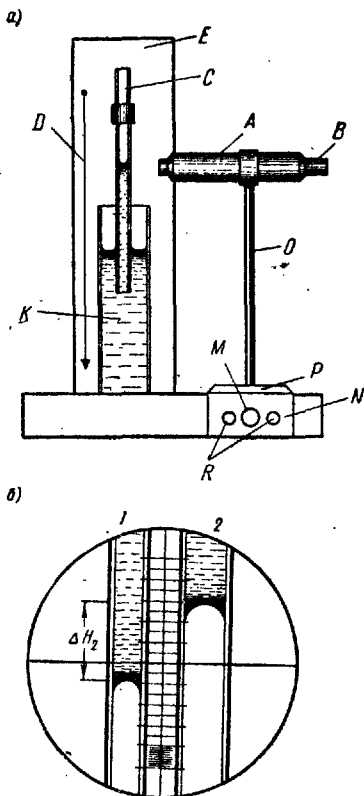


Рис. 66

Все результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу.

№ опыта	r_1	r_2	r_3	ΔH_1	ΔH_2	ρ	α	$\Delta\alpha$	$\frac{\Delta\bar{\alpha}_{\text{ср}}}{\bar{\alpha}_{\text{ср}}} \cdot 100\%$
1									X
2									
3									
Среднее значение	X	X	X			X			

Работа № 28

Определение зависимости поверхностного натяжения коэффициентов жидкости от температуры и от поверхностно-активных веществ торзионными весами

Приборы и принадлежности: торзионные весы, набор колец, штатив с ванночкой для испытуемой жидкости, электрическая плитка, пробирки с поверхностно-активными веществами.

Теория метода и описание установки. В данной работе коэффициент поверхностного натяжения жидкости (воды) определяется торзионными весами. Точность торзионных весов 1 мг. Основным элементом весов (рис. 67) является плоская спиральная пружина, которая с помощью рычага D закручивается под действием взвешиваемого предмета B (в нашей работе металлического колечка, подвешиваемого за крючок C). Если колечко B опустить в испытуемую жидкость, находящуюся в стакане E , так, чтобы оно лишь коснулось поверхности жидкости, то колечко «прилипнет» к жидкости. Для отрыва колечка необходимо приложить силу, вычисляемую по формуле (1).

В этой формуле сила F измеряется торзионными весами. Длина контура

$$L = \pi d_1 + \pi d_2,$$

где d_1 и d_2 — диаметры внешнего и внутреннего колец. Так как кольцо очень тонкое, то можно брать средний диаметр кольца и тогда длина контура

$$L = 2\pi d_{\text{ср}}. \quad (6)$$

Из формулы (1) и (6) коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = \frac{F}{2\pi d_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Измерения и обработка результатов измерений. I. Влияние температуры на поверхностное натяжение.

1. С помощью винтов a устанавливают весы по уровню b .

2. Освобождают рычаг D арретиром K .

3. Не касаясь кольца B , уравновешивают весы, для чего ручкой F устанавливают стрелку M на нуль и вращением корректора N совмещают указатель P с вертикальной чертой на шкале.

4. Открывают крышку весов R , подставляют стакан с жидкостью E и винтом поднимают стакан с жидкостью до того момента, пока кольцо не коснется поверхности жидкости.

5. Медленно передвигают рычаг F до момента отрыва кольца от поверхности жидкости и измеряют силу отрыва кольца. Измерения повторяют четыре раза, причем запись силы F (отрыва кольца от жидкости) ведут со второго отсчета, чтобы скомпенсировать вес частиц жидкости, прилипших к кольцу.

6. По формуле (7) подсчитывают α , беря среднее значение силы F .

7. Определяют зависимость α от температуры. Для этого берут другой стакан с жидкостью, подогревают жидкость на плитке до $70-80^\circ \text{C}$, подводят нагретую жидкость к кольцу и через каждые $5-6$ градусов определяют величину α , так, как это делали в п. 5.

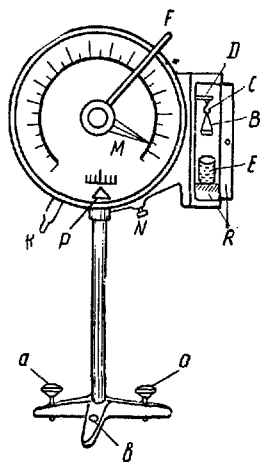


Рис. 67

8. По результатам измерений строят график зависимости $\alpha = f(t)$, откладывая по оси абсцисс значения температуры t , а по оси ординат измеренные значения α_t для данной температуры t .

Результаты измерений заносят в таблицу.

$$d_{\text{ср}} = (\text{указано на приборе})$$

№ опыта	F	α	t	F_t	α_t	$\alpha_{\text{раствора}}$
2						
3						
4						
Среднее значение						

II. Влияние поверхностно-активных веществ на поверхностное натяжение. В стакан с водой добавляют поверхностно-активное вещество (указанное на приборе) и измеряют коэффициент α полученного раствора. Измерения проводят для нескольких растворов и записывают α раствора.

II. Тепловое расширение и теплоемкость твердых тел

I. Строение твердых тел. Твердыми телами называются тела, у которых форма и объем постоянны. Твердые тела по своим физическим свойствам разделяются на тела: 1) кристаллические и 2) аморфные.

Кристаллы — твердые тела, имеющие правильное периодическое расположение составляющих их частиц. Кристаллы ограничены плоскими гранями, сходящимися в ребрах и вершинах.

Аморфными веществами называются вещества, не обладающие в конденсированном состоянии кристаллическим строением. Аморфными веществами являются неорганические стекла, плавленый кварц (*пористые аморфные вещества*), каучук, резина, органические стекла, смолы (*высокополимерные соединения*).

Кристаллические тела *анизотропны*, т. е. их физические свойства (упругость, теплопроводность, электропроводность) по различным направлениям неодинаковы.

Тела, свойства которых одинаковы по всем направлениям, называются *изотропными*. Изотропными телами яв-

ляются: газы, почти все жидкости и аморфные тела. Причиной *анизотропии* кристаллов служит упорядоченное расположение частиц вещества: атомов, молекул, ионов, из которых они состоят. Упорядоченность расположения частиц вещества кристалла заключается в том, что частицы вещества размещаются в узлах геометрически правильной пространственной решетки.

Твердые тела, кристаллическая структура которых обнаруживается непосредственно по их внешней форме, называются *монокристаллами*.

Монокристаллы имеют форму правильных многогранников. *Большинство же твердых тел, в том числе и металлы, существуют в виде поликристаллов, т. е. имеют мелкокристаллическую структуру.* Поликристаллы состоят из большого числа сросшихся мелких,

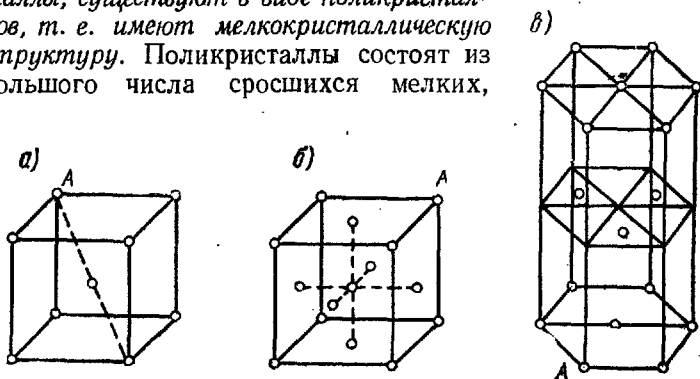


Рис. 68

хаотически расположенных отдельных кристалликов, которые называются кристаллитами, или зернами. Размеры таких зерен в металле, порядка $10^{-5} - 10^{-8}$ см, зависят от способа получения и обработки металла.

Взаимное расположение и ориентация отдельных кристаллитов в поликристаллическом веществе обычно хаотическое и поэтому поликристаллы (в размерах больших кристаллитов) являются изотропными.

Металлы являются поликристаллами. Тип кристаллической решетки у металлов и соответственно тип кристалла называется металлическим. Во всех узлах металлического кристалла расположены положительные ионы металла. Между ними беспорядочно, подобно молекулам газа, дви-

жуются электроны, которые отщепились от атомов при образовании ионов. Эти электроны играют роль «цемента», удерживая вместе положительные ионы.

Большинство металлов имеет вид решеток, показанных на рис. 68 (*а* — кубическая объемно-центрированная, *б* — кубически гранцентрированная, *в* — плотная гексагональная).

II. Тепловое расширение и теплоемкость твердых тел. Узлы *A* (рис. 68) кристаллической решетки определяют средние положения частиц для металла — положительных ионов. Тепловое движение в твердых телах сводится к колебаниям частиц около этих средних положений. Колебания частиц происходят ангармонично.

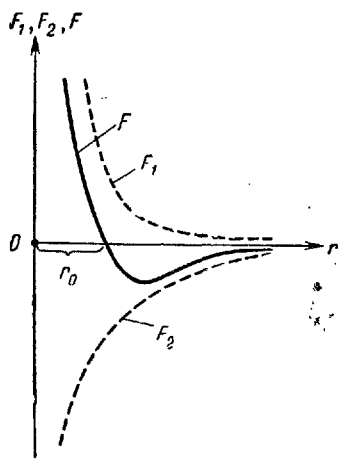


Рис. 69

При повышении температуры кристалла (металла) увеличивается энергия теплового движения, т. е. растет амплитуда колебания частиц. Если бы колебания частиц происходили строго гармонично, то увеличение амплитуды не привело бы к изменению среднего расстояния между частицами, вследствие же ангармоничности колебаний частиц расстояния между ними меняются. При сближении частиц силы притяжения и силы отталкивания несимметричны (рис. 69). На рис. 69 F_1 — силы отталкивания, F_2 — силы притяжения, F —

результатирующая сила взаимодействия, r_0 — расстояние, на котором силы F_1 и F_2 взаимно уравниваются. Из рисунка видно, что силы отталкивания при уменьшении расстояния между частицами растут много быстрее, чем силы притяжения. Это приводит к тому, что при увеличении температуры рост сил отталкивания между частицами тела преобладает над силами притяжения и тела расширяются.

Объем твердых тел при нагревании меняется мало, поэтому для твердого тела не различают теплоемкости C_v и C_p , а берут просто теплоемкость C .

Теплоемкостью твердого тела C называется физическая величина, численно равная изменению внутренней энергии dU единицы массы (или одного киломоля) твердого тела при нагревании на один градус:

$$C = \frac{dU}{dT}.$$

Запас внутренней энергии твердого тела представляет собой запас энергии колебаний частиц, из которых оно построено. Таким образом, теплоемкость является мерой изменения энергии колебаний частиц с температурой. Каждая частица может колебаться в узле в трех взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. имеет три колебательных степени свободы. На каждую степень свободы одной частицы в среднем приходится энергия kT , где k — постоянная Больцмана. Следовательно, на каждую колеблющуюся частицу приходится энергия, равная $3kT$.

Внутренняя энергия килограмм-атома твердого тела

$$U = 3N_A kT = 3RT, \quad \text{так как } N_A k = R,$$

где R — универсальная газовая постоянная, N_A — число атомов в килограмм-атоме (число Авогадро). Отсюда

$$\frac{dU}{dT} = C = 3R \approx 6 \text{ ккал/кг-атом} \cdot \text{град.}$$

Это выражение представляет собой закон Дюлонга и Пти: килограмм-атомная теплоемкость C всех химически простых кристаллических твердых тел приблизительно равна 6 ккал/кг-атом · град.

Закон выполняется довольно хорошо для многих веществ при комнатной температуре. Отклонения от этого закона для низких и высоких температур объясняются тем, что не учтено: квантование энергии колебательного движения и то обстоятельство, что в кристалле вследствие взаимодействия между частицами возникают гармонические упругие волны, имеющие различные частоты. (В квантовой теории этим волнам сопоставляются квазичастицы — фононы; фононы были введены вследствие того, что в твердом теле возникающие упругие волны являются акустическими и по аналогии с квантованием энергии электромагнитных волн квант энергии акустических волн был назван фононом).

Приборы и принадлежности: отсчетный микроскоп, муфельная печь, электрическая лампа, милливольтметр на 10 мв, сосуд с маслом, металлические стержни, термомпара с градуировочной кривой, штангенциркуль.

Теория метода и описание установки. При нагревании тела расширяются. Существует следующая зависимость между величинами, характеризующими тепловое расширение твердых тел,

$$\frac{r - r_0}{r_0} = \frac{\Delta l}{l} = \alpha T, \quad (1)$$

где r , r_0 — средние расстояния между колеблющимися частицами (см. введение) $r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{мин}} + r_{\text{макс}}}{2}$, l — длина тела, Δl — приращение длины, T — температура, α — коэффициент линейного расширения; α имеет различную величину для различных интервалов температур, поэтому берут средний коэффициент линейного расширения. *Средним коэффициентом линейного расширения называется физическая величина, численно равная среднему удлинению каждой единицы первоначальной длины l_0 при нагревании на 1°C в рассматриваемом интервале температур Δt :*

$$\alpha_t = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} = \frac{l_1 - l_0}{l_0 (t_1 - t_0)}, \quad (2)$$

где α_t — средний коэффициент линейного расширения в интервале температур Δt $^\circ \text{C}$, l_0 — первоначальная длина тела при температуре t_0 , l_1 — длина тела при температуре t_1 .

Величина $\frac{\Delta l}{\Delta t}$ — среднее удлинение при нагревании на 1°C в интервале Δt . Величина $\frac{\Delta l}{l_0}$ — относительное удлинение, происходящее при нагревании на 1°C .

Длина нагретого тела равна:

$$l = l_0 (1 + \alpha_t \cdot \Delta t). \quad (3)$$

Значение α_t зависит от материала; для металлов имеет порядок $10^{-4} - 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

В результате линейного расширения увеличивается и объем тела. Средний коэффициент объемного расширения $\beta_V = 3\alpha_t$:

$$\beta_V = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta t},$$

где ΔV — увеличение объема при нагревании на 1°C , V_0 — первоначальный объем, Δt — интервал температур.

Объем нагретого тела увеличивается и равен:

$$V = V_0 (1 + \beta_V \cdot \Delta t).$$

В данной работе средний коэффициент линейного расширения металла определяется методом измерения удлинения испытуемого металлического стержня при его нагревании. Удлинение стержня измеряется отсчетным микроскопом.

Отсчетный микроскоп (рис. 70) состоит из металлического стола A с предметным стеклом B . Металлический стол может перемещаться. Для освобождения продольного перемещения нажимают пружинную рукоятку e . Оптическая часть прибора помещена на кронштейнах K и состоит из объектива и окуляра.

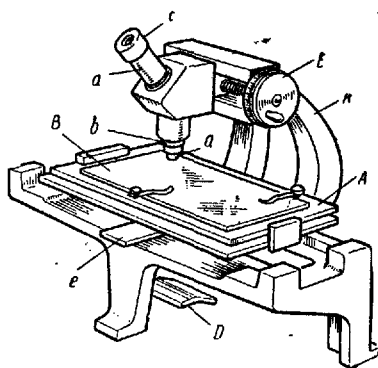


Рис. 70

Фокусировку объектива производят вращением накатанного пояса a и закрепляют контргайкой b . Для ориентировки окулярной сетки освобождают хомутик d . Установка окуляра на резкость достигается вращением оправы c (только после зажима хомутика). Отсчет производят по одиночному или двойному штриху сетки в поле зрения микроскопа.

Для измерения перемещения микроскопа в пределах от 0—50 мм имеется измерительный винт, который соединен с миллиметровой шкалой и барабаном E . Цена деления барабана 0,01 мм. Десятые доли делений барабана (микроны) отсчитывают на глаз.

Измерение приращения длины металлического стержня проводится на установке, показанной на рис. 71. На ри-

сунке A — стол микроскопа, K — муфельная печь, внутри которой помещен испытуемый образец (неподвижный стержень). Температура нагрева образца контролируется термопарой R , соединенной с милливольтметром mV . Измерение удлинения образца производится перемещением подвижного стержня P , прикрепленного металлическими кольцами к столу A . Одним концом стержень P через фарфоровый наконечник N соединяется с нагреваемым образцом, а другой его конец слегка закреплен пружиной F . На стержень P надета оправка со стеклом M . На стекле нанесена тонкая риска.

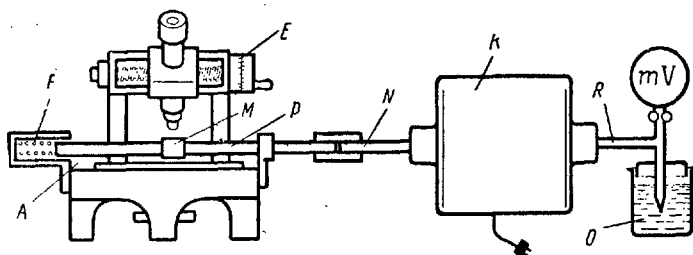


Рис. 71

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Знакомятся с установкой и микроскопом.

2. Штангенциркулем измеряют длину образца l_0 при комнатной температуре (набор образцов находится в коробочке). Нажимают пружинную рукоятку микроскопа e (см. рис. 70) вниз и отводят столик влево до конца.

3. Вставляют образец в муфельную печь K до упора, снова нажимают рукоятку e и перемещают стол микроскопа так, чтобы фарфоровый наконечник N подвижного стержня P коснулся конца образца.

4. Включают осветительную лампу микроскопа D и производят фокусировку микроскопа на риску стекла M , находящегося на стержне P . Совмещают риску со штрихом сетки.

5. Делают отсчет n_1 начального положения риски по миллиметровой шкале и барабану E .

6. Включают печь K и по градуировочной кривой термопары, показывающей зависимость $t = f(U)$, отсчитывают температуру нагрева печи t_1 . Один конец термопары помещен в отверстие в стержне образца в печи K , а второй — в латунный сосуд O с маслом.

7. Делают второй отсчет — n_2 конечного положения риски при температуре образца t_1 . Удлинение образца

$$\Delta l = l_1 - l_0 = 0,01 (n_2 - n_1) \text{ мм},$$

где l_1 и l_0 — конечная и начальная длины стержня.

8. По формуле (2) подсчитывают α_l . Измерения проводят по три раза для двух различных образцов.

Измерения и результаты измерений записывают в таблицу.

t_0 = (комнатная температура)

l_0 = (дано на приборе)

№ опыта	Отсчет по шкале и барабану		Δl	V	t_2	α_l
	n_1	n_2				
1						
2						
3						
Средние результаты	×	×	×	×	×	

Работа № 30

Определение среднего коэффициента линейного расширения металлов методом Д. И. Менделеева

Приборы и принадлежности: прибор Менделеева, нагреватель, индикатор удлинения.

Теория метода и описание установки. В данной работе для определения коэффициента линейного расширения α применяется формула (2). Установка представляет собой (рис. 72) длинную полую металлическую трубу L , обмотанную теплоизолирующим материалом. На одном конце трубы имеется метка N_1 . Вплотную к метке труба L при помощи кольца A жестко закрепляется к подставке. Другой конец N_2 трубы свободен и упирается в рычажок индикатора B . Нагревание трубы производится паром, поступающим из кипятильника C . Температура нагрева трубы фиксируется термометрами T_1 и T_2 , которые вставлены в трубу через просверленные в ней отверстия.

Измерения и обработка результатов измерений, 1. Измеряют расстояние l_0 от метки N_1 до конца трубы N_2 .

2. Соединяют трубу с кипятильником C и нагревают трубу L паром.

3. В момент, когда температура на термометрах T_1 и T_2 перестанет повышаться, измеряют по индикатору B

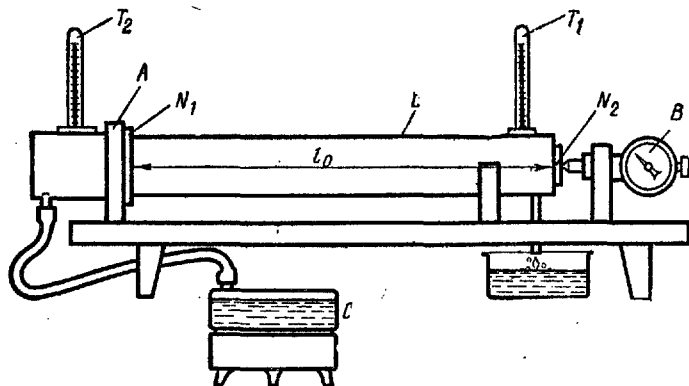


Рис. 72

удлинение трубы $\Delta l = n_2 - n_1$. Цена деления индикатора указана на приборе; n_2 и n_1 — показания на индикаторе.

4. Конечную температуру t_1 определяют как среднее значение из показаний термометров T_1 и T_2 .

5. По формуле (2) вычисляют α .

Работа № 31

Определение теплоемкости металлов методом охлаждения

Приборы и принадлежности: электропечь, набор образцов, секундомер, термомпара, гальванометр, реостат, ключ, весы технические с разновесами.

Теория метода и описание установки. Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела.

Если взять два металлических стержня определенной формы, то, сравнивая кривые охлаждения (температуры

в функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоемкость другого, определив скорость его охлаждения.

Количество тепла, теряемого элементарным объемом dV металла за время dt ,

$$dq = C\rho \frac{dT}{dt} \cdot dV \cdot dt, \quad (3)$$

где C — теплоемкость металла, ρ — плотность его, T — температура образца (принимается одинаковой во всех точках образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика). Величину dq можно подсчитать, кроме того, по закону Ньютона:

$$dq = \alpha (T - T_0) \cdot dS \cdot dt, \quad (4)$$

где dS — элемент поверхности, T_0 — температура окружающей среды, α — коэффициент теплоотдачи.

Приравнивая выражения (3) и (4), получим:

$$C\rho \frac{dT}{dt} dV = \alpha (T - T_0) dS.$$

Количество тепла, которое теряет весь объем образца,

$$Q = \int C\rho \frac{dT}{dt} dV = \int \alpha (T - T_0) dS.$$

Полагая, что $\frac{dT}{dt}$, C и ρ не зависят от координат точек объема, а α , T и T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать:

$$C\rho \frac{dT}{dt} V = \alpha (T - T_0) S, \quad (5)$$

где V — объем всего образца, S — поверхность всего образца.

Напишем соотношение (5) для двух одинаковых образцов. В этом случае $S_1 = S_2$, $T_1 = T_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$. Делением одного выражения на другое получим:

$$C_1 = C_2 \frac{m_2 \left(\frac{dT}{dt}\right)_2}{m_1 \left(\frac{dT}{dt}\right)_1}, \quad (6)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ — масса первого образца, $m_2 = \rho_2 V_2$ — масса второго образца.

В данной работе определение теплоемкости металлов проводится на установке рис. 73.

Электропечь *A* смонтирована на двух направляющих стержнях *C*, по которым она может перемещаться вверх и вниз. Образец *B* представляет собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 5 мм с высверленным каналом с одного конца. Этим каналом образец помещают на фарфоровую трубку, через которую пропущены проволоки термопары. Концы термопары подведены к гальванометру *G*. Температура образца отсчитывается прямо по шкале гальванометра, для чего последний снабжен специальным графиком перевода его показаний в значения температуры спая термопары.

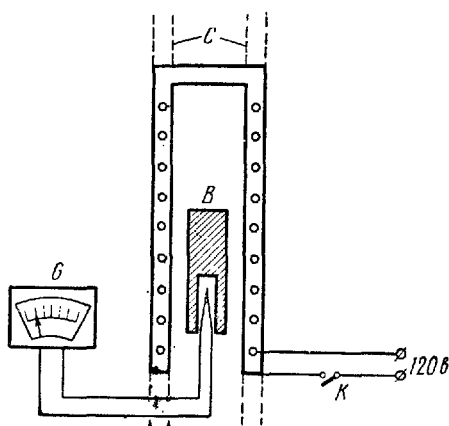


Рис. 73

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают установку (рис. 73).

2. Печь опускают по направляющим стержням вниз настолько, чтобы образец полностью оказался внутри нее.

3. Включают источник тока, замкнув ключ *K*.

4. Нагрев образец до температуры 500—600° С, печь быстро поднимают вверх и закрепляют.

5. Нагретый образец охлаждается в неподвижном воздухе. Через каждые 10 сек производят запись температуры *T* образца по показаниям гальванометра *G*. Время *t* отсчитывают по секундомеру.

6. После охлаждения образца до температуры ниже 100° опыт повторяют еще раз.

7. Строят график зависимости температуры *T* образца от времени *t*: $T = f(t)$. Откладывают по оси абсцисс время *t*,

а по оси ординат температуру T . Для каждого образца снимают две кривые охлаждения и строят график для меди Cu , железа Fe , алюминия Al по средним значениям.

Графическим методом переводят кривые $T = f(t)$ всех образцов в кривые $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$, для чего кривые $T = f(t)$ разбивают на одинаковые близкие друг к другу участки вертикальными линиями, перпендикулярными оси абсцисс. Разности значений ординат кривых в точках пересечения их с вертикальными линиями будут представлять собой разности температур $(T_1 - T_2)$, $(T_2 - T_3)$ и т. д. для интервалов времени Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 и т. д., на которые разбита ось абсцисс вертикальными линиями $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 1$.

Отношения

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t_1}; \quad \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_2 = \frac{T_2 - T_3}{\Delta t_2}; \quad \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_3 = \frac{T_3 - T_4}{\Delta t_3} \quad (7)$$

и т. д. характеризуют скорость охлаждения в данной точке кривой и, следовательно, скорость охлаждения, соответствующую некоторой температуре. Числовые значения, полученные по формуле (7), вносят в таблицу записи результатов и строят график зависимости $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$ для образцов Cu , Fe , Al , откладывая по оси абсцисс значения температуры T , по оси ординат значения $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ первого графика.

8. Определяют теплоемкость C_1 алюминия, а потом железа C_3 для температур 100, 200, 300, 400, 500° С. Для этого в формулу (6) подставляют значения $\frac{dT}{dt}$ для каждого образца при этих температурах. За эталонный образец принимают медный. Зависимость теплоемкости меди от температуры дана в таблице на установке. Из таблицы берут значения теплоемкости меди (C_2) для температуры 100, 200, 300, 400, 500, 600° С и подставляют в формулу (6) соответствующие значения $\frac{dT}{dt}$ для меди, которые также берут из графика $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$ для медного образца. Массы m_1 , m_2 , m_3 образцов определяют взвешиванием*.

* Настоящий метод разработан в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова.

Все полученные опытом и вычислением результаты вносятся в таблицу

№ опыта t через каждые 10 сек	T_{Cu}			T_{Fe}			T_{Al}			$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{Cu}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{Fe}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{Al}$	C1 Fe	C2 Cu (выписать из таблицы)	C3 Al
	T_1	T_2	T	T_1	T_2	T	T_1	T_2	T						

Работа № 32 Изучение зависимости изменения собственной частоты колебаний кристаллического тела от температуры

Приборы и принадлежности: генератор электромагнитных колебаний ИПР-1, кварцевый резонатор (испытываемое твердое кристаллическое тело), термостат или сушильный шкаф, гетеродинный волномер Т-526У, осциллограф СИ-1, термометр от 0—100° С.

Теория метода и описание установки. В некоторых кристаллических твердых телах, например кварце, турмалине, сегнетовой соли, титанате бария, цинковой обманке и др., наблюдается *пьезоэлектрический эффект*, обнаруженный Пьером и Жаком Кюри в 1880 г. Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при механических деформациях кристаллов в определенных направлениях на их гранях появляются заряды противоположных знаков. *Обратный пьезоэлектрический эффект* — явление, при котором кристаллы, помещенные в электрическое поле, изменяют свои линейные размеры под действием этого поля. Например, если к кварцевой пластинке А, вырезанной определенным образом по отношению к ее кристаллографическим осям (рис. 74), приложить с помощью металлических обкладок переменное напряжение, то размеры этой пластинки будут изменяться с изменением частоты приложенного переменного напряжения — пластинка будет попеременно расширяться и сокращаться, т. е. придет в колебание (рис. 75).

На рис. 75 Е — линии напряженности электрического поля, перпендикулярные к грани пластинки, x — амплитуда удлинений и сжатий пластинки. Если частота переменного напряжения совпадает с частотой собственных механических колебаний пластинки, т. е. если пластинка и напря-

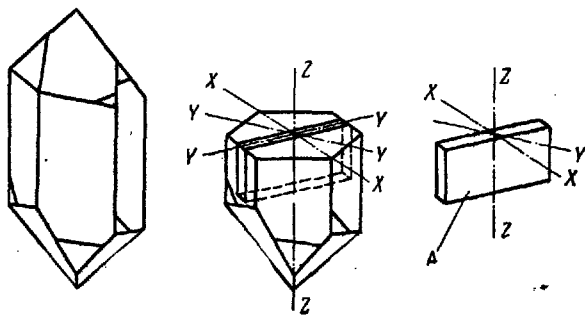


Рис. 74

жение электрического поля колеблется в резонанс, амплитуда x упругих колебаний пластинки достигает значительной величины.

Колеблющаяся кварцевая пластинка возбуждает в окружающей среде упругие волны, частота которых равна

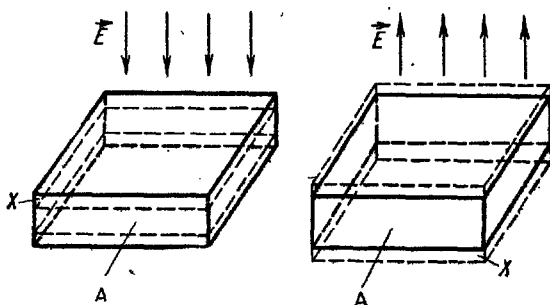


Рис. 75

частоте колебаний пластинки (частоте приложенного напряжения). Упругие волны с частотами от $2 \cdot 10^4$ до 10^8 гц называются ультразвуком. Ультразвуки находят очень большое применение в технике для контрольно-измерительных целей (гидролокация, дефектоскопия, измерение толщины стенок трубопровода и слоя накипи и др.).

В данной работе рассматривается влияние температуры на частоту собственных колебаний твердого кристаллического тела — кварца.

В качестве пьезоэлектрического кристалла выбирается кварц с собственной частотой колебаний 1 Мгц (10^6 гц). Кварцевый резонатор представляет собой электромеханическую колебательную систему, состоящую из кварцевой пластинки и держателя.

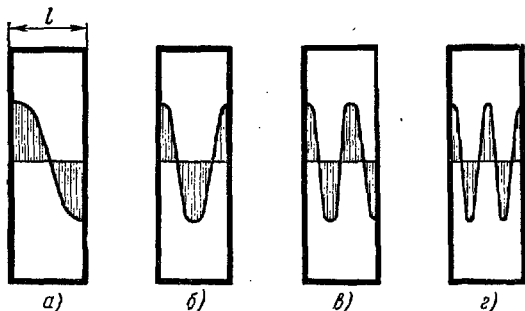


Рис. 76

Собственная частота такого резонатора ν_0 определяется по формуле

$$\nu_0 = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{C}{\rho}},$$

где n — номер возбуждаемой гармоники, l — размер кварцевой пластинки в направлении, определяющем стоячую волну, возникающую в кварце (рис. 76; a — основная собственная частота колебаний, $б$ — частота первой гармоники, $в$ и $г$ — второй и третьей), c — постоянная упругости (для каждой пластинки своя величина), ρ — плотность кристалла.

Физические свойства кристалла — упругость, плотность, размеры зависят от температуры, поэтому и его собственная частота ν_0 также зависит от температуры.

Величина $\frac{1}{\nu_0} \frac{d\nu_0}{dT}$ называется температурным коэффициентом частоты резонатора и обозначается ТКЧ, т. е. ТКЧ относительное изменение частоты $\frac{d\nu_0}{dT}$ при нагревании (или охлаждении) пьезоэлектрического кристалла на 1° С. Если

известен ТКЧ, то можно судить о некоторых физических свойствах кристалла.

Изучение свойств кристаллической структуры кварцев имеет большое научное значение, так как открывает новые перспективы в физике твердого тела и создании фоновых квантово-механических генераторов.

Установка для изучения температурного поведения кварцевого резонатора основана на частотном методе и показана на блок-схеме (рис. 77). Кварцевый резонатор *A* помещен в термостат *B*. Температура термостата измеряется термометром *C* и изменяется от 20 до 80° С.

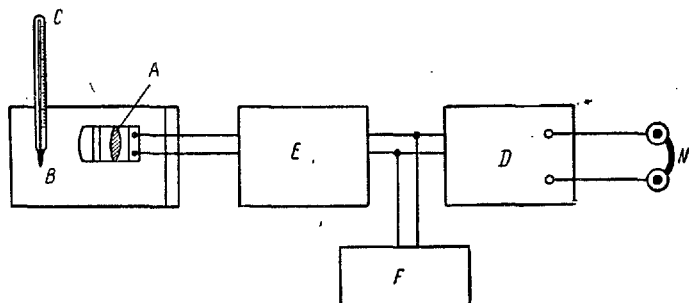


Рис. 77

Металлические пленки — электроды пьезоэлектрического кристалла (кварца) через токоотводы присоединяются к генератору электрических колебаний E^* , который возбуждает в кварце собственные колебания. Колебания с кварцевого генератора подаются на гетеродинный волномер *D* с наушниками *N*, назначение которого измерить частоту ультразвуковых колебаний кварца путем преобразования этих колебаний в колебания звуковой частоты. Зависимость частоты кварцевых резонаторов данного типа от температуры носит параболический характер, ТКЧ равен нулю при температуре 38—42° С.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Помещают кварцевый резонатор в термостат (только с разрешения лаборанта).

2. Два токоотвода резонатора присоединяют к генератору *E*. Генератор *E* подсоединяют к сети и осциллографу *F*.

* Генератор *E* называется измерителем эквивалентных параметров резонатора — ИПР-1.

Включают тумблер, находящийся на передней панели ИПР-1 в положение «сеть» и с помощью плавного вращения ручки настройки «частота» возбуждают колебания пьезоэлектрического резонатора, контролируя их по осциллографу.

3. Не присоединяя к термостату гетеродинный волномер, проверяют его работу следующим образом: а) включают тумблер волномера в положение «сеть»; б) включают тумблер в положение «вкл.», при этом загорается контрольная лампочка; в) проверяют работу волномера, для чего переключатель и ручку из положения «измерение» устанавливают в положение «калибровка»; прослушивают с помощью наушников ряд контрольных точек, вращая ручку настройки. При вращении ручки настройки частота звука уменьшается, проходит через нуль, а затем возрастает.

4. Убедившись, что волномер работает, включают тумблер «измерение» в положение «измерение».

5. Подсоединяют провод от кварцевого резонатора ко входу (гнездо «антенна») волномера.

6. Вращая ручки настройки волномера, находят то положение, при котором появляется звук. Настраивают на точку, для которой при вращении ручки в обе стороны появляется звук.

7. Для этой точки снимают показания на градуированных лимбах волномера, используя нониусную шкалу. По таблице, расположенной в крышке прибора, находят значения собственно частоты ν_0 колебаний кварца при комнатной температуре.

$$\nu_0 = 10^6 \text{ гц (при } t = 20^\circ \text{ C)}$$

№ опыта	t	Показания на лимбах волномера	ν_0 соответствующие показания лимба	$\Delta \nu_0$	$\frac{\Delta \bar{\nu}_0}{\bar{\nu}_0}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
Среднее значение					

8. Включают в сеть термостат и через каждые 5—10° С изменения температуры делают измерение частоты ν_0 колебания кварца при данной температуре так, как это описано в пп. 6 и 7. Измерения проводят в интервале температур от 20 до 80° С, причем в интервале от 30 до 50° С измерения ν_0 проводят через 5° С.

По данным ν_0 и t строят график зависимости $\frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} = f(T)$, где $\Delta\nu_0$ — разность частот соседних температур.

Измерения и вычисления записывают в таблицу (см. таблицу на стр. 176).

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ЧАСТЬ III

Введение. Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ по электричеству и магнетизму, следует предварительно ознакомиться с описанием работы, во время выполнения работы быть внимательным и строго соблюдать правила по технике безопасности.

Монтаж экспериментальной установки в большинстве случаев студент производит самостоятельно по принципиальной или монтажной схемам. Необходимо помнить следующее:

1. Вся электрическая схема монтируется с помощью соединительных проводов. Провода должны быть изолированы, а концы их зачищены, так как они постоянно окисляются, вследствие чего нарушается контакт.

2. Контакты должны быть всюду плотны. Если в контактах для присоединения проводов имеются отверстия, то зачищенные концы проводов вставляются именно в них и прижимаются сверху винтами. Если отверстий нет, то зачищенный конец провода подкладывается под контактный винт по ходу завинчивания винта.

3. Переплетение даже изолированных проводов не допускается.

4. Цепь ведется от источника тока, но *подключается источник тока* в последнюю очередь. При разборке схемы *прежде всего отключается источник тока.*

5. Если ток постоянный и нуль шкалы измерительного прибора не на середине ее, а слева, то полюс источника соединяется с полюсом прибора, который всегда находится на правой стороне крышки.

6. Все реостаты, включаемые в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.

7. Потенциометры устанавливаются на нуль подаваемого в контур напряжения.

8. Все ключи и коммутаторы при сборке цепи должны быть *разомкнуты*.

9. Замыкать ток без проверки схемы преподавателем или лаборантом категорически запрещается.

10. Ток замыкается только на время отсчетов.

Для соблюдения техники безопасности при работе с электрическими схемами следует:

1) *не включать рубильники и вилки без разрешения преподавателя или лаборанта;*

2) *не включать схему под напряжением без предварительной проверки ее преподавателем или лаборантом;*

3) *не производить переключение схем, находящихся под напряжением;*

4) *не прикасаться к незаизолированным частям схемы;*

5) *не оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.*

Работа № 33

Знакомство с электроизмерительными приборами

Приборы и принадлежности: набор электроизмерительных приборов, провода, шупты, добавочные сопротивления.

Основные электроизмерительные приборы. Все электроизмерительные приборы классифицируются по следующим основным признакам:

а) по роду измеряемой величины: амперметры, вольтметры, омметры, счетчики, ваттметры и др.;

б) по роду тока: приборы постоянного тока, переменного тока и приборы постоянного и переменного тока;

в) по принципу действия: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые, электростатические и др.;

г) по степени точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 классов.

Приборы класса точности 0,1; 0,2; 0,5 применяются для точных лабораторных измерений и называются прецизионными.

На шкалу прибора наносится символ, указывающий принцип действия прибора, род тока — постоянный (—) или переменный (—), установки прибора — вертикально (↑), горизонтально (→), пробивное напряжение изоляции (↓ √ 2 кв), класс точности.


Система	Условные обозначения
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Тепловая	

Рис. 78

Обозначение систем электроизмерительных приборов показано на рис. 78.

Электроизмерительные приборы состоят из подвижной и неподвижной частей. При измерениях вращающий момент подвижной части уравновешивается противодействующим моментом пружины или какого-либо другого устройства. При таком равновесии указатель прибора фиксирует определенный угол поворота.

Устанавливая однозначную зависимость между углом поворота указателя прибора и численным значением измеряемой величины, можно построить шкалу, по которой и производится отсчет измеряемой величины. Трение в опорах деталей и другие причины влияют на показание прибора, т. е. вносят погрешность. Поправки к показанию прибора могут быть заранее определены путем соответствующей проверки данного прибора.

Величина, численно равная отношению приращения угла поворота подвижной части прибора к приращению измеряемой величины, называется чувствительностью прибора. Чем больше приращение угла отклонения при одном и том же приращении измеряемой величины, тем меньше величины можно измерять прибором и тем выше его чувствительность. Если, например, приращение угла $d\varphi$ вызвано приращением тока dI , то чувствительность

$$S_1 = \frac{d\varphi}{dI}. \quad (1)$$

Величина $C = \frac{1}{S_1}$ называется ценой деления прибора; C определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление. Например, имеем прибор, который может измерять напряжение от 0 до 250 в (рис. 79). Шкала этого прибора разделена на 50 делений (мелких). Чувствительность этого прибора

$$S_1 = \frac{d\varphi}{dU} = \frac{50}{250} = 0,2 \text{ дел/в.}$$

Цена деления

$$\check{C} = \frac{1}{S_1} = \frac{250}{50} = 5 \text{ в/дел.}$$

Отметим некоторые особенности конструкции деталей приборов. Шкала прибора служит для производства отсчета измеряемой величины. Цифры возле делений обозначают либо число делений от нуля шкалы (обычно в приборах 0,2; 0,5 класса точности), либо непосредственно значение измеряемой величины (остальные классы точности). В первом случае для получения значения измеряемой величины в практических единицах нужно определить цену одного деления шкалы прибора (иногда называемую постоянной прибора) и умножить ее на число отсчитанных делений. При отсчете луч зрения должен быть перпендикулярен шкале, иначе возможна погрешность от параллакса. Зеркальные шкалы позволяют избежать параллакса. При отсчете по зеркальной шкале глаз наблюдателя должен быть расположен так, чтобы конец стрелки покрывал свое изображение в зеркале.

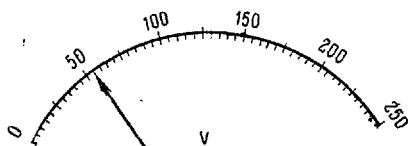


Рис. 79

В зависимости от конструкции приборы предназначаются для работы в определенном положении. На шкале прибора обычно ставится знак, указывающий на вертикальное или горизонтальное положение.

В целях сокращения промежутка времени, необходимого для успокоения подвижной части прибора (после включения), имеются специальные тормозящие устройства (демпферы).

Приборы магнитоэлектрической системы. Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке легкой подвижной катушки (рамки).

На рис. 80 показана схема устройства приборов этой системы. Неподвижный подковообразный магнит *A* имеет выполненные из мягкого железа полюса *B*, которые охватывают сплошной железный сердечник *C*. Между сердечником и полюсами магнита имеется кольцевой зазор. На одной оси с сердечником находится подвижная легкая прямоугольная

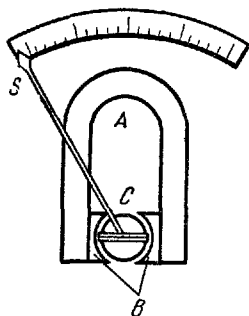


Рис. 80

рамка, имеющая обмотку из тонкого изолированного провода. Эта рамка может свободно вращаться в воздушном зазоре между сердечником и полюсами магнита. Рамка представляет собой основную часть подвижной системы, которая включает и указатель-стрелку *S*.

Подвижная система с основным механическим приспособлением состоит из спиральных пружин, выполненных из немагнитного материала, которые и служат для подвода тока к концам обмотки на рамке и для оказания противодействия вращению рамки.

В результате взаимодействия магнитного поля магнита с током, протекающим по рамке, возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора поворачивается около оси. Противодействующий момент создается пружинами, через которые также подводится ток к обмотке.

Теоретически нетрудно установить зависимость угла поворота подвижной части α от величины тока I , протекающего по обмотке рамки прибора:

$$\alpha = kI,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Из этой зависимости видно, что магнитоэлектрические приборы имеют равномерные шкалы.

Область применения магнитоэлектрических приборов весьма обширна. Они применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока как при технических

измерениях, так и при контрольных лабораторных измерениях. Из всех электроизмерительных приборов с непосредственным отсчетом они дают наибольшую точность измерения и являются наиболее экономичными в смысле потребления энергии. Лучшие конструкции этих приборов имеют класс точности 0,2. При непосредственном включении миллиамперметры и амперметры магнитоэлектрической системы позволяют измерять токи от 1 *ма* до 100 *а*, а с применением шунта — до нескольких тысяч ампер. Вольтметры этой системы при непосредственном включении дают возможность измерять напряжение от 0,1 до 600 *в*, а с дополнительным сопротивлением — до 10 000 *в* и более.

Для переменного тока магнитоэлектрические приборы неприменимы, так как подвижная часть вследствие инерции не успевает отклоняться.

Приборы электромагнитной системы. Принцип работы приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки, с подвижным железным сердечником, помещенным в этом магнитном поле.

На рис. 81 показана схема устройства электромагнитного прибора. Прибор состоит из прямоугольной катушки *а* с узкой щелью (просветом). Сердечник *б* изготовлен из мягкого железа и укреплен эксцентрично на оси. С осью сердечника скреплены стрелка *с*, поршень воздушного успокоителя *д* и спиральная пружина *ф*, создающая противодействующий момент.

Ток, протекающий по катушке *а*, образует внутри нее магнитное поле, под действием которого железный сердечник, поворачиваясь вокруг оси, втягивается в щель катушки.

При увеличении тока возрастает индукция в щели катушки и увеличивается намагничивание железного сердечника.

Элементарная теория позволяет установить, что между углом отклонения стрелки и величиной тока должна быть квадратичная зависимость:

$$\alpha = kI^2,$$

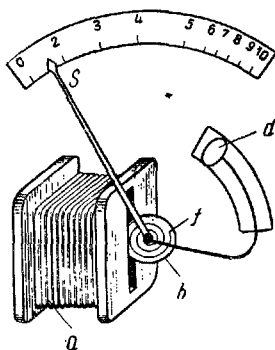


Рис. 81

где k — некоторый коэффициент, I — величина тока. Следовательно, шкала таких приборов неравномерная.

Приборы электромагнитной системы применяются в основном для измерения переменного тока, хотя могут применяться и для измерения постоянного тока. Они просты по конструкции и недороги. Электромагнитные амперметры и вольтметры получили широкое применение как щитовые приборы для переменного тока. Пределы измерения у амперметров от 6 мА до 200 А, у вольтметров от 3 В до 600 В.

Точность приборов этой системы зависит от внешнего магнитного поля, частоты измеряемого переменного тока и др. Специальные конструктивные устройства позволяют избежать влияния многих факторов на точность измерения. Однако точность приборов этой системы по сравнению с приборами других систем невысокая.

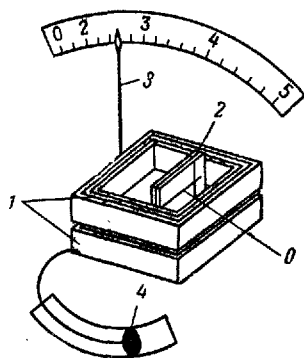


Рис. 82

Приборы электродинамической системы. Принцип действия электродинамических приборов основан на взаимодействии токов, протекающих по двум рамкам (катушкам), из которых одна подвижная, а другая неподвижная. На рис. 82 показана схема устройства электродинамического прибора.

Неподвижная катушка 1 состоит из двух разделенных небольшим зазором одинаковых частей, обмотки которых соединены между собой последовательно. В этом зазоре расположена ось 0 подвижной части прибора, с которой скреплены подвижная катушка 2, стрелка 3, поршень воздушного успокоителя 4 и две пружины, не показанные на схеме, назначение которых — создавать противодействующий момент и подводить ток в подвижную катушку.

Вращающий момент M_1 , обусловленный взаимодействием магнитных потоков, определяется уравнением

$$M_1 = k_1 I_1 I_2,$$

где I_1 — величина тока, протекающего по неподвижной рамке, I_2 — то же, по подвижной, k_1 — коэффициент, зави-

сящий от конструктивных данных прибора и взаимного расположения рамок.

Под действием M_1 подвижная рамка повернется на угол α ; создаваемый пружиной противодействующий момент

$$M_2 = k_2 \alpha.$$

Из условия равенства моментов $M_1 = M_2$ получаем, что

$$\alpha = k I_1 I_2,$$

где $k = \frac{k_1}{k_2}$. Из формулы видно, что шкала будет неравномерна.

В зависимости от назначения прибора рамки соединяют или параллельно, или последовательно. Электродинамические приборы применяют для измерения постоянного и переменного токов (амперметры, вольтметры и ваттметры). Пригодность этих приборов для переменного тока обусловлена тем, что при одновременном изменении направления тока в обеих рамках направление вращения подвижной части остается неизменным. Точность и чувствительность электродинамических приборов для переменного тока очень высокие. На показания этих приборов большое влияние оказывают внешние магнитные поля, причем переменные магнитные поля почти не влияют на приборы, измеряющие постоянный ток, а постоянные поля не влияют на приборы, измеряющие переменный ток. С помощью так называемых астатических устройств можно уменьшить влияние внешних полей.

Приборы других систем. 1. Тепловая система — принцип действия основан на изменении длины проводника при его нагревании. Эти приборы могут измерять и постоянный и переменный токи.

2. Индукционная система — принцип действия основан на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора, с магнитным потоком неподвижного магнита.

3. Вибрационная система основана на резонансе при совпадении частот собственных колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока. Приборы этой системы применяются для измерения частоты тока.

Амперметры, вольтметры и гальванометры. Амперметрами называют приборы, служащие для измерения силы тока. При измерениях амперметр включают в цепь после-

довательно, т. е. так, что весь измеряемый ток проходит через амперметр (рис. 83). Поэтому амперметры должны иметь малое сопротивление, чтобы включение их не изменило заметно величины тока в цепи.

Для измерения сильных токов, кроме амперметров, применяют вольтметры. Вольтметры применяются для измерения количества электричества q , протекающего в цепи за определенный промежуток времени t . Вычисляя q за единицу времени, определяют силу тока

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

Слабые токи измеряются обычно магнитоэлектрическими амперметрами, которые имеют конструктивные улучшения и благодаря этому приобретают высокую чувствительность. Такие приборы называются миллиамперметрами (токи до 10^{-3} а) и микроамперметрами (токи до 10^{-6} а).

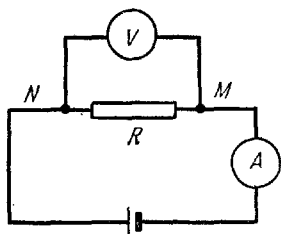


Рис. 83

Вольтметрами называют приборы, служащие для измерения напряжения (рис. 83). При измерениях вольтметр включают параллельно тому участку цепи, на концах которого хотят измерить

разность потенциалов, т. е. вольтметр соединяют с теми точками M и N цепи, разность потенциалов которых нужно измерить (см. рис. 83). Для того чтобы включение вольтметра не изменяло заметно режима цепи, сопротивление вольтметра должно быть очень велико по сравнению с сопротивлением R участка цепи MN . Погрешность при измерениях напряжения тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра.

Для расширения пределов измерений амперметров и вольтметров применяются шунты и добавочные сопротивления, а в случае измерений на переменном токе — измерительные трансформаторы тока.

Гальванометрами называют чувствительные приборы, служащие для измерения весьма малых токов, напряжений и количеств электричества (соответственно меньше 10^{-6} ампера, вольта или кулона).

По принципу действия и устройству гальванометры бывают магнитоэлектрические с подвижной катушкой,

магнитоэлектрические с подвижным магнитом, струнные, термогальванометры, электродинамометры и электрометры.

По роду измеряемого тока гальванометры разделяются на магнитоэлектрические и вибрационные (резонансные). Первые применяются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока, а вторые употребляются преимущественно в качестве указателей отсутствия тока при измерениях в цепях переменного тока по так называемому нулевому методу. Гальванометры с подвижной рамкой (катушкой) по своему устройству принципиально не отличаются от описанного выше устройства приборов магнитоэлектрической системы.

Вспомогательные электрические приборы. Шунты. Шунтом называется сопротивление ($r_{ш}$), включаемое в цепь параллельно (рис. 84) амперметру (или миллиамперметру), вследствие чего

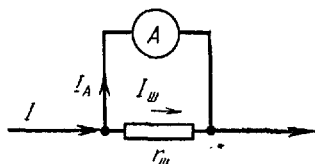


Рис. 84

в амперметр отводится только часть измеряемого тока.

Например, если необходимо измерить амперметром A ток, в n раз больший максимально возможного для данного прибора, то надо включить сопротивление $r_{ш}$, удовлетворяющее следующему равенству:

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1},$$

где $n = \frac{I}{I_A}$ (I — величина тока в цепи, I_A — величина тока, идущая через амперметр), r_A — сопротивление амперметра.

Следовательно, чтобы измерить амперметром в n раз больший ток, необходимо взять сопротивление шунта в $(n - 1)$ раз меньше сопротивления амперметра. Шунты обычно изготавливаются из манганина, имеющего большое удельное сопротивление и малый термический коэффициент сопротивления, вследствие чего сопротивление шунта практически не зависит от нагревания его током и от изменений температуры окружающей среды.

Добавочное сопротивление. Для расширения пределов измерений вольтметром применяется так называемое добавочное сопротивление, которое включается последовательно с вольтметром (рис. 85).

Если, например, необходимо измерить вольтметром в n раз большее напряжение, то необходимо включить последовательно вольтметру добавочное сопротивление

$$r_0 = r_V(n - 1),$$

где r_V — сопротивление вольтметра;

$$n = \frac{U}{U_V} = \frac{r}{r_V},$$

U — полное подводимое напряжение, U_V — напряжение, падающее на вольтметр, r — общее сопротивление ($r = r_V + r_0$).

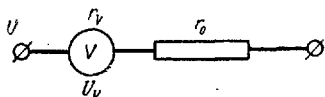


Рис. 85

Таким образом, чтобы измерить вольтметром в n раз большее напряжение, необходимо взять добавочное сопротивление

в $(n - 1)$ раз большее сопротивления вольтметра.

Измерительные трансформаторы. Измерительные трансформаторы применяются для увеличения пределов измерения приборов переменного тока. Различают измерительные трансформаторы тока и измерительные трансформаторы напряжения.

Измерительный трансформатор тока состоит из первичной обмотки, имеющей малое число витков n_1 и выполненной из толстого провода, и вторичной, имеющей относительно большое число витков n_2 . Амперметр включается во вторичную обмотку (рис. 86).

Коэффициент трансформации для данного трансформатора

$$k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

где I_1 и I_2 — токи в первичной и вторичной обмотках, n_1 и n_2 — соответственно число витков в них.

Из этого выражения видно, что ток, измеряемый во вторичной обмотке, будет в k раз меньше подводимого тока.

Измерительный трансформатор напряжения также состоит из первичной и вторичной обмоток. Первичная обмотка содержит большее число витков, а вторичная —

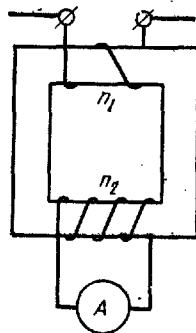


Рис. 86

меньшее. Вольтметр включается во вторичную обмотку (рис. 87).

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Измерительный трансформатор позволяет подобрать для любого случая соответствующий коэффициент трансформации. Следует отметить весьма важное свойство измерительных трансформаторов — безопасность при измерениях высоких напряжений.

Реостаты, потенциометры и магазины сопротивлений. Для измерения силы тока в цепи часто применяются реостаты. В зависимости от назначения реостаты имеют различные виды. В лабораторной практике иногда применяют ламповые реостаты, состоящие из нескольких ламп, соединенных параллельно или последовательно. Регулирование силы тока происходит за счет включения в цепь определенного числа ламп. Большое применение получили реостаты со скользящим контактом. Эти реостаты состоят из фарфорового или шиферного цилиндра, на который намотана проволока (или лента), изготовленная из металла с большим удельным сопротивлением. По проводнику может

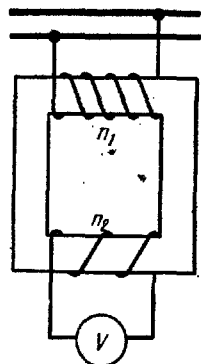


Рис. 87

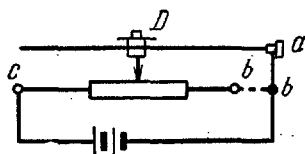


Рис. 88

перемещаться контакт (ползун) D (рис. 88), позволяющий постепенно включать в цепь обмотку. Реостат включается в цепь через клемму a , соединенную с ползунком D и клеммами b или c (удобнее подключать через клемму b). Если клеммы b и c соединить с полюсами источ-

ника тока (на рис. 88 показано пунктиром), то получим прибор, называемый *потенциометром*. Перемещая ползун D между клеммой c и соединенной с ползунком клеммой a , можно получить определенную разность потенциалов в интервале от 0 до U .

Набор эталонных сопротивлений, представляющих собой катушки сопротивлений, называется *магазином сопротивлений*. Каждая катушка состоит из хорошо изолированной проволочной обмотки, изготовленной из манганина или константана. Сопротивление каждой катушки вполне определено для данной температуры. Катушки набора помещаются в общий ящик. На эбонитовой крышке ящика укреплены массивные медные пластины NN (рис. 89), сопротивление которых практически считают равным нулю. Концы каждой из катушек RR соединены с двумя соседними пластинами. Конические «штепсели» плотно вставляются в гнезда пластин

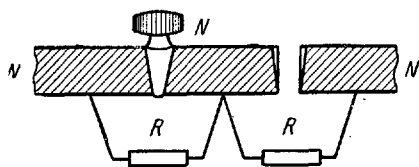


Рис. 89

и служат непосредственным контактом между пластинами.

Когда все штепсели вставлены, ток проходит от пластины к пластине без заметного сопротивления. Но если вынуть

какой-либо штепсель, то ток может пройти только через соответствующую катушку.

Многопредельные приборы. Измерительный прибор, электрическую схему которого можно переключать для изменения интервалов измеряемой величины, называется *многопредельным*.

В многопредельные *амперметры* внутрь прибора вмонтированы *шунты*, в случае *вольтметра* — *добавочные сопротивления*.

Пользуются многопредельными пределами так, чтобы выбранная шкала измерений давала наименьшую погрешность. Многопредельные приборы могут иметь одну или несколько шкал.

В случае одной шкалы приходится делать пересчет прибора для различных пределов измерения.

Например, имеем многопредельный амперметр, который имеет пределы для измерения тока от 0 до 3 *ма*, от 0 до 9 *ма* и от 0 до 30 *ма* и его шкала имеет 300 делений. Если прибор включен на работу в диапазоне от 0 до 3 *ма*, то при отсчете по прибору, равному 210 делений, ток через прибор

$$I_1 = 210 \text{ } m_1, \quad (2)$$

где m_1 — переводной коэффициент данного диапазона

$$m_1 = \frac{a}{N}, \quad (3)$$

где a — максимальное значение величины, которую можно измерить при данном включении прибора (в данном случае $a = 3 \text{ ма}$), N — число, стоящее против последнего деления прибора; $N = 300$, $m_1 = \frac{3}{300}$. Если прибор включен на диапазон от 0 до 9 ма, то $I_2 = 210 \text{ мв}$, где

$$m_3 = \frac{a_3}{N} = \frac{9}{300}.$$

Оценка погрешностей электрических измерений. Абсолютная погрешность измерений, производимых электроизмерительными приборами, оценивается исходя из класса точности приборов. Обозначение класса точности 0,2; 0,5; 1,0 и т. д. не только характеризует прибор в зависимости от системы, конструкции, качества материалов, точности градуировки и других факторов, но и указывает, что погрешность показаний прибора соответствующего класса в любом месте шкалы не должна превышать 0,2%, 0,5%, 1%.

Если обозначим через A' максимально возможное показание прибора, а через n номер класса прибора, то получим абсолютную погрешность прибора

$$\Delta A = A'n. \quad (4)$$

Например, вольтметр 0,2 класса ($n = 0,002$), шкала которого рассчитана на 5 в, имеет абсолютную погрешность

$$\Delta U = \pm 0,002 \cdot 50 \text{ в} = \pm 0,1 \text{ в},$$

а амперметр класса 1,5, рассчитанный на максимальное показание 5 а, имеет абсолютную погрешность

$$\Delta I = \pm 0,015 \cdot 5 \text{ а} = \pm 0,075 \text{ а}.$$

Так как абсолютная погрешность считается одинаковой по всей шкале данного электроизмерительного прибора, то относительная погрешность $\left(\frac{\Delta I}{I} \cdot 100\right)$ будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Если, например, при помощи указанного амперметра измерить ток около 4 а, то относительная погрешность будет составлять 1,9%, а при измерении силы тока около 1 а — 7,5%.

При точных измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы предполагаемое значение измеряемой

величины составляло 70—80% от максимального (номинального) значения. Поэтому применяют приборы, имеющие несколько пределов измерений; при работе с таким прибором его включают в цепь на тот предел измерений, который достаточно близок к предполагаемому значению измеряемой величины.

Рассмотрим вычисление погрешностей на следующем примере.

Определить погрешность измерения внутреннего сопротивления элемента, электродвижущая сила которого E , напряжение на полюсах U и величина тока I . Для измерения применены вольтметр класса 0,5 ($U_N = 2,5$ в) и амперметр класса 1,0 ($I_N = 1,5$ а). Результаты измерений следующие: $E = 2$ в, $U = 1,3$ в, $I = 1,2$ а.

Абсолютные погрешности измерений:

$$\Delta E = \Delta U = \pm 0,005 \cdot 2,5 \text{ в} = \pm 0,0125 \text{ в};$$

$$\Delta I = \pm 0,01 \cdot 1,5 = \pm 0,015 \text{ а}.$$

Вычисление внутреннего сопротивления производим по формуле

$$r = \frac{E - U}{I}. \quad (5)$$

Максимальная относительная погрешность может быть определена общеизвестным методом. Логарифмируя выражение (5)

$$\ln r = \ln (E - U) - \ln I,$$

находим относительную погрешность

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta (E - U)}{E - U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta E + \Delta U}{E - U} + \frac{\Delta I}{I};$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r}{r} &= \pm \left(\frac{0,0125 + 0,0125}{2 - 1,3} + \frac{0,015}{1,2} \right) = \pm (0,0357 + 0,01251) = \\ &= +0,0482 \approx 0,05. \end{aligned}$$

Эта погрешность, выраженная в процентах, составляет:

$$\frac{\Delta r}{r} \cdot 100 = \pm 5\%.$$

С помощью формулы (5) находим внутреннее сопротивление r и абсолютную погрешность Δr :

$$r = \frac{2 - 1,3}{1,2} = 0,58 \text{ ом};$$

$$\Delta r = \pm 0,05 \cdot 0,58 = \pm 0,029 \text{ ом} = \pm 0,03 \text{ ом}.$$

Следовательно, внутреннее сопротивление

$$r = (0,58 \pm 0,03) \text{ ом.}$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Знакомыся со всеми приборами, находящимися на лабораторном столе, и делают описание каждого прибора (название, система, класс точности и т. п.).

2. По формуле (1) вычисляют чувствительность и цену деления каждого прибора. Для многопредельных приборов определяют по формуле (3) переводные коэффициенты m_i для всех диапазонов.

3. Находят класс точности приборов и по формуле (4) определяют абсолютную погрешность прибора.

4. Собирают схему, которая имеется на лабораторном столе, и находят абсолютную и относительную погрешности величин и значения величин, указанных на схеме.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Введение. I. Вокруг заряда или заряженного тела возникает *электрическое поле*. В этом поле на внесенный в него другой заряд действует электростатическая сила кулона. Полем называется форма материи, которая осуществляет определенные взаимодействия между макроскопическими телами или частицами, входящими в состав вещества. В электростатическом поле осуществляется электростатическое взаимодействие заряженных тел. *Электростатическое поле* является частным случаем электрического поля — *стационарным электрическим полем*, созданным неподвижными зарядами.

Электрическое поле характеризуется в каждой своей точке двумя характеристиками: *силовой — вектором электрической напряженности E и энергетической — скалярной величиной — потенциалом ϕ* . *Напряженностью* данной точки электрического поля называется векторная физическая величина, численно равная и совпадающая по направлению с силой F , действующей со стороны поля на единичный положительный заряд q_0 , помещенный в рассматриваемую точку поля:

$$E = \frac{F}{q_0}. \quad (1)$$

Силовой линией электрического поля называется линия, касательные в каждой точке которой определяют направления векторов напряженностей соответствующих точек электрического поля. Число же *силовых линий*, проходящих через единицу площади, нормальной к этим линиям, *определяет величину вектора напряженности* электрического поля в центре этой площади. Линии напряженности электрического поля не замыкаются сами на себя: они выходят из положительного заряда и входят в отрицательный заряд.

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

$$\Phi = \frac{W}{q_0}.$$

Работа, которая совершается силами электростатического поля при перемещении точечного электрического заряда q_0 , равна произведению этого заряда на разность потенциалов между начальной и конечной точками пути:

$$A = q_0 (\Phi_1 - \Phi_2), \quad (2)$$

где Φ_1 и Φ_2 — потенциалы начальной и конечной точек пути. Потенциал и напряженность электрического поля связаны соотношением:

$$E = - \frac{d\Phi}{dn}, \quad (3)$$

т. е. напряженность поля E численно равна изменению потенциала $d\Phi$ на единицу длины dn , отсчитанному в направлении, перпендикулярном к поверхности потенциала, и направлена в сторону убывания потенциала (знак минус).

Величина, указывающая быстроту изменения потенциала при перемещении в направлении, перпендикулярном к поверхности уровня потенциала, называется *градиентом потенциала*, т. е.

$$E = - \text{grad } \Phi.$$

Геометрическое место точек электрического поля, потенциалы которых одинаковы, называется *эквипотенциальной поверхностью* или поверхностью равного потенциала.

Вектор напряженности данной точки электрического поля нормален к эквипотенциальной поверхности, прове-

денной через эту точку. На рис. 90 графически изображено электрическое поле, образованное положительным точечным зарядом q и отрицательно заряженной плоскостью P . Сплошные линии эквипотенциальны поверхности с потенциалами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и т. д., пунктирные — силовые линии поля. Направление силовых линий показано стрелкой.

II. Тела можно разделить на два класса: проводники и диэлектрики. В *проводниках* — металлах под действием внешнего электростатического поля имеющиеся свободные заряды перераспределяются таким образом, что напряженность поля в любой точке внутри проводника равна нулю; внутренняя полость в замкнутом проводнике экранирована от внешних электростатических полей — электростатическая защита.

В *диэлектриках* отсутствуют свободные электрические заряды. Диэлектрики в отличие от проводников не проводят электрический ток.

Молекулы диэлектрика по своим электриче-

ским свойствам эквивалентны *электрическим диполям* (диполем называется совокупность двух одинаковых по абсолютной величине разноименных зарядов $+q$ и $-q$, расположенных на расстоянии l друг от друга). В отсутствие электрического поля *дипольные моменты* p_e молекул (атомов) диэлектрика

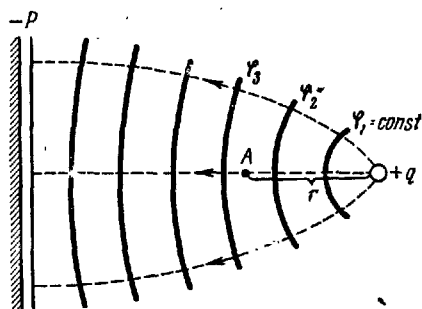


Рис. 90

$$p_e = ql$$

(где l — расстояние между центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов q) или равны нулю, или распределены по направлениям в пространстве хаотически. И в том и в другом случае *суммарный электрический момент диэлектрика* равен нулю. При помещении диэлектрика во внешнее электростатическое поле происходит поляризация диэлектрика. В диэлектрике возникает суммарный электрический момент некоторого объема диэлектрика, который называется *вектором поляризации*:

$$P_e = \alpha \epsilon_0 n_0 E = \epsilon_0 \chi_e E,$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, α — коэффициент поляризуемости молекулы или атома, E — напряженность внешнего поля, n_0 — число молекул в единице объема, $\kappa_e = n_0\alpha$ — диэлектрическая восприимчивость вещества или поляризуемость единицы объема диэлектрика.

Связь диэлектрической проницаемости вещества ϵ с его диэлектрической восприимчивостью κ_e следующая:

$$\epsilon = 1 + \kappa_e.$$

Напряженность электрического поля E *зависит от свойств среды*. Численное значение E всегда обратно пропорционально $\epsilon_0\epsilon$; ϵ показывает, во сколько раз в данной среде сила F взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами меньше силы их взаимодействия F_0 в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}.$$

Для характеристики электрического поля удобно ввести величину

$$D = \epsilon\epsilon_0 E,$$

которая *не зависит от свойств среды*. Величина D называется *электрическим смещением*, или электрической индукцией; D — векторная величина и в изотропной среде по направлению совпадает с E .

Работа № 34

Исследование электростатического поля

Приборы и принадлежности: ящик с песком и с двумя введенными в песок штепселями, два плоских электрода, металлическое кольцо, полукольцо и треугольный контур, лейка с водой и трамбовка, масштабная линейка и тонкий металлический стержень с заостренным концом, электрогенератор звуковой частоты, телефон, электронный осциллограф.

Теория метода и описание установки. В данной работе электрическое поле создается в приборе, который представляет собой ящик, наполненный утрамбованным влажным песком или вместо песка на дно положена электропроводная бумага.

В этот песок вводятся два питающих штепселя, к которым подводится переменный ток от источника тока звуковой частоты *. Для получения полей различной конфигурации на штепсели могут быть надеты плоские электроды. Поле между плоскими электродами, расположенными параллельно, можно считать однородным и статическим, если сопротивление песка гораздо больше сопротивления электродов. В это поле помещают металлическое кольцо, полукольцо или треугольный контур.

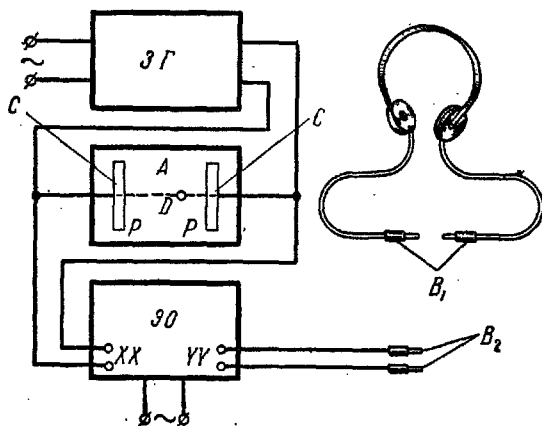


Рис. 91

Созданные таким образом в приборе электрические поля исследуются с помощью телефона с пробными контактами и одновременно с помощью пробных контактов, подключенных к электронному осциллографу **.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Перемешивают в ящике А песок, увлажняя и утрамбовывая его (рис. 91).

2. Острым концом железного стержня с помощью масштабной линейки наносят на песке координатную сетку (расстояние между линиями сетки взять 3—4 см). Полученную сетку переносят на клетчатую бумагу в уменьшенном виде.

* Переменный ток берется для того, чтобы исключить явления электролиза и поляризации.

** Об электронном осциллографе см. лабораторную работу № 49.

3. Подводят к штепселям прибора C и к гнездам «ХХ» горизонтально отклоняющих пластин осциллографа переменный ток звуковой частоты (500 гц).

4. Пользуясь телефоном, находят точки одной эквипотенциальной линии: для этого один контакт B_1 телефона помещают в песок на линии, соединяющей штепсели, например в точку D , а другим контактом телефона находят на песке точки равного потенциала, т. е. такие, между которыми тока нет. Это соответствует отсутствию звука в телефоне *. Таких точек равного потенциала находят на линии не менее восьми.

Переносят найденные точки равного потенциала на клетчатую бумагу, где их соединяют плавной линией.

5. Помещают 1-й контакт телефона в другую точку на линии, соединяющей штепсели, и повторяют исследования п. 4.

6. Включают осциллограф. Поворачивают на нем по часовой стрелке ручку «Вкл. синхр.» и выжидают 2 мин. Вращением ручки «Фокусир» добиваются того, чтобы горизонтальная светящаяся линия на экране осциллографа стала тонкой.

7. Вставляют концы от пробных контактов B_2 в гнезда «УУ» вертикально отклоняющих пластин осциллографа.

8. Пробными контактами B_2 осциллографа повторяют исследование электрического поля так же, как это было сделано контактами B_1 телефона в пп. 4 и 5. При этом вращением ручки «Частота» добиваются того, чтобы при введении в песок указанных пробных контактов B_2 осциллографа изображение на его экране остановилось.

Положение пробных контактов B_2 осциллографа на эквипотенциальной линии соответствует горизонтальному расположению светящейся линии на экране (ось x). Если же линия наклонена по отношению к оси x , то точки, к которым присоединены пробные контакты, не являются точками эквипотенциальной поверхности **.

9. Исследования осциллографом и телефоном проводят для полей: а) поле создано двумя точечными зарядами (два штепселя); б) поле создано точечным зарядом (штепсель и

* Или берут минимальный звук. Отсутствие звука объясняется при помощи теории, выходящей за рамки курса.

** Поверхности проводников в электрическом поле являются эквипотенциальными.

плоский электрод); в этом случае строят график зависимости напряженности поля от расстояния, т. е.

$$E = f\left(\frac{1}{r^2}\right),$$

где r — расстояние от заряда q (штепселя) до точки поля A (рис. 90); в) поле создано двумя параллельными пластинами C (однородное поле плоского конденсатора; см. рис. 91).

10. Исследуют изменения расположения силовых линий и эквипотенциальных поверхностей при внесении в однородное электрическое поле металлического контура (кольцо, треугольник, полукольцо).

11. Зарисовывают картины силовых линий и эквипотенциальных поверхностей при наличии в однородном поле различных контуров.

работа № 35

Снятие кривой зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности электрического поля

Приборы и принадлежности: образец титаната бария, трансформатор ТГ-8, автотрансформатор ЛАТР-2, киловольтметр типа С-95 класса 1,5 на 3000 в, миллиамперметр типа Ц-45 класса 1,5 или гальванометр вибрационный типа М-501, ключи.

Теория метода и описание установки. В данной работе снимается кривая зависимости ϵ титаната бария от напряженности внешнего электрического поля E . Титанат бария относится к особой группе диэлектриков, называемых *сегнетоэлектриками*. Отличие сегнетоэлектриков от остальных диэлектриков следующее:

1. Сегнетоэлектрики характеризуются очень большой величиной диэлектрической проницаемости ϵ . Для сегнетовой соли $\epsilon \approx 100\,000$, для титаната бария 1000—2000 (при комнатной температуре).

2. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков зависит от напряженности внешнего электрического поля и температуры.

3. В сегнетоэлектриках наблюдается явление диэлектрического гистерезиса (запаздывания). На рис. 92 показана

кривая зависимости P_i от E — петля гистерезиса, где P_{i_0} — остаточная поляризация, E_k — напряженность поля обратного направления, при которой исчезает поляризация сегнетоэлектрика — коэрцитивная сила. Эти свойства сегнетоэлектриков объясняются следующим образом. Вследствие особенно сильного взаимодействия частиц объем кристалла сегнетоэлектрика подразделяется на отдельные макроскопические области — «домены», которые самопроизвольно (спонтанно) возникают в кристалле. В этих «доменах» дипольные моменты отдельных молекул ориентированы одинаково и при отсутствии электрического поля, т. е. имеется поляризация в каждом «домене», но так как ориентация в каждом «домене» различна, то кристалл в целом дипольным моментом не обладает.

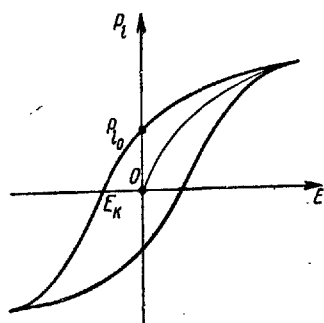


Рис. 92

При внесении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле по полю начинают ориентироваться сразу целые поляризованные области (целиком «домены»). Поэтому даже в слабых электрических полях сегнетоэлектрики обладают высокой диэлектрической проницаемостью.

Когда электрическое поле превращается в нуль в сегнетоэлектрике целые области сохраняют значение поляризации P_{i_0} . Только под действием обратного электрического поля поляризация диэлектрика становится равной нулю.

В данной работе снимают кривые зависимости $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = f(E)$ для титаната бария, где ϵ_0 — значение диэлектрической проницаемости при определенном значении напряженности поля E_0 .

На схеме рис. 93 C — образец титаната бария (круглая пластинка $D = 20$ мм, $d = 4$ мм) приготовлен в виде конденсатора. Основания образца металлизированы.

Диэлектрическая проницаемость образца определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{16Id}{U\omega D^2}, \quad (4)$$

где I — сила тока в цепи миллиамперметра mA , d — толщина образца, D — диаметр основания образца, U — на-

пряжение на обкладках образца, измеряемое киловольтметром kV , ω — угловая частота переменного тока.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают цепь.

2. По киловольтметру при помощи автотрансформатора Tp (на рисунке дан с одной обмоткой) устанавливают в образце начальное напряжение U_0 , соответствующее напряженности электрического поля в образце:

$$E_0 = \frac{U_0}{d} = 100\,000 \text{ в/м.}$$

По миллиамперметру снимают силу тока I_0 и вычисляют значение ϵ_0 по формуле (4) *.

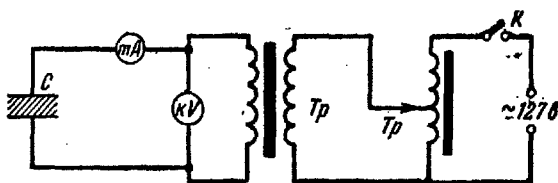


Рис. 93

3. Увеличивают разность потенциалов U на обкладках образца так, чтобы напряженность изменялась ступеньками до $700\,000 \text{ в/м}$. Для каждого значения U измеряют силу тока I .

4. Найденные значения U и I подставляют в формулу (4) и определяют значение ϵ при данных E .

5. Строят график зависимости $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = f(E)$.

Все измеренные и вычисленные результаты заносят в таблицу.

$$d = D = \text{ для } E_0 = 100\,000 \text{ в/м}$$

№ опыта	I_0	ϵ_0	I	U	$E = \frac{U}{d}$	ϵ	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
1							
2							
3							

* ϵ_0 — значение диэлектрической постоянной для $E_0 = 100\,000 \text{ в/м}$

Приборы и принадлежности: образец титаната бария, трубчатая электропечь типа Т 30/200, ртутный термометр с диапазоном от 0—350° С (или термопара) и с ценой деления в 1° С, два автотрансформатора типа ЛАТР-2, микроамперметр с пределами измерения от 0—100 мка, два вольтметра типа АМВ класса 0,5, два однополюсных рубильника.

Теория метода и описание установки. * Для снятия кривой зависимости $\epsilon = f(T)$ собирают установку, схема которой дана на рис. 94. На рисунке ЭП — электрическая нагревательная печь, в которую помещают образец титаната бария C и термометр T .

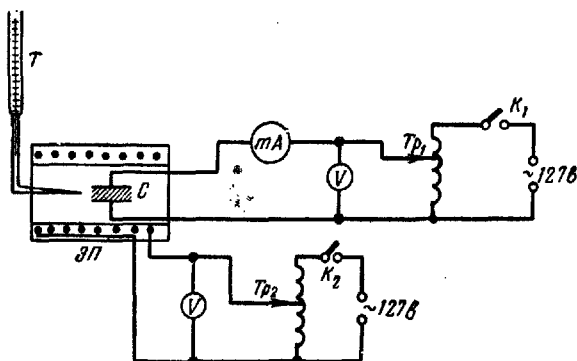


Рис. 94

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Образец C и термометр T помещают в печь ЭП. Замыкают рубильник K_1 , устанавливают разность потенциалов на вольтметре $V_0 = 10—15$ в. Записывают силу тока I_0 , температуру t_0 . По формуле (4) находят значения ϵ_0 , соответствующие комнатной температуре.

2. Включают рубильник K_2 и подают на печь напряжение 60 в. Температура образца повышается, его диэлектри-

* Теория к работе дана на стр. 199, работа № 35.

ческая проицаемость меняется. Это дает изменение тока в цепи образца. Через определенные интервалы берут отсчеты напряжения U и сил тока I , а также отсчеты температуры t для определенных сил тока. Такие отсчеты берут до тех пор, пока сила тока не пройдет через максимум, что соответствует точке Кюри (точка Кюри — температура, при которой диэлектрические свойства титаната бария проходят через максимум), и не спадет до первоначального значения.

3. Подставляют значения I и U в формулу (4), подсчитывают значения ϵ и строят график зависимости $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \varphi(T)$.

Все вычисленные и измеренные результаты записывают в таблицу.

	$U_0 =$	$I_0 =$	$t_0 =$	$\epsilon_0 =$	
№ п/п	U	I	t	ϵ	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
1					
2					
3					

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Введение. В проводниках первого рода при наличии электрического поля происходит упорядоченное движение свободных электронов между узлами кристаллической решетки. Это направленное движение электронов принято называть электрическим током. Электрический ток в проводнике называется *током проводимости*. За направление тока принято считать направление движения положительных зарядов. Поэтому направление тока в металлах противоположно направлению движения электронов. Электрический ток характеризуется *силой и плотностью тока*.

Силой тока I называется скалярная физическая величина, численно равная электрическому заряду dq , проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени dt :

$$I = \frac{dq}{dt}^*$$

* Единицы электрических величин см. в таблице на стр. 16.

Плотностью тока \mathbf{j} называется векторная физическая величина, численно равная силе тока dI , приходящегося на единицу площадки, поставленную перпендикулярно к направлению тока:

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

Вектор \mathbf{j} направлен вдоль тока по направлению вектора напряженности стационарного электрического поля в проводнике.

Если I и \mathbf{j} не меняются во времени, то ток в проводнике называется *постоянным*.

Законы постоянного тока. 1. **Закон Ома для участка цепи.** Падение напряжения U на участке цепи равно произведению его сопротивления R на силу тока I :

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) = IR, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы точек 1 и 2 участков цепи, R — электрическое сопротивление на этом участке, $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между точками 1 и 2 цепи; эта величина называется падением напряжения, или напряжением между этими точками. *Падением напряжения U на участке цепи называется величина, численно равная работе, совершаемой суммарным полем кулоновских и сторонних сил при перемещении на этом участке цепи единичного положительного заряда. Сторонними силами называются силы, действующие на заряды со стороны источников тока (генераторов, гальванических элементов, аккумуляторов и т. п.) и направленные против электростатических сил.*

2. **Закон Ома для замкнутой цепи.** Электродвижущая сила, действующая в замкнутой цепи, равна сумме падения напряжения в этой цепи:

$$\mathcal{E} = (IR + Ir) = I(R + r), \quad (2)$$

где Ir — падение напряжения внутри источника тока (r — сопротивление источника), IR — падение напряжения во внешних участках цепи (R — сумма всех внешних сопротивлений).

Упорядоченное движение свободных электронов в металле непрерывно тормозится вследствие столкновений этих электронов с ионами решетки. Это является причиной

электрического сопротивления проводника. Электрическое сопротивление проводника (или просто сопротивление)

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, l и S — длина и площадь поперечного сечения проводника.

Значение электродвижущей силы — \mathcal{E} (э. д. с.) источника тока равно разности потенциалов на его концах, когда цепь разомкнута. Э. д. с. численно равна работе, совершаемой сторонними силами, при перемещении на участке цепи проводника единичного положительного заряда.

3. Закон Джоуля — Ленца. Количество теплоты Q , выделяемое током в проводнике, пропорционально силе тока I , времени его прохождения t и падению напряжения U :

$$Q = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (4)$$

4. Правила Кирхгофа. I. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (5)$$

II. В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_k на сопротивления R_k соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме э. д. с. \mathcal{E}_k в контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k. \quad (6)$$

5. Если в цепи имеются сопротивления R_1, R_2, \dots или емкости C_1, C_2, \dots включенные последовательно или параллельно, то общее сопротивление R и общая емкость C вычисляются по следующим формулам:

последовательное соединение

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + \dots + R_k, \\ \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_k}; \end{aligned} \quad (7)$$

параллельное соединение

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_k}, \\ C &= C_1 + C_2 + \dots + C_k. \end{aligned} \quad (8)$$

Приборы и принадлежности: реохорд, гальванометр, двойной ключ, батарея аккумуляторов, элемент с известной э. д. с., элемент Даниэля, элемент Грене или элемент Вольта, коммутатор, рсостат.

Теория метода и описание установки. Для определения электродвижущих сил двух элементов и небольших разностей потенциалов часто применяется метод компенсации. Принцип метода состоит в том, что включают два элемента различных э. д. с. \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 полюсами навстречу друг другу (рис. 95) и добиваются исчезновения тока I_2 через исследуемый элемент \mathcal{E}_2 (\mathcal{E}_2 должна быть меньше, чем \mathcal{E}_1). Вместо элемента \mathcal{E}_1 ставят батарею аккумуляторов. На рис. 95

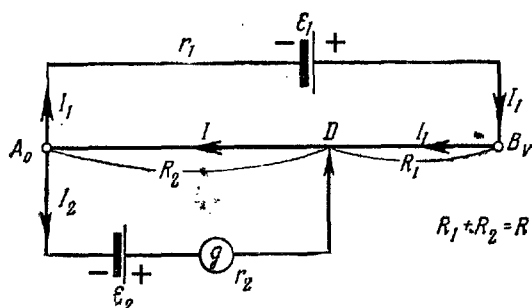


Рис. 95

g — чувствительный гальванометр с нулем посередине, A_0B_V — реохорд с подвижным контактом D . Отсутствие тока в цепи гальванометра показывает, что электродвижущая сила элемента E_2 целиком уравновешивается или компенсируется падением потенциала между точками A и D , т. е. при отсутствии тока в цепи гальванометра разность потенциалов между точками A и D равна электродвижущей силе искомого элемента \mathcal{E}_2 . По первому закону Кирхгофа для узла A_0 имеем:

$$\Sigma I = 0; \quad I = I_1 + I_2.$$

Применяя второй закон Кирхгофа к контурам $\mathcal{E}_1 A_0 D B_V$ и $A_0 \mathcal{E}_2 D$, получим уравнения:

$$\mathcal{E}_1 = I_1 (r_1 + R_1) + IR_2;$$

$$\mathcal{E}_2 = I_2 (r_2 + r_g) + IR_2,$$

где I_1 — ток в цепи аккумулятора \mathcal{E}_1 , I_2 — ток в цепи элемента \mathcal{E}_2 , I — ток на участке $A_0 D$, R_1 и R_2 — сопротивления участков цепи $A_0 D$ и $D B_V$, r_g — сопротивление гальванометра g , r_1 и r_2 — сопротивления цепи $A_0 E_1 B_V$ и $D g A_0$.

Когда в цепи гальванометра g ток отсутствует, т. е. $I_2 = 0$, уравнения выше принимают вид:

$$I = I_1; \quad (9)$$

$$\mathcal{E}_1 = I_1 (r_1 + R_1) + IR_2; \quad (10)$$

$$\mathcal{E}_2 = IR_2. \quad (11)$$

Сравнивая уравнения (9), (10) и (11), получим:

$$\mathcal{E}_2 = \frac{\mathcal{E}_1 R_2}{r_1 + R_1 + R_2}. \quad (12)$$

Если вместо \mathcal{E}_2 подключить элемент \mathcal{E}'_2 , то

$$\mathcal{E}'_2 = \frac{\mathcal{E}_1 R'_2}{r_1 + R_1 + R_2}. \quad (13)$$

Поделив формулу (12) и (13), получим:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}'_2} = \frac{R_2}{R'_2},$$

где R'_2 — сопротивление участка цепи $D B_V$ при включении элемента \mathcal{E}'_2 . Если э. д. с. одного элемента, например \mathcal{E}_2 , известна, то э. д. с. неизвестного элемента

$$\mathcal{E}'_2 = \mathcal{E}_2 \frac{R'_2}{R_2}. \quad (14)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему (рис. 96): p — коммутатор, при помощи которого можно включать в цепь нужный элемент \mathcal{E}_2 или \mathcal{E}'_2 , g — гальванометр, K — двойной ключ, назначение которого сначала замыкать основную цепь — цепь батареи аккумуляторов, а потом — цепь гальванометра g ; это необходимо для того, чтобы предохранить гальванометр от мгновенных импульсных токов, которые возникают в первый момент в цепи батареи \mathcal{E}_2 , так как в первый момент компенсирующий ток отсутствует, R — предохранительный реостат, меняющий ток в основной цепи аккумулятора, AB — про-

волокна реохорда, D — подвижный контакт на реохорде, \mathcal{E}_2 — известный элемент (например, элемент Вестона) или \mathcal{E}'_2 — неизвестный.

2. Ставят реостат R на самое большое сопротивление, а контакт D — посередине реохорда.

3. Рычажок коммутатора замыкают на клеммы 3 и 5, подключая элемент \mathcal{E}_2 с известной э. д. с. Нажимая на ключ K , оценивают отклонение гальванометра и при малом его отклонении уменьшают сопротивление R .

4. Замыкают на короткое время ключ K и передвигают контакт D таким образом, чтобы в цепи гальванометра g ток

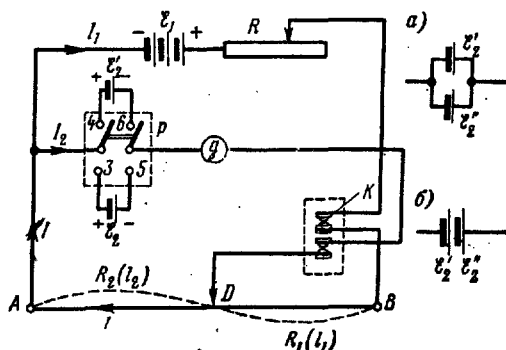


Рис. 96

отсутствовал, т. е. стрелка гальванометра при нажатии на ключ оставалась неподвижной. Измеряют расстояние l_2 .

5. Перекидывают рычажок коммутатора на клеммы 4 и 6 и замеряют l'_2 для элемента \mathcal{E}'_2 с известной э. д. с. (например, элемент Даниэля). Измерения проделывают так же, как и для элемента \mathcal{E}_2 .

6. Подсчитывают значение \mathcal{E}'_2 по формуле (14), заменяя сопротивления участков реохорда R_2 и R'_2 их длинами l_2 и l'_2 . Это можно сделать, так как проволока однородна и имеет одинаковое сечение. Формула (14) примет вид:

$$\mathcal{E}'_2 = \mathcal{E}_2 \frac{R'_2}{R_2} = \mathcal{E}_2 \frac{l'_2}{l_2}.$$

7. Вместо элемента Даниэля подключают в цепь элемент Грене или Вольта и находят э. д. с. \mathcal{E}''_2 для одного из двух элементов:

$$\mathcal{E}''_2 = \mathcal{E}_2 \frac{l''_2}{l_2}.$$

8. Соединяют элементы \mathcal{E}'_2 и \mathcal{E}''_2 сначала параллельно (рис. 96, а), потом последовательно, соблюдая полярность (рис. 96, б), и измеряют э. д. с. полученных батарей (батареи подключают к клеммам 4 и 6 вместо \mathcal{E}_2). Измерения проводят таким же образом, как и в предыдущих случаях для \mathcal{E}'_2 и \mathcal{E}''_2 . Вычисляют значения для результирующей э. д. с. при параллельном и последовательном соединениях:

$$\mathcal{E}_{\text{рез. (паралл)}} = \mathcal{E}_2 \frac{l'_2 (\text{паралл})}{l_2}$$

и для

$$\mathcal{E}_{\text{рез. (посл)}} = \mathcal{E}_2 \frac{l'_2 (\text{посл})}{l_2}$$

Полученные значения э. д. с. для параллельного и последовательного включений элементов сравнивают с полученными ранее результатами для значений \mathcal{E}'_2 и \mathcal{E}''_2 .

Все полученные измерения и вычисления результаты записывают в таблицу.

	l_2	l'_2	\mathcal{E}'_2	l''_2	\mathcal{E}''_2	l'_2 (паралл.)	$\mathcal{E}_{\text{рез}} (паралл.)$	l'_2 (посл.)	$\mathcal{E}_{\text{рез}} (посл.)$
$\mathcal{E}_2 =$ (элемент Вестона)									
Среднее значение	×	×	×	×		×		×	

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ЕМКОСТЕЙ ПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ МОСТИКОВОЙ СХЕМЫ

Для определения сопротивлений проводников и емкостей существуют различные методы. Одним из них является метод мостика постоянного тока (мостик Уитстона). Способ измерения сопротивлений при

помощи мостика является очень точным и весьма часто применяется в лабораторной практике. Принципиальная схема метода мостика дана на рис. 97. Разберем метод монтажа для измерения сопротивления.

Измеряемое сопротивление R_x и три других переменных сопротивления R_0 , R_1 и R_2 соединяются так, что образуют замкнутый четырехугольник $ACBD$. В одну диагональ четырехугольника включен гальванометр G .

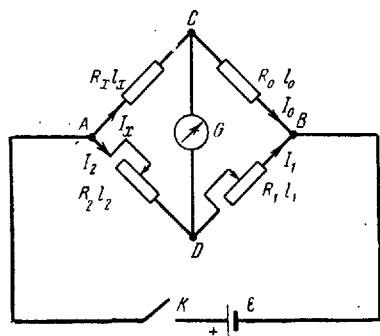


Рис. 97

Применяя к контурам ACD и CBD второе правило Кирхгофа (уравнение (6) введения), получим:

$$\left. \begin{aligned} I_x R_x - I_2 R_2 &= 0, \\ I_0 R_0 - I_1 R_1 &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

Применяя к узлам C и D первое правило Кирхгофа, будем иметь:

$$I_0 = I_x, \quad I_1 = I_2, \quad (2)$$

если ток в гальванометре отсутствует. Из выражений (1) и (2) получим:

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (3)$$

На практике сопротивлением R_0 служит магазин сопротивлений. Двумя другими сопротивлениями R_1 и R_2 являются части реохорда AB (см. рис. 99). По проволоке реохорда перемещается подвижный контакт D , соединенный с гальванометром G . Этот контакт делит реохорд на две части AD и DB .

Вследствие того что проволока реохорда однородна и тщательно калибрована, отношение сопротивлений участков цепи AD и DB (плеч реохорда) можно заменить отношением соответствующих длин плеч реохорда l_2 и l_1 , т. е.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим окончательную формулу для определения сопротивления

$$R_x = R_0 \frac{l_2}{l_1}, \quad (5)$$

где l_1 и l_2 — длины плеч реохорда при нулевом положении стрелки гальванометра.

Для измерения емкости применяют такую же схему мостика (рис. 98).

Отличие схемы мостика для измерения емкости от мостика для измерения сопротивления состоит в том, что вместо измеряемого сопротивления стоит емкость C_x .

В соответствии с этим постоянное напряжение заменяется напряжением переменным (так как конденсатор пропускает только переменный ток), которое получают от генератора звуковой частоты, а на место гальванометра поставлен телефон T . Кроме того, обычную схему мостика несколько изменяют, а именно: переменное напряжение вводят между точками E и D . Такое изменение

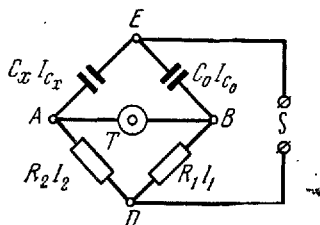


Рис. 98

вводят между точками E и D . Такое изменение схемы мостика улучшает условия измерения, так как сопротивления параллельных ветвей EAD и EBD становятся приблизительно равными. В этом случае формула для определения емкости имеет вид, аналогичный формуле (5):

$$C_x = C_0 \frac{l_1}{l_2}, \quad (6)$$

где C_0 — известная емкость, l_1 и l_2 — плечи реохорда при отсутствии звука в телефоне T .

Работа № 38

Измерение сопротивлений металлов

Приборы и принадлежности: реохорд (калиброванная проволока, натянутая вдоль миллиметрового масштаба), гальванометр, магазин сопротивлений, источник постоянного тока (аккумуляторная батарея или гальванический элемент), ключ, измеряемые сопротивления (две катушки № 1 и 2).

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают электрическую цепь, как показано на рис. 99. Вместо сопротивления R_x в цепь включают одну из неизвестных катушек R' .

2. Помещают подвижный контакт D посередине проволоки реохорда и подбирают сопротивление R_0 в магазине так, чтобы ток в гальванометре почти исчез. Это необходимо делать потому, что точность измерения на мостике зависит

от положения контакта D ; наибольшая точность получается при $l_1 = l_2$.

3. Окончательно устанавливают гальванометр на нулевое деление путем небольших передвижений контакта D и производят измерения длин плеч реохорда l_1 и l_2 .

4. Опыт повторяют, меняя сопротивление магазина R_0 .

5. Подставляя в формулу (5) значения R_0 , l_1 и l_2 , взятые из каждого отдельного опыта, вычисляют R'_1 и R'_2 .

6. На место первой катушки R' в цепь включают вторую катушку R'' . Производя с этой катушкой такие же измерения, как и с катушкой R' , получают значения R''_1 и R''_2 для второй катушки.

7. Измеренные вышеуказанным способом две катушки R' и R'' включают в цепь вместе — сначала последовательно, а затем параллельно. Измеряют сопротивления этих

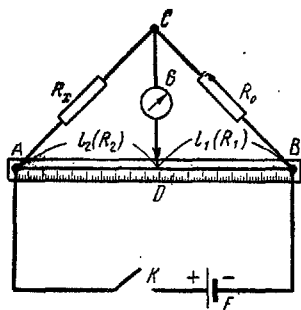


Рис. 99

Измеряемое сопротивление	R_0	l_1	l_2	R_x	ΔR	$\frac{\Delta \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100\%$	$R_{\text{ист}} = \bar{R} \pm \Delta \bar{R}$
Катушка № 1	_____					×	×
Среднее значение							$R'_{\text{ист}} =$
Катушка № 2	_____					×	×
Среднее значение							$R''_{\text{ист}} =$
Катушки № 1 и 2 включены последовательно							$R_1 = \bar{R}' + \bar{R}'' =$
Катушки № 1 и 2 включены параллельно							$R_2 = \frac{\bar{R}' \bar{R}''}{\bar{R}' + \bar{R}''} =$

катушек R_1 и R_2 по одному разу при последовательном, а потом параллельном соединении так же, как это делали для этих же катушек, включенных отдельно.

8. Полученные опытным путем результаты последовательного и параллельного соединения сопротивлений необходимо сопоставить с величинами сопротивлений, рассчитанными по формулам (7) и (8) последовательного и параллельного соединения сопротивлений, пользуясь значениями сопротивлений катушки R' и R'' , найденными ранее.

Все полученные опытом и вычислением результаты сводятся в таблицу (см. таблицу на стр. 212).

Работа № 39

Изучение зависимости сопротивлений металлов от температуры

Приборы и принадлежности: универсальный мост, исследуемый проводник, термостат.

Теория метода и описание установки. Свободные электроны проводника и ионы металла решетки участвуют в тепловом хаотическом движении. С увеличением температуры проводника тепловое движение ионов становится интенсивнее — сопротивление проводника возрастает.

Зависимость сопротивления представляет собой линейную функцию от температуры

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где R_t — сопротивление проводника при температуре t , α — температурный коэффициент сопротивления, R_0 — сопротивление проводника при 0°C .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Подключают к мосту измеряемое сопротивление R_x (металлическая пружинка B , находящаяся в термостате K , наполненном маслом) (рис. 99 и 100).

2. Измеряют по мосту сопротивление R_x при комнатной температуре так же, как в работе № 38 пп. 1, 2, 3, 5.

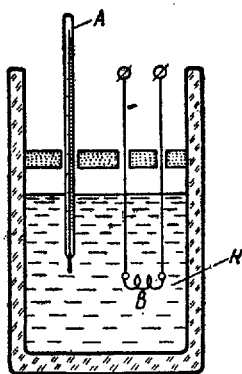


Рис. 100

3. Подогревают термостат, делают измерения сопротивления проводника R_x по мосту через каждые 10°C (подогрев ведут до $80\text{--}90^\circ \text{C}$). Температуру отсчитывают по термометру A .

4. Строят график зависимости $R = f(t)$.

5. Из графика определяют значение R_0 , для чего продолжают полученную прямую до пересечения с осью y . Отрезок на оси y даст значение R_0 .

Работа № 40

Измерение емкости конденсаторов

Ввиду используемого в установке высокого напряжения при выполнении работы строго соблюдать указанные в описании предосторожности.

Приборы и принадлежности: реохорд (калиброванная проволока, натянутая вдоль миллиметрового масштаба), телефон, набор известных емкостей, источник переменного тока звуковой частоты (звуковой генератор), два измеряемых конденсатора, индикатор нуля ИНО-3.

Теория метода и описание установки. *Электрической емкостью уединенного проводника (или просто емкостью) называется физическая величина, численно равная количеству электричества, на которое нужно изменить заряд проводника, чтобы его потенциал изменился на единицу:*

$$C = \frac{q}{\phi},$$

где C — емкость проводника, q — количество электричества, ϕ — потенциал.

Физический смысл электроемкости заключается в том, что для зарядки различных проводников до одного и того же значения потенциала им надо различное количество электричества, таким образом, различные проводники при одном и том же потенциале обладают различной способностью вмещать в себя электрические заряды, что и определяет величину их электроемкости.

Электрическая схема мостика (рис. 101) состоит из двух известных сопротивлений R_1 и R_2 , известной емкости C_0 и неизвестной — C_x . К точкам E и D подводится от генератора звуковой частоты переменное напряжение (от 500 до 2000 гц), а к точкам A и B присоединяется телефонная

трубка T . Если потенциалы точек A и B одинаковы, то в цепи AB ток отсутствует (звука в телефоне нет).

Эта установка для измерения емкости конденсаторов — традиционная; она страдает тем недостатком, что точность измерения зависит от многих субъективных условий (влияния посторонних шумов, степени остроты слуха экспериментатора и др.).

Современная техника позволяет, не изменяя метода, произвести измерения емкостей с большей точностью. Для этого в мостовую схему включают не телефон, а индикатор нуля осциллографического типа. При применении индикатора нуля наблюдение ведется с помощью электронного пучка, который на экране прибора вычерчивает определенную кривую. В случае отсутствия тока между точками A и B моста (см. рис. 104) на экране вместо кривой будет прямая линия, сливающаяся с линией горизонтальной или вертикальной развертки.

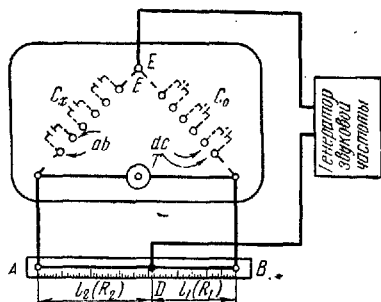


Рис. 101

В настоящей работе применен серийный индикатор нуля осциллографического типа ИНО-3 (рис. 102). Этот индикатор представляет собой прибор, состоящий из электронно-лучевой трубки, такой же, как и у катодного осциллографа*,

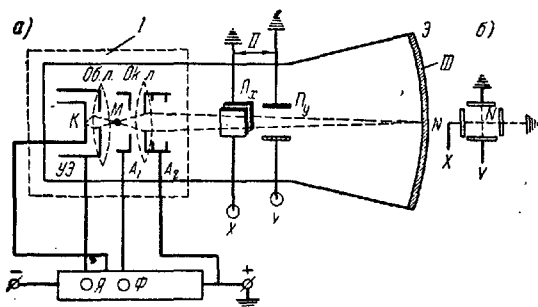


Рис. 102

* Описание электроннолучевой трубки смотри работу № 49.

усилителей для питания отклоняющих пластин по оси X и Y , выпрямителей и трансформатора.

Электроннолучевая трубка служит для получения узкого сфокусированного пучка электронов; все остальные части прибора предназначены для питания и регулировки этой трубки.

Электроннолучевая трубка (рис. 102) состоит из электронной пушки I (отмеченной пунктирной линией), двух конденсаторов X и Y , пластины которых (II) расположены перпендикулярно одна к другой (рис. 102, a и b) и флуоресцирующего экрана (III).

Из электронной пушки пучок электронов попадает в поле двух конденсаторов X и Y . В зависимости от величины напряжения между пластинами того или другого конденсатора электронный пучок отклоняется. Отклонение электронного луча по горизонтали производится полем конденсатора X , отклонение по вертикали — Y (рис. 102, b). Если напряжение на пластинах X и Y отсутствует, то электронный пучок не испытывает отклонения и при правильной фокусировке попадает в точку N на флуоресцирующем экране (III). Если же на пластины X и Y подано напряжение, то на экране трубки в общем случае будет вычерчиваться эллипс.

Измерения и обработка результатов измерений. При включении в цепь телефона: 1. Собирают электрическую цепь, как показано на рис. 101. Вместо неизвестной емкости присоединяют один из конденсаторов C_x с контактами ab и т. д.

2. Подвижный контакт D помещают посередине реохорда AB и подбирают известную емкость C_0 (контакты cd и т. д.) так, чтобы звук в телефоне был минимальный, это соответствует тому, что потенциалы точек A и B равны.

3. Когда достигнуто минимальное звучание, медленно передвигают контакт D до полного исчезновения звука в телефоне T . При этом положении контакта D отсчитывают длины плеч реохорда AD (l_2) и DB (l_1).

4. Подставляя в формулу (6) значения C_0 , l_1 и l_2 , взятые из опыта, вычисляют емкость первого неизвестного конденсатора C_x .

5. Вместо первого конденсатора присоединяют второй неизвестный конденсатор C'_x . Проводят с этим конденсатором такие же измерения, как и с конденсатором C_x .

6. Измеренные вышеуказанным способом конденсаторы C'_x и C''_x включают в цепь вместе сначала параллельно, а потом последовательно. Измеряют общую емкость двух конденсаторов при параллельном и последовательном их соединении так же, как это делали для этих же конденсаторов в отдельности.

7. Полученные опытным путем результаты параллельного и последовательного соединений емкостей необходимо сравнить с величинами емкостей, рассчитанными по формулам для параллельного и последовательного соединений, пользуясь при вычислении в качестве известных емкостей значениями C'_x и C''_x , найденными из предыдущих измерений.

Все полученные опытным путем (и вычислением) результаты записываются в таблицу.

	C_0	l_1	l_2	C_x	
Конденсатор C'_x	-				
Конденсатор C''_x					
Параллельное соединение конденсаторов					$C_1 = C'_x + C''_x =$
Последовательное соединение конденсаторов					$C_2 = \frac{C'_x C''_x}{C'_x + C''_x} =$

При включении в цепь индикатора нуля: 1. Ознакомиться с ручками управления прибора ИНО-3, выведенными на переднюю панель прибора. Передняя панель прибора (рис. 103, 102) содержит: *a* — экран электроннолучевой трубки, *б* — ручку регулировки яркости (гравировка «Яркость»); на рис. 102 выведена на панель и обозначена через *Я*, *в* — ручку регулирования фокусировки (гравировка «Фокусировка»); на рис. 102 обозначена через *Ф*, *г* — экранированные гнезда для подключения напряжения на пластины конденсаторов *X* и *Y* (гравировка «*x*» и «*y*»); на рис. 102 — *X*, *Y*, *д* — ручки переключателей «Усиление *X* грубо» и «Усиление *X* плавно» (изменение напряжения на пластинах *X*), *е* — ручку «Усиление *Y*» (изменение напряжения на пластинах *Y*), *ж* —

ручки переключателя частот с гравировкой «Частота ГЦ» и «Подстройка частоты»; з — телефонные гнезда (одно гнездо имеет знак заземления «З»), и — индикаторную лампу, к — тумблер питания с гравировкой «вкл» — «выкл», л — держатель предохранителя (переключатель сети).

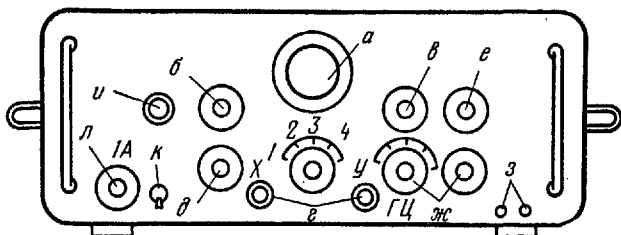


Рис. 103

2. В электрическую цепь для измерения емкости конденсаторов, собранную по схеме (рис. 101), к точкам А и В присоединяют вместо телефона Т ИНО-3 так, как показано на рис. 104, не включая вилки в гнезда Х и У.

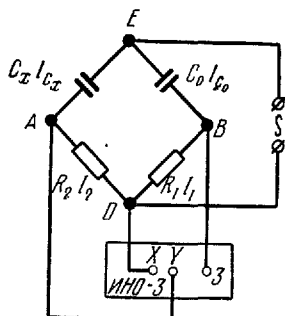


Рис. 104

3. Подготавливают прибор ИНО-3 к работе, для чего делают следующее:

а) с разрешения преподавателя включают шнур питания прибора в сеть (≈ 127 в), проверив предварительно напряжение на держателе предохранителя;

б) после минутного нагрева ручками Ф и Я добиваются четкого пятна на экране;

в) ставят переключатель «Частота ГЦ» в положение, соответствующее частоте напряжения генератора звуковой частоты, питающего мост;

г) подключают к гнезду Х (к пластине конденсатора Х) напряжение от генератора звуковой частоты (от точки D) и ручкой «Усиление Х плавно» устанавливают линию развертки на полный диаметр экрана трубки по оси Х;

д) отключают от гнезда Х напряжение и переключают его в гнездо У (к пластинам конденсатора У);

е) вращают ручку «Подстройка частоты» и добиваются развертки луча по оси Y на полный диаметр трубки;

ж) присоединяют к гнезду X точку D , а к гнезду Y — точку A (см. рис. 104). При таком присоединении на экране электроннолучевой трубки образуется эллипс;

з) передвигая движок реохорда (точка D), достигают полной балансировки плеч моста, что соответствует переходу эллипса в прямую линию по оси X на экране.

В этот момент потенциалы точек A и B одинаковы, следовательно, электрическое поле конденсатора Y равно нулю и отклонение электронного луча по оси Y не происходит.

4. Производят отсчет плеч по реохорду и сравнивают этот отсчет с измерениями, которые были произведены для данного конденсатора при помощи телефона.

При работе с ИНО-3 необходимо соблюдать осторожность, так как питание электроннолучевой трубки порядка тысячи и более вольт. Запрещается включать ИНО-3 в розетку питания без разрешения преподавателя.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ЕМКОСТЕЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Теория метода и описание прибора. Гальванометрами называются электроизмерительные приборы высокой чувствительности, предназначенные для измерения слабых токов и напряжений порядка $10^{-6} \div 10^{-10}$ а (или в) или больших сопротивлений (порядка $10^8 \div 10^{10}$ ом).

Для измерения постоянного тока широко применяются магнитоэлектрические гальванометры с вращающейся катушкой, для переменного — вибрационные гальванометры.

По способу отсчета показаний гальванометры делятся на стрелочные и зеркальные.

У стрелочного гальванометра имеется стрелка, жестко связанная с подвижной катушкой, и шкала, вдоль которой эта стрелка перемещается.

У зеркального гальванометра роль указателя отклонения играет луч света, отбрасываемый зеркальцем, прикрепленным к оси подвижной части гальванометра, на шкалу, расположенную на некотором расстоянии от зеркальца.

Устройство гальванометра магнитоэлектрической системы основано на законе Ампера: на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует механическая сила

$$F = kiBl \sin(\widehat{i, B}),$$

где i — сила тока в проводнике, B — индукция магнитного поля, l — длина проводника, k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц; при измерении всех величин в единицах одной и той же системы $k = 1$, $(\widehat{i, B})$ — угол между направлениями тока и поля.

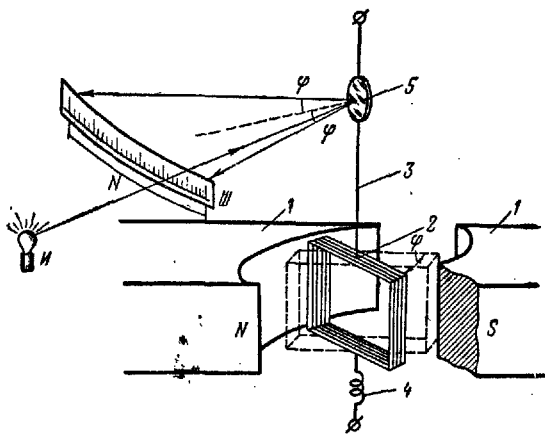


Рис. 105

Направление силы F определяется по правилу левой руки. Сила F максимальна, когда поле направлено перпендикулярно току, и равна нулю, когда направления тока и поля совпадают.

В гальванометре проводник с током (очень тонкий и легкий) согнут в виде прямоугольной рамки, имеющей до нескольких тысяч витков (рис. 105). Рамка помещена в поле B постоянного магнита. По ней течет ток i в направлении, указанном стрелками (рис. 106).

Силы, действующие на параллельные стороны AB и DC , равны по величине и противоположны по направлению, т. е.

$$F_{AB} = -F_{CD}.$$

Силы F_{AB} и F_{CD} всегда лежат в плоскости рамки и стремятся только раздвинуть или сблизить провода AB и CD . Этому противодействует жесткость рамки.

Силы F_{BC} и F_{AD} также равны по величине и противоположны по направлению; т. е.

$$F_{BC} = -F_{AD}.$$

Численная их величина

$$F = knil_1B \sin(\widehat{i, B}) = knil_1B,$$

где n — число витков в рамке, l_1 — длина стороны BC или DA . Так как стороны рамки всегда перпендикулярны направлению индукции магнитного поля, то $\sin(\widehat{i, B})$ равен единице. Направление этих сил определяется тем же правилом левой руки.

Силы F_{BC} и F_{AD} создают пару сил, вращающих рамку вокруг нити подвеса. Вращающий момент M каждой из сил можно легко найти из рис. 106:

$$M_1 = F \frac{l_2}{2} \cos \alpha = nil_1B \frac{l_2}{2} \cos \alpha,$$

Рис. 106

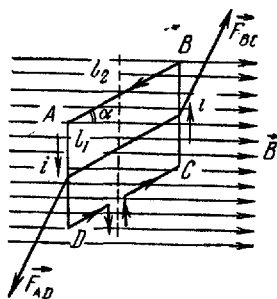
где l_2 — длина стороны AB , α — угол между направлением поля и плоскостью рамки (все величины в СИ).

Вращающий момент пары сил

$$M_{вр} = 2M_1 = nil_1l_2B \cdot \cos \alpha = niSB \cdot \cos \alpha,$$

где $S = l_1l_2$ — площадь рамки.

В данной работе применяется гальванометр, состоящий из постоянного магнита 1, между полюсами которого вращается легкая четырехугольная рамка 2 (см. рис. 105). Рамка подвешена на упругой (платиновой или бронзовой) ленточке или на кварцевой нити 3, по которой ток поступает в рамку. Уходит ток из рамки по золотой или серебряной мягкой ленточке 4, не оказывающей упругого сопротивления вращению рамки. Внутри рамки находится цилиндр из мягкого железа (на рис. 105 не показан). Благодаря этому магнитное поле в зазоре радиально (рис. 107) и по-



этому момент сил, действующих на рамку, не зависит от угла α , т. е.

$$M_{вр} = niSB.$$

Рамка будет вращаться до тех пор, пока момент вращения не будет скомпенсирован упругим моментом кручения, возникающим в нити подвеса, т. е.

$$M = D\varphi,$$

где D — момент кручения на единицу угла поворота, φ — угол поворота.

Таким образом,

$$niSB = D\varphi.$$

Для различных сил тока, протекающих по рамке, угол поворота φ будет различным.

Зная угол φ , можно судить о силе тока, протекающего по рамке:

$$i = \frac{D\varphi}{SnB} = C_i\varphi, \quad (1)$$

где $C_i = \frac{D}{SnB}$ называется постоянной гальванометра по току.

Для измерения угла φ на нити подвеса 3 укреплено легкое зеркальце 5 (см. рис. 105), которое вращается вместе с рамкой. При повороте зеркальца на угол φ световая полоска смещается на N мм, причем из рис. 108 видно, что

$$N = L \cdot \operatorname{tg} 2\varphi,$$

где L — расстояние от зеркала до шкалы.

Для установки зеркальца на нуль (т. е. в правильное начальное положение) служит корректор.

Подставив в формулу (1) значение φ , получим:

$$i = C_i\varphi = C_i \frac{N}{2L}$$

(при малых углах $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$).



Рис. 107

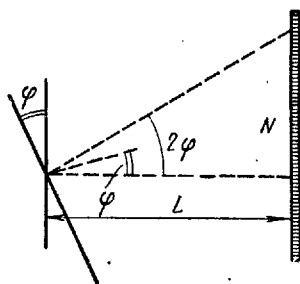


Рис. 108

Для характеристики свойств гальванометра принято указывать C_i при условии, что цена деления шкалы 1 мм, а расстояние от зеркала до шкалы $L = 1$ м. Размерность

$$[C_i] = \frac{a}{\text{мм/м}}.$$

При таком значении L формулу можно записать в следующем виде:

$$i = C_i \frac{N}{2}. \quad (2)$$

Работа № 41 Измерение сопротивлений

Приборы и принадлежности: гальванометр, источник постоянного тока, измеряемые сопротивления, два ключа.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему, как указано на рис. 109, и показывают ее преподавателю для проверки*.

2. Между точками 1 и 2 по очереди подключают неизвестные сопротивления № 1 и 2.

3. Находят сопротивление № 1 и 2, для чего, замыкая ключ K_1 (при разомкнутом ключе K_2), отсчитывают по шкале смещение N светового указателя от положения равновесия. Вычисляют ток i через гальванометр по формуле (2); значение C_1 указано на приборе.

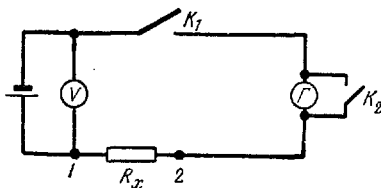


Рис. 109

Зная напряжение u , измеряемое вольтметром V , и ток i , находят по закону Ома [$u = i(R_x + R_r)$] искомое сопротивление

$$R_x = \frac{u}{i} - R_r$$

(значение R_r указано на приборе).

* Ключ K_2 вводится для того, чтобы пропустить индукционные токи возникающие в обмотке рамки, при ее повороте в магнитном поле. По правилу Ленца эти токи тормозят движение рамки и при замыкании ключа K_2 колебания рамки (зайчика) прекращаются. Ключ K_2 называется демпфером.

Измерения каждого сопротивления проводят три раза. Для прекращения колебаний рамки гальванометра замыкают ключ K_1 и в моменты прохождения световым указателем положение равновесия на короткое время (1—2 сек) замыкают ключ K_2 .

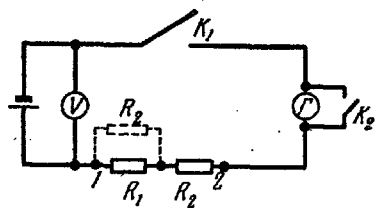


Рис. 110

4. Те же сопротивления включают последовательно друг другу, а затем параллельно, как указано на рис. 110. Для последовательно и параллельно включенных сопротивлений

проделяют такие же измерения, как в п. 3, и находят по три значения общего сопротивления для каждого случая. Зная R_1 и R_2 , подсчитывают теоретически сопротивления при последовательном ($R_{\text{посл}} = R_1 + R_2$) и параллельном соединениих ($R_{\text{пар}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$). Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ опыта	n	N	$i = C_i \frac{N}{2}$	R_x	R_x	\bar{R}_x	ΔR_x	$\Delta \bar{R}_x$	$R_{x \text{ теор}}$	$\frac{\Delta \bar{R}_x}{\bar{R}_x} 100\%$	$R_{\text{ист}} = \bar{R} \pm \Delta \bar{R}$
Сопротивление № 1											
1											
2											
3											
Сопротивление № 2											
1											
2											
3											
Последовательное соединение											
1											
2											
3											
Параллельное соединение											
1											
2											
3											

Приборы и принадлежности: баллистический гальванометр, реостат, эталон емкости, измеряемые конденсаторы, ключ, рубильник.

Для измерения емкости гальванометром увеличивают момент инерции рамки 2 (см. рис. 105), прикрепляя к ней дополнительные грузики (рис. 111). Такое изменение конструкции превращает зеркальный гальванометр в баллистический и дает возможность измерять кратковременные импульсы тока и количество электричества q , протекающее через гальванометр, которое равно:

$$q = A\varphi, \quad (3)$$

где φ — максимальное отклонение рамки от положения равновесия (отклонения зайчика по шкале), A — постоянная для данного гальванометра величина, называемая баллистической постоянной (обычно около 10^{-9} к/мм/м).

Емкость конденсатора C_1 можно определить путем сравнения его с конденсатором известной емкости C_0 . Последний называется эталонным конденсатором.

Для этого оба конденсатора, неизвестный и эталонный, последовательно один за другим заряжают до одного и того же напряжения и разряжают через баллистический гальванометр. Емкости первого и второго конденсаторов будут равны:

$$C_1 = \frac{q_1}{U}; \quad C_0 = \frac{q_0}{U}.$$

Так как потенциал $U = \text{const}$, то отношение емкостей можно заменить отношением количества электричества, т. е.

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{q_1}{q_0},$$

поскольку

$$q_1 = A\varphi_1 \text{ и } q_0 = A\varphi_0.$$

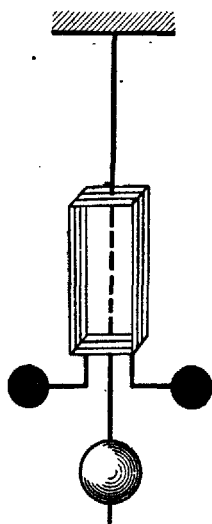


Рис. 111

Следовательно,

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{\varphi_1}{\varphi_0}.$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают цепь по схеме рис. 112. На рисунке: \mathcal{E} — источник напряжения, R — потенциометр, V — вольтметр, C — конденсатор, G — баллистический гальванометр, K — переключатель, F — демпфирующий ключ. Если трудно подобрать конденсаторы, то для поддержания постоянства тока ставят дроссель.

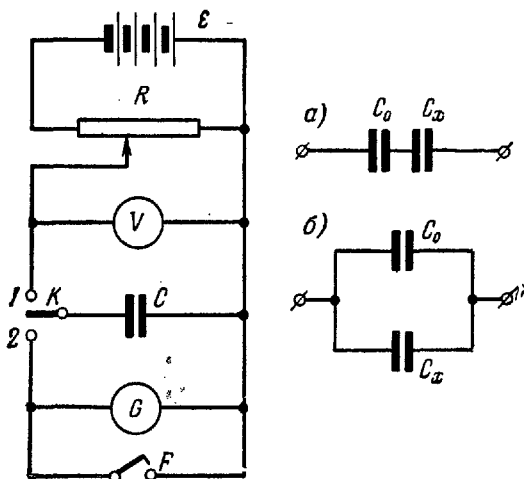


Рис. 112

2. Устанавливают с помощью движка потенциометра R заданное преподавателем напряжение U , которое подводится к конденсатору C и измеряется вольтметром.

3. Включают в цепь конденсатор известной емкости C_0 , для чего переключатель K ставят в положение 1, тем самым заряжая этот конденсатор. Затем перекидывают переключатель в положение 2 и разряжают конденсатор через гальванометр; при этом замечают и записывают максимальное отклонение зайчика по шкале φ_0 . Это повторяют два раза. При каждом повторении измерения нужно начинать после того, как зайчик установится в своем первоначальном положении (он около него колеблется). Чтобы зайчик поскорее успокоился, в момент прохождения его через

это положение замыкают ключ F^* . После установления зайчика ключ размыкают.

4. Из полученных двух значений φ_0 берут среднее.

5. На место эталонного конденсатора включают в цепь конденсатор C_x неизвестной емкости. При этом же напряжении U производят измерения, как и с эталонным конденсатором, и находят φ_x .

	U	φ	C	ΔC	$\frac{\Delta \bar{C}}{\bar{C}} \cdot 100\%$
1. Эталонный конденсатор	$U_1 =$				X
	$U_2 =$				
Среднее значение	X				
2. Конденсатор с неизвестной емкостью	$U_1 =$				X
	$U_2 =$				
Среднее значение	X				
3. Батарея параллельного соединения конденсаторов	$U_1 =$				X
	$U_2 =$				
Среднее значение	X				
4. Батарея последовательного соединения конденсаторов	$U_1 =$				X
	$U_2 =$				
Среднее значение	X				

* Назначение ключа F — замыкать накоротко цепь гальванометра для возникновения демпфирующих (тормозящих) индуктивных токов в рамке гальванометра при ее качании, которые вызовут быстрое успокоение рамки.

6. Соединив эти два конденсатора сначала параллельно (рис. 112, б), а затем последовательно (рис. 112, а), определяют общую емкость батарей.

7. Емкость конденсатора и батарей находят по формуле

$$C_x = C_0 \frac{\Phi_x}{\Phi_0},$$

где C_0 — емкость эталонного конденсатора, Φ_0 — среднее отклонение гальванометра для эталонного конденсатора, Φ_x — среднее отклонение гальванометра для конденсатора (батарей), емкость которого ищем.

8. Производят такие же измерения, как в пп. 3, 4, 5, 6 и 7, для тех же конденсаторов, но при другом напряжении U_2 , также заданном преподавателем.

Таким образом, для неизвестного конденсатора (батарей) получают два значения емкости (при двух разных U). Они должны быть близкими. Из них берут среднее и вычисляют абсолютную и относительную ошибки. Результаты измерений и вычислений сводятся в таблицу (см. таблицу на стр. 227).

Пользуясь полученными данными, проверить справедливость формул емкости батарей конденсаторов для последовательного и параллельного соединения (по формулам (7) и (8) введения).

ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ И КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Введение. Термоэлектронная эмиссия. Свободные электроны (в 1 см^3 имеется 10^{22} — 10^{23} электронов), находящиеся в состоянии беспорядочного движения, не выходят из металла, так как их удерживают электрические силы. Возникают эти силы в результате двух причин:

1) между свободными электронами и положительно заряженной ионной решеткой существуют силы взаимодействия;

2) в результате теплового движения некоторые из свободных электронов, находящиеся вблизи поверхности металла, могут перейти эту поверхность и несколько удалиться от нее, поэтому поверхность металла окутана электронной оболочкой, толщиной порядка нескольких межатомных расстояний в металле. Эта электронная оболочка заряжена

отрицательно, а поверхность металла вследствие обеднения ее электронами — положительно. Следовательно, возникает сила, притягивающая электрон и мешающая ему выйти.

Эти причины приводят к возникновению в поверхностном слое металла потенциального барьера *. Для того чтобы электрон мог пройти через этот барьер и удалиться из металла, необходимо совершить работу. *Работа, которую надо совершить на освобождение электрона e из металла, называется работой выхода A :*

$$A = e \cdot \Delta\phi, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, $\Delta\phi$ — *поверхностный скачок потенциала или контактная разность потенциалов* между металлом и окружающей средой. Работа выхода неодинакова для различных металлов и зависит от их структуры.

При невысоких температурах энергия свободных электронов меньше работы выхода.

Эмиссию (испарение) электронов с поверхности металла можно получить: 1) при нагревании металла — имеем *термоэлектронную эмиссию*; 2) при помещении металла в сильное электрическое поле, которое «подхватывало» бы электроны с поверхности металла (*холодная эмиссия*); 3) при облучении металла светом — *получим фотоэффект*; 4) при бомбардировке поверхности металла электронами, ионами или другими частицами (*вторичная термоэлектронная эмиссия*).

Контактные явления. Если соприкасаются два различных металла, свободные электроны переходят из одного металла в другой, имеем явление диффузии. Условия перехода неодинаковы. Электронам легче переходить к тому металлу, у которого: 1) работа выхода больше (следовательно, имеет место преимущественный переход свободных электронов от металла с меньшей работой выхода к металлу с большей работой выхода) и 2) больше среднее число свободных электронов в единице объема, т. е. свободные электроны переходят от того металла, в котором их среднее количество в единице объема больше, к тому, в котором среднее количество в единице объема меньше.

* Образуется как бы конденсатор; разность потенциалов между его пластинами — $\Delta\phi$.

Таким образом, один из проводников, получающий избыток электронов, заряжается отрицательно, а другой, теряющий часть электронов, заряжается положительно. На границе соприкосновения двух различных металлов возникает *контактная разность потенциалов*. Контактная разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ между двумя металлами (первый закон Вольты) равна:

$$\Delta\varphi = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}, \quad (2)$$

где n_{01} и n_{02} — число электронов в единице объема первого и второго металла, A_1 и A_2 — работы выхода электронов из этих металлов, T — температура в месте контакта, k — постоянная Больцмана, e — абсолютная величина заряда электрона; знак минус стоит потому, что при $A_1 > A_2$ первый металл заряжен отрицательно, второй — положительно, φ_1 и φ_2 — потенциалы первого и второго металла.

Процесс перехода электронов от одного металла к другому происходит до тех пор, пока разность работ выхода A_1 и A_2 и различия количества свободных электронов n_{01} и n_{02} в единице объема не уравниваются противодействием возникшей контактной разности потенциалов.

Контактная разность потенциалов зависит не только от свойств металлов, но и от температуры, увеличиваясь с повышением последней.

В замкнутой цепи, образованной несколькими металлическими проводниками, все спаи которых находятся при одинаковой температуре, невозможно возникновение электродвижущей силы за счет только контактной разности потенциалов. *Для того чтобы возникла э. д. с. в цепи и в цепи появился ток, необходимо, чтобы спаи имели различную температуру.* В этом случае возникнет термо-э. д. с., величина которой, прямо пропорциональна разности температур обоих спаев. Термоэлектрические явления в металлах используются для измерения температур. Для этого применяются термопары или термоэлементы. Термопары обладают большой чувствительностью и широким диапазоном, например, термопара железо—константан имеет чувствительность $5,3 \cdot 10^{-5}$ в/град и применяется для измерения температур до 500°C , термопара платина—платинородий — $6 \cdot 10^{-6}$ в/град и применяется для измерения температур от самых низких до тысяч градусов.

Приборы и принадлежности: двухэлектродная электронная лампа (диод), два вольтметра, микроамперметр, потенциометр, реостат, источник постоянного напряжения в 200 в, источник постоянного или переменного напряжения в 10 в, ключ.

Теория метода и описание установки. Двухэлектродная электронная лампа (диод) представляет собой вакуумную лампу (давление в ней примерно 10^{-7} мм рт. ст.) с двумя электродами, выполняющими совершенно различные функции, — анодом A и катодом K (рис. 113).

Анодом служит металлический цилиндр, вдоль оси которого расположена нить накала — катод — тончайшая

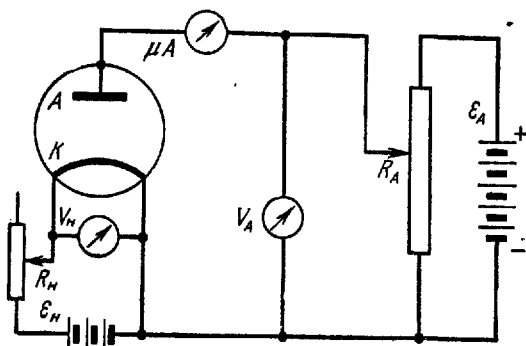


Рис. 113

вольфрамовая проволока. Концы нити накала и анод включаются в цепь с помощью медных ножек, выведенных через цоколь.

Сущность происходящих в диоде физических процессов состоит в следующем. При нагревании током нити накала возникает *термоэлектронная эмиссия*. Отдельные, наиболее быстрые электроны получают энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера, вылетают за пределы нити и образуют в баллоне электронное облако, препятствующее дальнейшему вылету электронов. Если анод и катод соединить вне лампы проводником, то часть электронов, оседающая на аноде, вызовет слабый ток во внешней цепи. Если же сообщить аноду некоторое положительное напряжение, то к нему устремится большее количество

электронов — ток во внешней цепи усилится. Если продолжать увеличивать напряжение на аноде при том же накале, то ток будет расти, но лишь до определенного предела. Это связано с тем, что число электронов, достигающих анода за единицу времени, становится равным числу электронов, вылетающих за то же время с катода. Установившийся при этом в цепи максимальный термоэлектронный ток, возможный при данной температуре накала, называется *током насыщения*. Для увеличения тока в лампе надо увеличить температуру накала. Ток насыщения может быть и для неизменного напряжения на аноде.

Цель данной работы — определение зависимости силы тока в цепи от двух факторов: *от температуры нити накала* (зависящей от силы тока, проходящего через нить) и *от напряжения на аноде*. Графики, выражающие первую и вторую зависимости, называются соответственно *температурной и анодной характеристиками лампы*. Эти характеристики, зависящие от конструктивных особенностей лампы, позволяют определить пригодность лампы для тех или иных целей, и в первую очередь в качестве выпрямителей (диод пропускает ток в одном направлении).

Измерения и обработка результатов измерений. Прежде всего проверяют соответствие собранной установки схеме, приведенной на рис. 113*.

На схеме источник напряжения \mathcal{E}_n , реостат R_n и нить накала K составляют *цепь накала*. Напряжение на концах нити накала измеряется вольтметром V_n . Питание анодной цепи производится через выпрямитель \mathcal{E}_A . Для того чтобы можно было регулировать анодное напряжение, оно подается через потенциометр R_A .

Напряжение между катодом и анодом лампы измеряется вольтметром V_A , а сила тока в анодной цепи — микроамперметром μA .

Снятие температурной характеристики. 1. С помощью потенциометра R_A на анод подается и в течение опыта поддерживается постоянное напряжение U_A (наиболее удобная для данной лампы величина напряжения указывается на установке).

2. С помощью реостата R_n постепенно увеличивается сила тока в цепи накала и через определенные значения, указанные на приборе, отсчитывается величина анодного тока.

3. По полученным данным строится кривая зависимости анодного тока от напряжения в цепи накала: $I_A = f(U_n)$.

Снятие анодной характеристики.
 1. Поддерживая постоянное напряжение накала U_n (величина его указывается), постепенно увеличивают анодное напряжение и через определенные интервалы, указанные на приборе, отмечают величину анодного тока.

2. Строят кривую зависимости анодного тока от анодного напряжения:

$$I_A = f(U_A).$$

Все измерения записывают в таблицу.

1) $U_n = \text{const}$			2) $U_n = \text{const}$		
U_n			U_A		
в вольтах	в делениях шкалы прибора	I_A	в вольтах	в делениях шкалы прибора	I_A

Работа № 44

Градуирование термоэлемента

Приборы и принадлежности: термоэлемент (термопара), милливольтметр (гальванометр), нагревательный прибор, термометры, сосуд с водой.

Теория метода и описание установки. Если составить замкнутую цепь из двух спаянных с концов разнородных металлов, которую называют термопарой, или термоэлементом (рис. 114), то в местах спая I и II возникает противоположная контактная разность потенциалов. При одинаковых температурах суммарная контактная разность потенциалов в цепи равна нулю. Будем спай I поддерживать при температуре T_1 , а спай II — при T_2 и допустим, что $T_1 > T_2$. Обозначая контактную разность потенциалов в спаях I и II соответственно $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$, нетрудно заключить, что $\Delta\varphi_1 > \Delta\varphi_2$. Следовательно, в цепи есть какая-то разность потенциалов

$$\mathcal{E}_t = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2.$$

Эту разность потенциалов \mathcal{E}_t называют *термоэлектродвижущей силой*. В цепи возникает ток, называемый *термо-*

электрическим током I , величина которого определяется термоэлектродвижущей силой и сопротивлением цепи. Это можно записать так:

$$\mathcal{E}_t = I(R_i + R_0) = IR,$$

где R_i — внутреннее сопротивление термоэлемента, R_0 — внешнее сопротивление цепи, на которую замкнут ток.

Для некоторых термоэлементов можно принять, что возникающая термоэлектродвижущая сила пропорциональна разности температур спаев, т. е.

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_0(T_2 - T_1) = \mathcal{E}_0 \cdot \Delta T. \quad (3)$$

Здесь \mathcal{E}_0 — термоэлектродвижущая сила, возникающая при разности температур в 1°C , является величиной

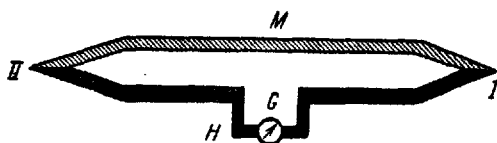


Рис. 114

постоянной для каждой пары металлов, образующих термоэлемент.

Если разность потенциалов измерять чувствительным гальванометром, то отклонение его подвижной части будет пропорционально силе тока.

На зависимости между отклонением подвижной части гальванометра и разности температур основан термоэлектрический метод измерения температур. Для этого термоэлемент должен быть предварительно градуирован. Результаты градуировки изображаются в виде графика или в виде формулы. *Градуировкой термопары называется определение экспериментальным путем зависимости термоэлектродвижущей силы \mathcal{E}_t , возникающей в термопаре от разности температур ΔT ее спаев, т. е. $\mathcal{E}_t = f(\Delta T)$.*

Вместо этой кривой можно построить кривую $I = \varphi(\Delta T)$, где I — термоток в цепи. Обе кривые имеют одинаковый вид, если сопротивление в цепи $R = \text{const}$.

Экспериментальная установка (рис. 115) состоит из термопары, изготовленной из двух проволок M и K ; в данной работе M — медь, а K — константан. Проволоки M и K

спаяны концами *I* и *II*. Концы разомкнутого константанового термоэлектрода присоединены к гальванометру *G*.

Спай *I* помещается в сосуд *N*₁ с водой, которая может нагреваться от нагревателя *P*. Спай *II* также помещен в сосуд, в котором жидкость находится при постоянной температуре. В обоих сосудах помещены термометры *D*.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают установку по схеме, показанной на рис. 115. Проверяют равенство температур в сосудах *N*, при этом стрелка гальванометра должна стоять на нуле.

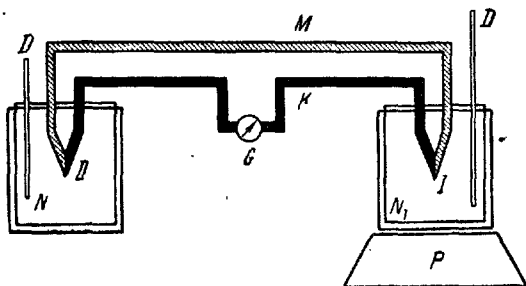


Рис. 115

2. Сосуд *N*₁, в котором находится спай *I*, нагревают. Температура спая *I* будет повышаться и в цепи возникает ток, что покажет отклонение стрелки гальванометра.

Фиксируют показания гальванометра через равные интервалы изменения температур, например через 5—10° С. Опыт проводят, повышая температуру жидкости до 80—90° С.

Полученные опытом результаты заносят в таблицу.

№ опыта	T_1	T_2	$T_2 - T_1$	$I = Cn_2$	\mathcal{E}_0
1					
2					

C — постоянная гальванометра по току.

3. На основании опытных данных строят график $I = f(\Delta T)$, откладывая по оси *x* разность температур, а по оси *y* термоток. Значение \mathcal{E}_0 вычисляют по формуле (3).

Величина \mathcal{E}_0 для термопары медь — константан указана на приборе.

Если величина \mathcal{E}_0 не дана, то ее определяют по полученному графику $I = \varphi(\Delta T)$ следующим образом.

Берут на графике две точки при температуре T_1 и T_2 и соответствующее T_2 значение n_2 делений по гальванометру. Зная C — постоянную гальванометра по току и r_2 — внутреннее сопротивление гальванометра (C и r_2 — указаны на приборе), вычисляют \mathcal{E}_0 по формуле

$$\mathcal{E}_0 = \frac{I r_2}{T_2 - T_1} = \frac{C n_2 r_2}{T_2 - T_1}.$$

Работа № 45 Определение термоэлектродвижущей силы термоэлемента

Приборы и принадлежности: термопара, гальванометр, две пробирки с маслом или керосином, помещенные в латунные сосуды, магазин сопротивлений, термопары, нагревательный прибор.

Теория метода и описание установки. Два спаянных или сваренных проводника (в нашем случае медь — константан) составляют термопару (рис. 115). Если один из спаев, например I (рис. 115), подогреть, то в цепи *МИКП* появится термоток, величина которого зависит от величины термоэлектродвижущей силы \mathcal{E}_t , которая в свою очередь является линейной функцией от разности температур ΔT концов спаев I и II [см. формулу (3)]. Чем больше \mathcal{E}_0 , тем чувствительнее термопара.

В данной работе определение \mathcal{E}_0 проводится следующим образом. Оба конца термопары помещают в сосуды с маслом N и N_1 (рис. 116). Один из концов термопары I подогревают до температуры T_2 . При температуре T_2 термоток, возникающий в цепи:

$$I_1 = n_1 C = \frac{\mathcal{E}_t}{R_0}, \quad (4)$$

где n_1 — число делений на гальванометре, соответствующее температуре T_2 , C — постоянная гальванометра по току (написана на шкале прибора), R_0 — сопротивление термопары и гальванометра, \mathcal{E}_t — термоэлектродвижущая сила при данной температуре.

Если не изменяя температуры включить последовательно с гальванометром добавочное сопротивление R , то величина термотока (при той же температуре T_2):

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}_t}{R_0 + R} = n_2 C, \quad (5)$$

где n_2 — число делений, соответствующее температуре T_2 , но с включенным добавочным сопротивлением R .

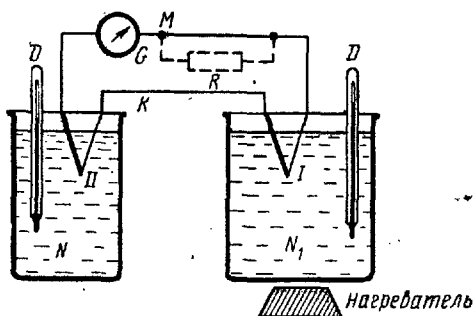


Рис. 116

Из уравнений (4) и (5) исключаем R_0 и полученное значение

$$\mathcal{E}_t = C \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2} R$$

подставляем в формулу (3).

Искомое значение

$$\mathcal{E}_0 = \frac{CR}{T_2 - T_1} \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2}, \quad (6)$$

где T_1 — температура холодного спая.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Помещают оба спая термопары в сосуды с маслом (рис. 116) и смотрят, чтобы температуры на термопарах были одинаковы. Измеряют температуру T_1 (комнатная).

2. Подогревают спай I и отсчитывают по термометру T_2 , а по гальванометру n_1 .

3. Подключают добавочное сопротивление R , вытаскивая один из штырьков магазина, и отсчитывают при той же температуре T_2 новый отброс гальванометра — n_2 .

4. По формуле (6) подсчитывают \mathcal{E}_0 .

Измерения проводятся три раза для разных R . Полученные опытом результаты вносят в таблицу.

№ опыта	T_1	n_1	R	n_2	ϵ_0	$\Delta \epsilon_0$	$\frac{\Delta \bar{\epsilon}_0}{\epsilon_0}$
1							
2							
3							
Среднее значение	×	×	×	×			

T_1 — комнатная температура, C написано на гальванометре.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Введение. 1. По своим электрическим свойствам твердые тела разделяются на металлы, полупроводники и диэлектрики. Хорошая проводимость и низкое удельное сопротивление металлов $\rho_{\text{мет}} = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$ обусловлены высокой концентрацией свободных электронов. В изоляторах концентрация свободных электронов мала и удельное сопротивление $\rho_{\text{из}} = 10^8 - 10^{13} \text{ ом} \cdot \text{м}$. Между металлами и изоляторами находятся вещества, обладающие промежуточными свойствами, для которых $\rho = 10^{-5} - 10^8 \text{ ом} \cdot \text{м}$. Эти вещества называются полупроводниками. Полупроводниками являются: бор (В), углерод (С), кремний (Si), фосфор (P), сера (S), германий (Ge), мышьяк (As), селен (Se), олово (Sn), сурьма (Sb), теллур (Te), йод (I). В полупроводниках так же, как и в металлах, прохождение электрического тока не сопровождается какими-либо химическими изменениями.

2. Проводимость полупроводников зависит от: 1) температуры, 2) действия достаточно сильного электрического поля, 3) освещения полупроводника светом (фотопроводимость полупроводника; см. работу № 72). Зависимость проводимости полупроводника от температуры заключается в том, что удельное сопротивление полупроводников очень сильно уменьшается с увеличением температуры, тогда как у проводника наоборот. При низких температурах полупроводник подобен диэлектрику, при высоких — проводнику.

Различия электрических свойств металлов, полупроводников и изоляторов *связаны с распределением электронов в атомах*. Электроны в атомах движутся по строго определенным орбитам, которые распределяются по слоям. На каждой орбите может одновременно находиться не более двух электронов; эти два электрона не тождественны в своих свойствах — они отличаются друг от друга направлением спина (спином электрона называется величина момента количества движения электрона). Каждый электрон обладает определенным запасом энергии, причем энергии электронов одного слоя близки друг к другу, энергии же электронов, орбиты которых относятся к различным слоям, отличаются на большие величины. Все электроны, образующие электронную оболочку атома, подчиняются принципу Паули: никакие два электрона не могут находиться в одном и том же состоянии.

Различия между веществами связаны: 1) с распределением возможных дискретных энергетических уровней электронов, 2) с группировкой этих уровней в «зоны» и 3) со степенью заполнения этих зон электронами.

При образовании твердого тела из отдельных атомов и молекул состояние электронов, движущихся вокруг отдельных ядер на внутренних электронных оболочках, не меняется, внешние же электронные оболочки в результате сближения атомов и возникающего сильного взаимодействия между электронами перестраиваются. В одних случаях электроны (валентные, внешние) освобождаются и становятся свободными (*металл*). В других случаях электроны продолжают удерживаться молекулами или ионами, которым они принадлежат (*в этом случае подвижность электронов ограничена — диэлектрик*). Промежуточный случай, когда имеется наличие большого числа слабо связанных, почти свободных электронов, представляет собой *полупроводник*. Уровни энергии для различных орбит электронов твердого

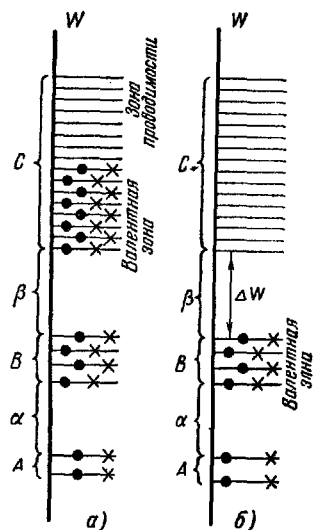


Рис. 117

тела графически представляются следующим образом (рис. 117).

Полосы A , B и C , в которых заключены разрешенные уровни энергий электронов W_i , называются *разрешенными зонами*, полосы же, в которых разрешенные уровни отсутствуют (полосы α и β), называются *запрещенными зонами*. Наличие на орбите электрона обозначено или точкой или крестиком — направление спина.

3. Рассмотрим распределение электронов в этих зонах в случае металлов, полупроводников и диэлектриков.

а. Металлы. Для металлов (рис. 117, а) нижняя группа уровней A и B характеризует энергии электронов внутренних оболочек, тесно связанных в атомах. Верхняя зона C содержит энергетические уровни внешних, валентных электронов и заполнена частично.

При приложении к металлу электрического поля валентные электроны могут, ускоряясь полем, приобретать небольшие порции энергии ΔW_i и переходить на более высокие уровни внутри зоны C . Таким образом, зону C можно разделить на две части: нижняя ее часть — валентная зона, верхняя — зона проводимости. Для металла эти две зоны непосредственно соприкасаются друг с другом и электроны свободно переходят из валентной зоны в зону проводимости.

Таким образом, если зона C не полностью занята валентными электронами, то твердое тело всегда будет проводить электрический ток.

б. Диэлектрики. В случае диэлектрика (рис. 117, б) зона проводимости C отделена от валентной зоны B широким интервалом ΔW (запрещенная зона). Все уровни зоны B заполнены электронными парами (с противоположно направленными моментами — спинами) и поэтому, по принципу Паули, переход с одного из этих уровней на другой невозможен. В диэлектрике ΔW в сотни раз превышает величину kT (kT — средняя кинетическая энергия атомов), где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, и при обычных температурах число электронов, перебрасываемых за счет теплового движения в зону проводимости, ничтожно мало.

в. Полупроводники. 1. Собственная проводимость полупроводников. В полупроводнике распределение «разрешенных» и «запрещенных» зон подобно диэлектрику (рис. 117, б), но в полупроводнике величина ΔW превышает среднюю энергию теплового движения kT всего лишь

в несколько десятков раз. Поэтому уже при комнатных температурах часть валентных электронов из зоны B может быть переброшена в зону C и полупроводник начинает проводить электрический ток — электронная проводимость.

Отличие такого полупроводника от металла состоит в том, что в металле концентрация свободных электронов постоянна и электрическое сопротивление с ростом температуры возрастает, в полупроводниках же рост температуры сопровождается быстрым увеличением числа электронов в зоне проводимости и, следовательно, уменьшением электрического сопротивления. Существенным отличием полупроводников от металлов является двойственная природа носителей заряда в полупроводниках, которая заключается в том, что кроме появления электронов в зоне проводимости C появляются еще и вакантные места в валентной зоне B (дырки), на которые могут переходить другие электроны заполненной зоны. Дырки эквивалентны появлению в данном месте положительного заряда, и они начнут перемещаться как положительный заряд (рис. 118).

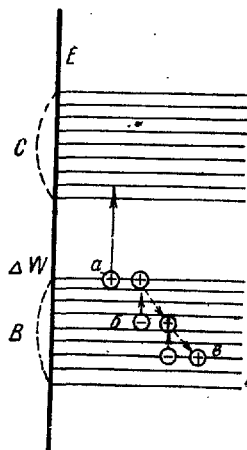


Рис. 118

На рис. 118 показано перемещение дырки. Дырка находится в положении a (электрон из зоны B перешел в зону C). Через некоторое время на место дырки перейдет электрон из соседнего узла b (переходу электрона из b в a способствует поле E). Теперь вакантное место, т. е. дырка, оказалась в узле b , далее она переместится в узел v и т. д.

Таким образом, в полупроводнике будем иметь перемещение электронов против поля и перемещение дырок по полю, т. е. ток будет обеспечиваться движением как электронов проводимости — электронный ток, так и дырок — дырочный ток. Полупроводники, у которых имеется равное количество носителей заряда электронов проводимости и дырок, называются *полупроводниками с собственной проводимостью*.

Для возникновения собственной проводимости чистого полупроводника необходимо электроны перебросить из зоны B в зону C . Для этого необходимо затратить энергию,

которая называется энергией активации собственной проводимости и определяется ΔW — шириной запрещенной зоны. Зависимость электропроводности полупроводников от температуры выражается формулой

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (1)$$

где γ — электропроводность полупроводника при данной температуре, γ_0 — постоянный коэффициент, соответствующий электропроводности полупроводника при $T \rightarrow 0$.

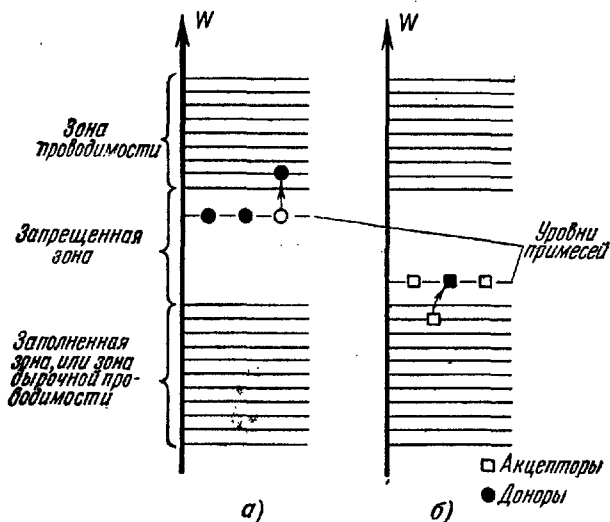


Рис. 119

Кроме проводников с собственной проводимостью, существуют примесные полупроводники. Наличие примесей дает возможность менять свойства полупроводников и получать полупроводники, обуславливающие одностороннюю проводимость. Такие полупроводники используются в качестве выпрямителей и усилителей тока.

2. *Примесная проводимость полупроводников.* Наличие примесей меняет свойства полупроводников двояко. Одни примеси отдают электроны — они называются *донорными*, другие примеси присоединяют к себе электроны — такие примеси называются *акцепторными*. Наличие примесей ведет к появлению в запрещенной зоне отдельных разрешенных уровней.

На рис. 119, а и б показано появление донорного уровня, расположенного вблизи зоны проводимости, и акцепторного — вблизи заполненной зоны.

При наличии *донорной примеси* полупроводник приобретает преимущественно *электронную проводимость*, при наличии же *акцепторной примеси* — преимущественно *дырочную*. Это происходит вследствие того, что при наличии донорных уровней вблизи зоны проводимости она обогащается электронами за счет атомов донора. Атом донора, отдав лишний электрон, становится *положительным ионом*. Расположение акцепторных уровней вблизи заполненной зоны ведет к тому, что из заполненной зоны электроны пере-

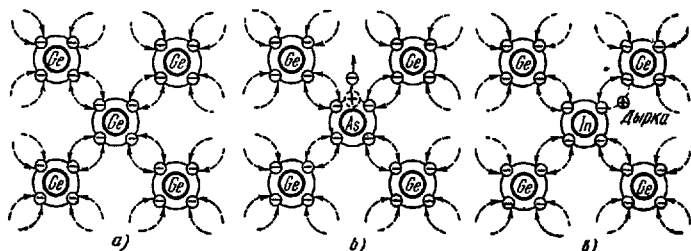


Рис. 120

ходят на акцепторный уровень. Эти электроны превращают атомы акцептора в отрицательные ионы, а на месте электрона в заполненной зоне образуется дырка.

На рис. 120, а показана схема кристалла германия. Германий *четырёхвалентен*, т. е. во внешней оболочке имеются четыре слабо связанных электрона (на рис. 120 связи электронов с соседними электронами показаны пунктирными стрелками). Если один из атомов германия заменить атомом (донорной) примеси, например *пятивалентным* атомом мышьяка As, то освободится один лишний электрон из внешней валентной оболочки мышьяка (рис. 120, б); этот электрон станет свободным, а атом мышьяка станет *положительным ионом*. Свободный электрон сможет участвовать в *электронной проводимости*.

Если же один из атомов германия заменить атомом акцепторной примеси, например *трехвалентным индием* In (рис. 120, в), то в силу структуры решетки германия атом индия захватит еще один электрон из заполненной зоны и превратится в *отрицательный ион*, а в заполненной зоне

появится дырка. Появление дырки приведет к *дырочной проводимости*.

Полупроводники с электронной проводимостью обозначают буквой *n*, с дырочной — *p*.

Полупроводниковые приборы малогабаритны. Они нашли широкое применение: могут заменять электронные лампы в радиотехнической аппаратуре (кристаллические диоды и триоды), служить выпрямителями (селеновые, германиевые, купроксные). Из полупроводников изготавливают полупроводниковые сопротивления (термисторы), фотосопротивления, электрические печи, термоэлементы.

3. *Односторонняя проводимость полупроводников*. При контакте некоторых полупроводников или металла с полупроводником в месте контакта возникает односторонняя (униполярная) проводимость тока, т. е. ток хорошо проходит в одном направлении и почти не проходит в обратном. Это происходит вследствие того, что в полупроводниках концентрация свободных электронов мала, возникающие в месте контакта ионы проникают в полупроводники на значительную глубину (до 10^{-5} см), т. е. в десятки раз больше, чем в металлах, и перераспределяют свободные носители заряда в области контакта.

I. Рассмотрим случай контакта *металла и n-полупроводника*. Будем считать, что работа выхода электронов из металла $A_1 > A_n$ — работы выхода электронов из *n*-полупроводника. В этом случае приконтактный слой *n*-полупроводника обеднится электронами и зарядится положительно, а металла — отрицательно. Между металлом и полупроводником образуется двойной электрический слой. В контактном слое полупроводника почти нет свободных электронов, и его электрическое сопротивление значительно больше, чем в остальном объеме полупроводника. Такой слой при включении его в цепь дает проводимость тока через место контакта только в одном направлении от металла к полупроводнику. Это направление называется *пропускным*, а двойной электрический слой — *запирающим*.

II. Рассмотрим случай *контакта дырочного и электронного полупроводников* $p \rightarrow n$ -переход, причем контактный потенциал дырочного полупроводника выше, чем электронного (рис. 121, а). Вследствие теплового движения через место контакта происходит диффузия свободных электронов в направлении $n \rightarrow p$ и дырок в направлении $p \rightarrow n$. В этом случае в области контакта (слой *l*, толщины 10^{-4} — 10^{-5} см)

в n -полупроводнике останутся ионы атомов донора, заряженные положительно, а в p -полупроводнике — ионы акцептора, заряженные отрицательно. Объемные заряды, которые появились в месте контакта в слое l , создали электрическое поле, которое препятствует дальнейшей односторонней диффузии электронов в направлении $n \rightarrow p$. Слой l , в котором образовался этот «потенциальный барьер», для электронов называется *запирающим слоем*. После установления равновесия переход электронов в направлении $n \rightarrow p$ компенсируется обратным переходом $p \rightarrow n$. Скачок потенциала в области контакта показан условно батарейей \mathcal{E} (рис. 121, а).

Если теперь присоединить к этому кристаллу стороннюю э. д. с. ($\mathcal{E}_{\text{стр}}$) так, как показано на рис. 121, б, т. е. плюс к p -кристаллу, а минус к n -кристаллу, то ток через кристалл увеличится. Это произойдет потому, что направление $\mathcal{E}_{\text{стр}}$ противоположно \mathcal{E} контактного и $\mathcal{E}_{\text{стр}}$ будет уменьшать действие \mathcal{E} контактного, т. е. облегчит передвижение основных носителей тока (электронов в p - и дырок в n -полупроводнике) из глубины полупроводника, при этом запирающий слой l будет уменьшаться. Следовательно, электрический ток I будет свободно проходить через

$p \rightarrow n$ -переход в направлении от p -к n -полупроводнику. Это направление называется *пропускным*.

При перемене полюсов внешней э. д. с. (рис. 121, в) ток через кристалл или прекратится, или сильно уменьшится,

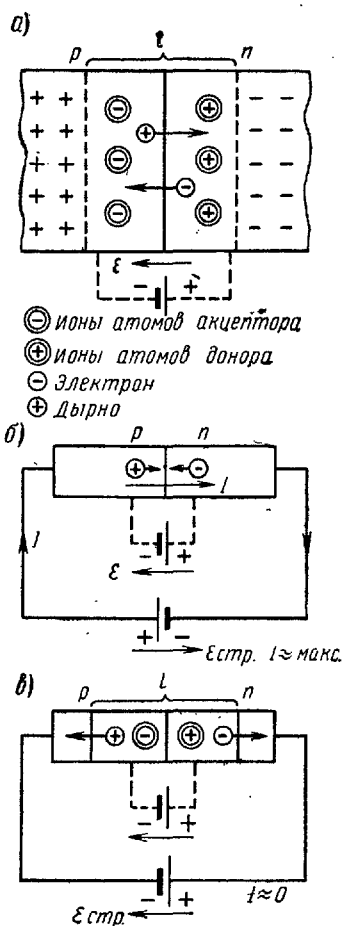


Рис. 121

так как $\mathcal{E}_{\text{стр}}$ имеет такое же направление, что и \mathcal{E} контактное, оно действует так же, как \mathcal{E} контактное, т. е. обедняет область контакта подвижными носителями тока, так как электроны и дырки уходят от места контакта в противоположные стороны и толщина запирающего слоя l увеличивается. Сопротивление этой области резко возрастает, ток проводимости резко уменьшается. Такой односторонней проводимостью обладают селеновый и германиевый выпрямители, которые будут рассматриваться в работах № 47 и 48.

Работа № 46

Изучение зависимости сопротивления полупроводника и термистора* от температуры и определение энергии активации полупроводника, необходимой для возникновения собственной проводимости

Приборы и принадлежности: реохорд (калиброванная проволока, натянутая вдоль миллиметрового масштаба), гальванометр, магазин сопротивлений, источник постоянного тока, два ключа, пробирка с образцом полупроводника (германий), термистор, термометр, термостат, представляющий собой стеклянный стакан с маслом, электроплитка, калориметр с мешалкой.

Теория метода и описание установки. С повышением температуры электропроводность полупроводников возрастает, это происходит вследствие того, что число электронов, перебрасываемых из валентной зоны B в зону проводимости C (рис. 118), увеличивается, а следовательно, увеличивается и число дырок в валентной зоне (см. стр. 240).

В данной работе зависимость сопротивления полупроводника R от температуры определяется при помощи мостика Уитстона. Схема мостика Уитстона показана на рис. 122, где R_m — магазин сопротивлений, AB — реохорд, R — измеряемый полупроводник в термостате, G — гальванометр, K_1 и K_2 — ключи, \mathcal{E} — источник постоян-

* Термистор — полупроводниковое термосопротивление. Термисторы имеют большой температурный коэффициент сопротивления, что дает возможность использовать их для измерения температур, для автоматического регулирования тока и т. д.

ного тока (выпрямитель), R_g — дополнительное сопротивление к гальванометру Γ , D — подвижный контакт.

Из теории мостика Уитстона следует, что при отсутствии тока в гальванометре Γ сопротивление

$$R = R_m \frac{l_1}{l_2}, \quad (2)$$

где l_1 и l_2 — длины плеч реохорда, R_m — величина сопротивления, включенного в магазине.

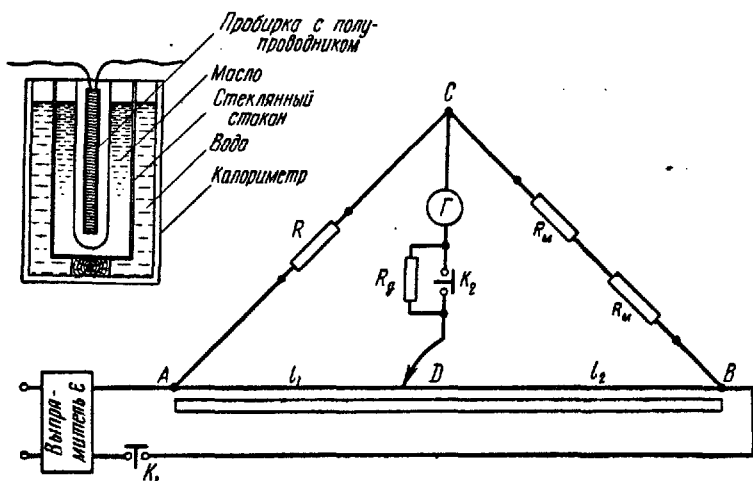


Рис. 122

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему мостика Уитстона.

2. Включают электроплитку и нагревают калориметр с водой, в который помещен термостат с полупроводником или термистором, до температуры $t_1 = 50^\circ \text{C}$.

3. Включают источник тока \mathcal{E} и производят измерения сопротивления полупроводника (или термистора) R_1 при температуре t_1 .

Измерение на мостике Уитстона производят следующим образом:

а) ставят движок D посередине реохорда;

б) подбирают сопротивления в магазине так, чтобы при нажмие на ключ K_1 стрелка гальванометра Γ отклонялась бы от нулевого деления вправо или влево на малое число делений ($R_m \approx 200 \text{ см}$);

в) после этого, перемещая движок D , добиваются полного отсутствия прохождения тока через гальванометр Γ (при этом замыкают ключ K_2 , чтобы повысить чувствительность гальванометра Γ). Размыкать ключи надо в обратном порядке — сначала K_2 , а потом K_1 .

4. По формуле (2) подсчитывают значение R_1 .

5. Нагревают полупроводник или термистор до температур $t_2 = 60^\circ \text{C}$, $t_3 = 70^\circ \text{C}$, $t_4 = 80^\circ \text{C}$, $t_5 = 90^\circ \text{C}$, $t_6 = 95^\circ \text{C}$ и соответственно находят сопротивления R_2, R_3, R_4, R_5, R_6 .

При определении сопротивлений R_2, R_3 и т. д. сопротивление в магазине R_m надо уменьшать, так как сопротивление полупроводника или термистора R_i с повышением его температуры уменьшается.


6. Из полученных значений R строят график зависимости сопротивления полупроводника или термистора от температуры $R = f(T)$, откладывая по оси ординат значения R , а по оси абсцисс T .

7. По формуле

$$\Delta W = 2k \frac{\ln R_m - \ln R_n}{\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_n}},$$

где k — постоянная Больцмана, T_n, T_m и R_n, R_m — соответственно значения температур и сопротивлений при различных температурах, вычисляют энергию активации полупроводника ΔW для его собственной проводимости различных пар, вычисленных сопротивлений R и соответствующих температур (не менее трех раз).

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ опыта	R_m	t_1	t_2	$t^\circ \text{C}$	R	T	$\ln R$	$\frac{1}{T}$	W	ΔW	$\frac{\Delta \bar{W}}{\bar{W}} \cdot 100\%$
1									$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_1 \\ \Delta W_2 \\ \Delta W_3 \end{array} \right.$		
2											
3											
4											
5											
6											
	X	X	X	X	X	Среднее значение					

Приборы и принадлежности: селеновый столбик, германиевый выпрямитель, миллиамперметр, амперметр, вольтметр, потенциометр, двухполюсный переключатель, однополюсный ключ.

Теория метода и описание установки. Селеновый выпрямитель устроен следующим образом. Одним электродом является железный никелированный диск с нанесенным на него тонким слоем кристаллического селена (около 0,1 мм), вторым — пластинка сплава висмут — кадмий — олово, покрывающая слой селена.

Под действием термической обработки в селене около второго электрода образуется слой селенистого кадмия, обладающий электронной проводимостью, селен же обладает дырочной проводимостью.

Запирающий слой возникает на границе между дырочным селеном и электронным селенистым кадмием; *пропускным направлением тока является направление от селена к селенистому кадмию (направление движения дырок)* (рис. 123). Один такой

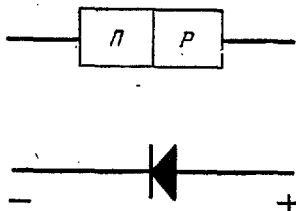


Рис. 123

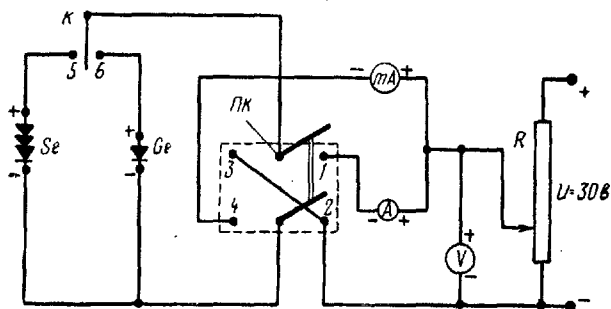
выпрямляющий элемент называют выпрямляющей шайбой; отдельные шайбы собирают в выпрямительный столбик.

К униполярной контактной проводимости относится также и германиевый выпрямитель. Германий обладает электронной проводимостью. Для получения электронно-дырочного контакта (*p-n-перехода*) поверхность пластинки электронного германия подвергают специальной обработке или вводят на некоторую глубину примеси (индий), в результате чего образуется слой германия, обладающий дырочной проводимостью.

Пропускным направлением тока является направление от дырочного (p) слоя германия к электронному (n).

Германиевый выпрямитель практически пропускает ток только в одном направлении (обратный ток в сотни тысяч раз меньше прямого тока).

Вольт-амперной характеристикой называется зависимость силы тока I , протекающего через полупроводник, от приложенного к полупроводнику напряжению U . Для снятия вольт-амперной характеристики германиевого и селенового выпрямителей собирают следующую схему (рис. 124). На рисунке Se и Ge — селеновый и германиевый выпрямители, смонтированные на одной панели. Однополюсный ключ K служит для поочередного включения в цепь либо селенового, либо германиевого выпрямителя. Двухполюсный ключ $ПК$ дает возможность менять направление тока через полупроводники Se и Ge. Если $ПК$ присоединен к клеммам 1—2, то направление тока будет прямым, при-



« Рис. 124

соединение же $ПК$ к клеммам 3—4 изменит ток на обратный. Величина прямого тока измеряется амперметром A , обратного — миллиамперметром mA . Напряжение на выпрямителе подается через потенциометр R и измеряется вольтметром V ; график зависимости прямого (обратного) тока от напряжения на вольтметре V даст вольт-амперную характеристику селенового и германиевого выпрямителей.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают электрическую схему (рис. 124). При соединении миллиамперметра, амперметра и вольтметра с источником тока необходимо соблюдать полярность (правые клеммы электроизмерительных приборов обычно имеют положительную полярность).

2. Устанавливают подвижный контакт потенциометра в положение, соответствующее наименьшему напряжению.

3. После проверки схемы преподавателем или лаборантом движком потенциометра устанавливают по вольтметру определенное напряжение, указанное на приборе.

4. Включают селеновый выпрямитель, для чего переключатель ставят на клеммы 1—2, а ключ K на клемму 5.

5. Увеличивают напряжение на вольтметре и при напряжениях, указанных на приборе, делают измерения прямого тока $I_{\text{пр}}$ по амперметру A , протекающего через селеновый выпрямитель.

6. Перекинув ключ K на клемму 6, делают отсчеты прямого тока $I_{\text{пр}}$, протекающего через германиевый выпрямитель, при тех же значениях напряжения на вольтметре V .

7. Для снятия обратного тока включают переключатель PK на клеммы 3—4, а ключ K на клемму 5; движок потенциометра устанавливают в положение наименьшего напряжения.

8. Передвигая движок потенциометра, снимают по миллиамперметру mA силу обратного тока $I_{\text{обр}}$, протекающего через селеновый выпрямитель.

Перекинув ключ K на клемму 6, проделывают такие же измерения для германиевого выпрямителя. (Напряжение, снимаемое с потенциометра, соответствует тем же значениям, что и при снятии прямого тока.)

9. Результаты измерений записывают в таблицу.

№ опыта	Селен (Se)					Германий (Ge)				
	$U_{\text{пр}}$	$I_{\text{пр}}$	$U_{\text{обр}}$	$I_{\text{обр}}$	K_{Se}	$U_{\text{пр}}$	$I_{\text{пр}}$	$U_{\text{обр}}$	$I_{\text{обр}}$	K_{Ge}
1										
2										
3										
4										
5										

10. Строят вольт-амперные характеристики для селенового и германиевого выпрямителей, откладывая по оси абсцисс значения напряжения, а по оси ординат значения силы тока. Прямые напряжения и токи откладывают на положительных полуосях, а обратные напряжения и токи — на отрицательных полуосях.

11. По формуле $k = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}}$ вычисляют коэффициент выпрямления для селенового выпрямителя при соответствующих напряжениях.

Приборы и принадлежности: двухполупериодная выпрямляющая установка, состоящая из двух селеновых выпрямителей, понижающий трансформатор, амперметр и вольтметр переменного тока, реостат, осциллограф, гнезда для включения осциллографа, переключатель, ключ.

Теория метода и описание установки. Два полупроводника, один из которых обладает электронной, а другой «дырочной» проводимостью, соприкасающиеся по некоторой поверхности, хорошо проводят электрический ток в одном направлении и плохо проводят его в обратном направлении.

Явление односторонней проводимости объясняется следующим образом. Пусть приложенное внешнее электриче-

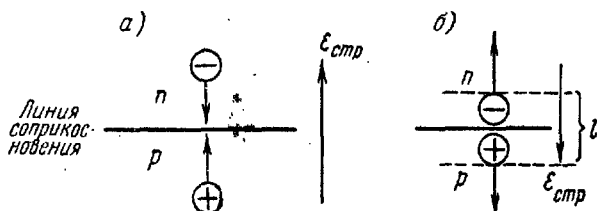


Рис. 125

ское поле с напряженностью E направлено от полупроводника p с «дырочной» проводимостью к полупроводнику n с электронной проводимостью (рис. 125, а). В таком поле электроны и «дырки» движутся навстречу друг другу и, встречаясь на границе соприкосновения обоих полупроводников, взаимно нейтрализуются; во внешней цепи идет электрический ток, доставляя все новые и новые пары нейтрализующихся электронов и «дырок». При наложении внешнего поля противоположного направления электроны и «дырки» уходят из района соприкосновения полупроводников (рис. 125, б); в этом районе расширяется запирающий слой l , обедненный носителями тока; сопротивление контакта возрастает и ток проходит плохо.

Выпрямителем называют прибор, преобразующий переменный электрический ток в постоянный.

Наиболее распространенными типами твердых выпрямителей являются селеновые и купроксные. Эти выпрямители конструктивно выполняются в виде шайб круглой или прямоугольной формы, набираемых в столбики; число шайб зависит от приложенного напряжения. Каждая шайба представляет собой выпрямительный (вентильный) элемент, т. е. обладает односторонней проводимостью. Ток, пропускаемый через такую шайбу, показан на рис. 126. Из рисунка видно, что ток обратный во много раз меньше прямого.

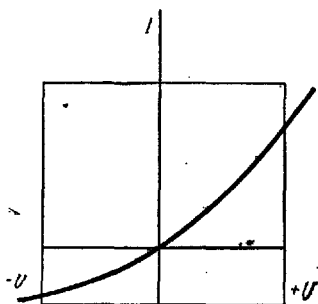


Рис. 126

Селеновая шайба (рис. 127) состоит из железного или алюминиевого диска 1, покрытого никелем 2. На поверхность никеля с одной стороны нанесен тонкий слой полупроводящего селена 3. Сверху селен покрывают сплавом олова, висмута и кадмия 4. Запирающий слой возникает в селене на границе со сплавом. Полюсами выпрямителя являются слой этого сплава (+) и железный диск (-).

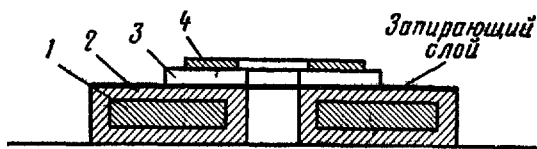


Рис. 127

Основной частью купроксного выпрямителя является твердый полупроводник из закиси меди Cu_2O . При изготовлении выпрямительной шайбы закись меди получается на медной пластинке, а между ними образуется слой, у которого сопротивление электрическому току еще больше, чем у закиси меди. К закиси меди плотно прижимается свинцовая пластинка, которая обеспечивает надежный контакт (рис. 128).

Такого рода выпрямитель пропускает электроны преимущественно в направлении от меди через закись к свинцовой пластинке.

Предельное напряжение, которое можно подводить к шайбе выпрямителя, ограничивается электрической прочностью полупроводникового слоя. Для селеновых выпрямителей оно составляет 15—20 в, для купроксных — 5—10 в. Для выпрямления большего напряжения набирается столбик из нескольких шайб (для 120 в их количество будет 6).

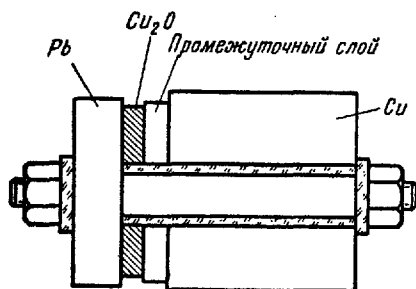


Рис. 128

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) выпрямительной установки выражается:

$$\eta = \frac{N_c}{N_0}$$

где N_c — мощность, снимаемая с выпрямительной схемы, N_0 — мощность, поступающая в схему.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему (рис. 129). На схеме Tp — трансформатор, CB_1 и CB_2 — селеновые выпрямители, смонтированные на

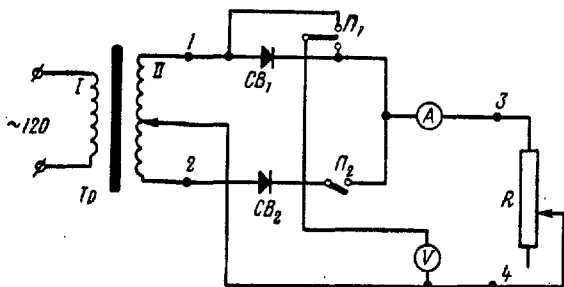


Рис. 129

щите, V — вольтметр постоянного тока, A — амперметр постоянного тока, Π_1 — переключатель, Π_2 — ключи, R — реостат, 1, 2, 3, 4 — гнезда для подключения осциллографа.

2. Определяют к. п. д. выпрямляющей схемы для двухполупериодного выпрямления на выпрямителях CB_1 и CB_2 .

Для этого:

а) вводят полностью реостат R ;

б) определяют *к. п. д. схемы для двухполупериодного выпрямления* ($\eta_{дп}$) на $СВ_1$ и $СВ_2$. С этой целью выключатель $П_2$ оставляют в замкнутом положении и отсчитывают показания вольтметра V при нижнем положении переключателя $П_1$ (получится значение U') и верхнем положении $П_1$ (получится значение U'').

Вычисляют $\eta_{дп}$ по формуле

$$\eta_{дп} = \frac{N_c}{N_0} = \frac{U'I'}{U''I''} = \frac{U'}{U''} \quad (3)$$

(так как от переключения $П_1$ ток не меняется).

3. Определяют *к. п. д. схемы для однополупериодного выпрямления* ($\eta_{оп}$) на $СВ_1$. С этой целью размыкают выключатель $П_2$ и повторяют для образованной тем самым однополупериодной схемы выпрямления те же измерения, что и для двухполупериодной схемы.

Вычисляют $\eta_{оп}$ по формуле (3).

Переключатель $П_1$ и ключ $П_2$ размыкают. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу записи результатов.

№ опыта	U'	U''	$\eta_{дп}$	U'	U''	$\eta_{оп}$
Средние значения		×		×	×	

4. Исследуют осциллографом * кривые подводимого и выпрямленного напряжений. Для этого:

а) включают осциллограф, повернув на нем по часовой стрелке ручку «Вкл.», и выжидают 2 мин. Вращением ручки «Фокус» добиваются того, чтобы линия на экране стала тонкой;

б) пробные контакты осциллографа вставляют в гнезда 1 и 2 схемы (рис. 129). Регулировкой ручки «Частота» добиваются того, чтобы изображение остановилось. Зарисовывают наблюдаемую форму кривой переменного напряжения тока сети;

в) пробные контакты осциллографа переставляют в гнезда 3-й и 4-й схемы. Замыкают выключатель $П_2$. Зари-

* Описание осциллографа дано в работе № 49, стр. 259.

совпадают наблюдаемую форму кривой напряжения при двухполупериодном выпрямлении;

г) размыкают ключ Π_2 . Зарисовывают наблюдаемую форму кривой напряжения при однополупериодном выпрямлении.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Введение. Магнитное поле — особая форма материи. Магнитное поле возникает только вокруг движущихся электрических зарядов, например вокруг проводника с током. Оно обнаруживается по его силовому действию на проводник с током или на постоянные магниты, внесенные в поле. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \mathbf{B} . *Магнитная индукция \mathbf{B} — векторная физическая величина,*

численно равная силе $d\mathbf{F}$, действующей со стороны поля на единицу длины проводника $d\mathbf{l}$, по которому течет электрический ток I единичной силы и который расположен перпендикулярно к направлению магнитного поля:

$$B = \frac{1}{I} \frac{dF}{dl}.$$

Это выражение следует из закона Ампера $d\mathbf{F} = I [d\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}]$; $dF = IB \cdot dl \times \sin(\widehat{dl, B})$.

Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля, так же как напряженность \mathbf{E} электрического поля. Векторы \mathbf{B} и \mathbf{E} определяют силовые действия полей и зависят от свойств среды, в которой создаются поля. Векторы \mathbf{B} , $d\mathbf{F}$ и $d\mathbf{l}$ направлены (рис. 130) по правилу левой руки. Направление линий магнитной индукции магнитного поля тока определяется правилом буравчика. Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводник с током.

Наряду с магнитной индукцией вводится еще одна векторная характеристика магнитного поля — напряженность — \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0},$$

где μ_0 — магнитная постоянная, μ — относительная магнитная проницаемость среды, показывающая, во сколько раз сила, действующая на движущиеся заряды и проводники с током в данной среде, больше чем в вакууме, $\mu\mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость данной среды.

Напряженность магнитного поля \mathbf{H} не зависит от свойства среды; \mathbf{H} — аналог вектору \mathbf{D} в электростатике.

Сила Лоренца. Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные электрические заряды, движущиеся в поле. Сила F_L , с которой действует однородное магнитное поле \mathbf{B} на движущийся заряд, называется силой Лоренца:

$$F_L = q [\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Модуль лоренцевой силы равен:

$$F_L = qv_e B \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где v_e — скорость заряженной частицы, α — угол между \mathbf{v}_e и \mathbf{B} .

Если заряд движется вдоль сил магнитного поля, т. е. $\mathbf{v}_e \parallel \mathbf{B}$, то он не испытывает действия силы Лоренца. Если же заряд движется перпендикулярно силовым линиям $\mathbf{v}_e \perp \mathbf{B}$, то действие силы Лоренца наибольшее. Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к скорости движения заряженной частицы, поэтому она работы над частицей не производит. Сила Лоренца в этом случае отклоняет заряженную частицу по дуге окружности (рис. 131) и играет роль центростремительной силы. Направление линии действия силы Лоренца можно найти по правилу левой руки. На рисунке вектор магнитной индукции направлен за чертеж; положительный заряд отклоняется вверх, отрицательный — вниз.

Если же направление движения заряженной частицы с направлением поля образует любой угол α , то траектория движения представляет собой спираль, ось которой совпадает с направлением \mathbf{B} (рис. 132).

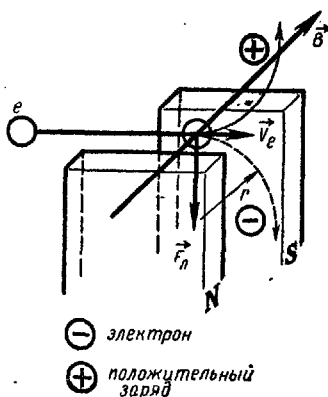


Рис. 131

Сила Лоренца имеет большое применение в устройстве электронного микроскопа, масс-спектрографа и ускорителей заряженных частиц.

Э ф ф е к т Х о л л а. С помощью силы Лоренца можно объяснить явление эффекта Холла. *Эффектом Холла называется возникновение разности потенциалов и поперечного электрического поля в металле или полупроводнике, по которым проходит ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока.* На рис. 133, а электрон A движется в металле или электронном полупроводнике со скоростью v против сил поля (I) . Магнитное

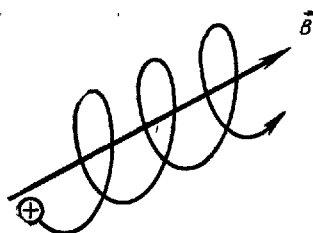


Рис. 132

поле B отклоняет электроны с силой Лоренца F_L в определенную сторону (к сечению $BCDE$). На противоположной стороне $MNOP$ скапливаются положительные заряды, а между плоскостями $BCDE$ и $MNOP$ создается разность потенциалов. Созданное поперечное электрическое поле

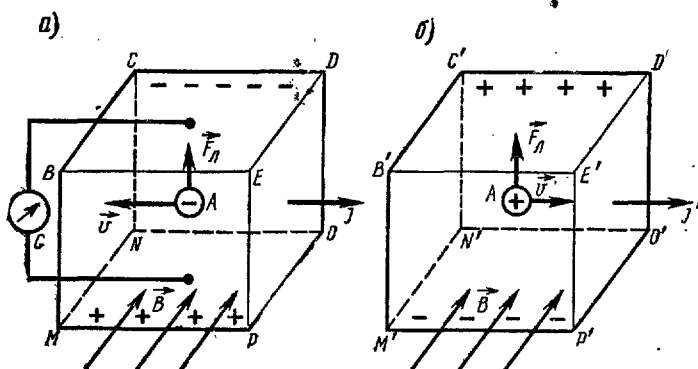


Рис. 133

препятствует отклонению электронов магнитным полем. В дырочном полупроводнике знаки зарядов на поверхностях (рис. 133, б) $B'C'D'E'$ и $M'N'O'P'$ противоположные (сила Лоренца действует на дырки), показанные на рис. 133, б. Если плоскости $MNOP$ и $BCDE$ соединить через электроды чувствительным гальванометром (как пока-

зано на рисунке), то в отсутствии магнитного поля гальванометр G будет стоять на нуле ($\Delta U = 0^*$). Если же образец поместить в магнитное поле (как на рисунке), то гальванометр покажет наличие между поверхностями $BCDE$ и $MNOP$ разности потенциалов ($\Delta U \neq 0$). Направление холловской разности потенциалов позволяет установить знак носителей тока в веществе.

Отклонение электронов (или «дырок») в магнитном поле будет происходить до тех пор, пока сила поперечного электрического поля, возникающего вследствие появления холловской разности потенциалов, не уравнивает силу Лоренца, заставляющую отклоняться электрические заряды от первоначального движения.

Работа № 49

Знакомство с работой электронного осциллографа

Ввиду используемого в установке высокого напряжения при выполнении работы строго соблюдать указанные в описании предосторожности.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, вольтметр переменного тока, потенциометр, магазин сопротивлений, источник тока, измеряемое сопротивление.

Устройство и работа электронного осциллографа. Отклонение пучка электронов электрическим или магнитным полем используется в электронно-лучевых трубках, которые применяются в осциллографах, приборах, позволяющих наблюдать и фотографировать быстропроходящие процессы длительностью 10^{-6} — 10^{-7} сек.

Электронно-лучевой осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки, генератора развертки, двух усилителей и блока питания.

Для ознакомления с работой осциллографа разберем назначение каждой его части.

1. **Электронно-лучевая трубка.** Важнейшим элементом катодного осциллографа является электронно-лучевая трубка, которая внешне представляет собой стеклянную колбу специальной формы с высоким вакуумом.

* ΔU называется холловской разностью потенциалов.

Электронно-лучевые трубки могут быть двух типов: электростатические и магнитные. В трубках первого типа фокусировка и отклонение луча осуществляются электрическим полем, в трубках второго типа — магнитным.

В данной работе применяется осциллограф с электростатической электронно-лучевой трубкой.

Электронно-лучевая трубка (рис. 134) состоит из электронной пушки — электронного прожектора (на рисунке выделена пунктиром), дающего пучок электронов, двух пар отклоняющих пластин Π_x и Π_y , расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, и флуоресцирующего экрана $\Phi Э$.

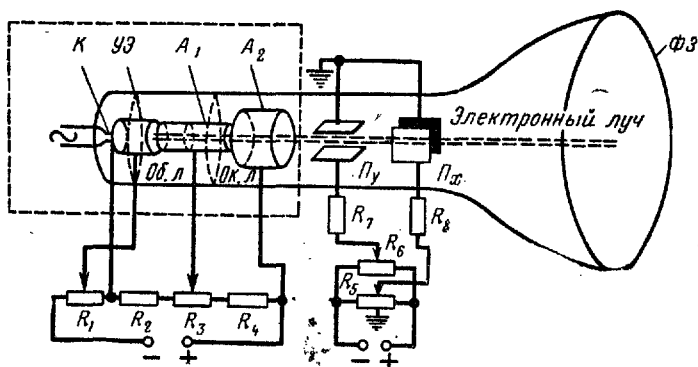


Рис. 134

Электронная пушка позволяет получить узкий сфокусированный поток электронов. Она состоит из накаливаемого катода K , управляющего электрода $УЭ$ и двух анодов A_1 и A_2 (A_1 — фокусирующий анод, A_2 — ускоряющий анод).

В электронно-лучевых трубках применяется накаливаемый катод с оксидным покрытием для увеличения термоэлектронной эмиссии. Для излучения электронов только в одном направлении катод делается в виде маленького металлического цилиндра. Металлический цилиндр надет на тонкую фарфоровую трубочку, внутри которой помещается нить подогрева, свернутая в двойную спираль.

Благодаря этому магнитное поле, создаваемое одной половиной нити, компенсируется полем второй половины и не влияет на электронный поток. Катод электронно-лучевой

трубки окружен металлическим цилиндром (сеткой) с отверстием (диафрагмой) в торце, через которое могут проходить электроны. Этот цилиндр называется управляющим электродом. Управляющий электрод имеет отрицательный потенциал относительно катода.

Действие управляющего электрода на электроны состоит в следующем. Электрон, вылетая из катода в направлении к точке *A* или *B* (рис. 135), попадает в электростатическое поле. На рис. 135 показано направление сил *F*, действующих на электрон со стороны электрического поля управляющего электрода. Вследствие отрицательного заряда

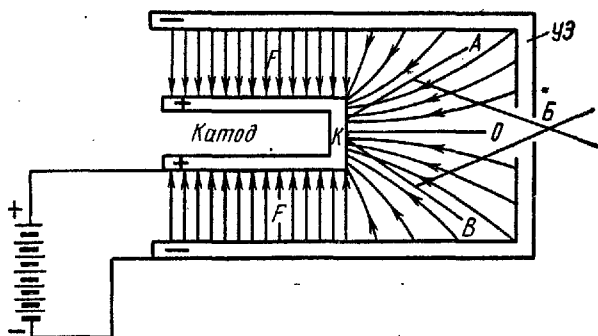


Рис. 135

электрона эти силы направлены противоположно вектору напряженности электрического поля управляющего электрода, т. е. от минуса к плюсу.

Под действием сил электростатического поля электрон отклонится от первоначального направления своего движения к центру торца управляющего электрода (точка *B*).

Аналогичное явление произойдет с электроном, вылетающим в направлении к точке *B*. В точке *B* пути всех электронов пересекутся и, следовательно, все электроны будут собраны в узкий пучок.

Если увеличить отрицательный потенциал управляющего электрода, то электростатическое поле будет сильнее отклонять электроны, и часть их уже не сможет пройти через отверстие *O* управляющего электрода.

При удалении от точки *B* электронный луч снова расходится, так как напряженность поля внутри первого анода близка к нулю.

Для получения узкого луча после точки *Б* требуется дополнительная фокусировка. Эта фокусировка осуществляется с помощью двух цилиндрических анодов A_1 и A_2 . Оба анода имеют положительный потенциал относительно катода. Второй анод имеет более высокий положительный потенциал по сравнению с первым, поэтому между анодами создается некоторое ускоряющее электростатическое поле, которое ускоряет электроны и концентрирует их в узкий луч, иными словами, ускоряющее поле препятствует рассеянию электронов.

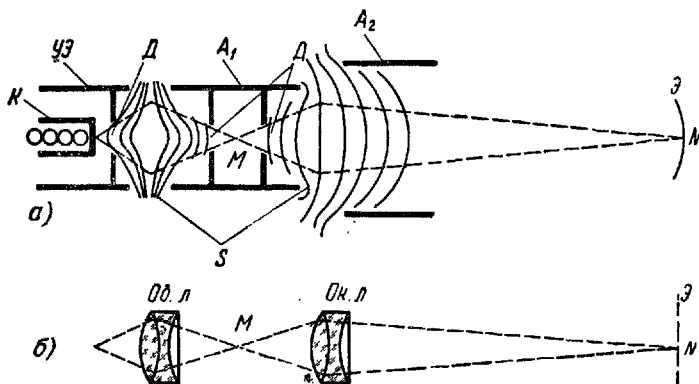


Рис. 136

Управление электронным лучом производится при помощи двух электронных линз — объективной и окулярной. Поле между катодом, управляющим электродом и первым анодом образует так называемую объективную электронную линзу, а поле между первым и вторым анодами — окулярную электронную линзу. В области между первым и вторым анодами поле снова искривляет траектории электронов, приближая их к оси трубки (действие окулярной линзы). Траектории электронов после прохождения поля между первым и вторым анодами более пологи (вследствие большой скорости электронов) и фокусируются на экране ФЭ. Схема действия электронного прожектора показана на рис. 136, а, на рис. 136, б — его оптическая аналогия. На рисунке: *Д* — диафрагма, *S* — силовые линии (эквипотенциальные поверхности), *Об. л.* — объективная линза, *Ок. л.* — окулярная линза; все остальные обозначения такие же, как и на рис. 134. По выходе из второго анода сфоку-

сированный электронный луч проходит две пары отклоняющих пластин (конденсаторов) P_y и P_x , расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Горизонтально расположенные пластины P_y служат для отклонения луча в вертикальном направлении и называются вертикально отклоняющими пластинами. Вторая пара пластин P_x служит для отклонения луча в горизонтальном направлении и называется горизонтально отклоняющими пластинами.

При подведении к двум параллельным пластинам (конденсаторам) постоянного напряжения между пластинами возникает однородное электростатическое поле.

Электронный луч, проходя через электростатическое поле между двумя конденсаторами, отклоняется от своего первоначального пути. Он как бы «притягивается» к пластине с большим потенциалом. Это свойство электростатического поля позволяет перемещать электронный луч по экрану под действием напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки. Величина отклонения электронного луча зависит от скорости движения электронов и от величины напряжения, приложенного к пластинам.

В каждой данной трубке скорость потока электронов и расстояние между пластинами и экраном постоянны, поэтому величина отклонения пятна на экране будет зависеть только от напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам. Если одновременно подводятся постоянные напряжения к соответствующим отклоняющим пластинам, то пятно окажется в вершине прямоугольника, построенного на перемещениях пятна в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Если же одновременно к обоим конденсаторам P_y и P_x подвести переменное синусоидальное напряжение разных частот, то на экране будут получаться так называемые фигуры Лиссажу.

Таким образом, одновременное действие обеих пар отклоняющих пластин на электронный луч позволяет наблюдать на экране изменение исследуемого напряжения во времени. Пройдя отклоняющие пластины, электронный луч попадает на экран. Экран электронно-лучевой трубки представляет собой слой флуоресцирующего вещества, нанесенного на внутреннюю сторону трубки.

При ударе об экран энергия электрона частично расходуется на выбивание электронов из поверхности, на которую он падает, частично на разогрев этой поверхности,

а частично превращается в световую энергию. Электрон, попадая на поверхность, покрытую флуоресцирующим слоем, приводит в возбужденное состояние атомы и молекулы этого слоя.

Возвращаясь в нормальное состояние, атомы и молекулы испускают свет. Это явление носит название *люминесценции*. Яркость свечения пятна на экране электронно-лучевой трубки зависит от скорости и числа электронов, падающих на элемент площади экрана за некоторый промежуток времени. Регулировать яркость пятна на экране можно либо изменяя количество электронов в электронном пучке, либо меняя скорость электронов.

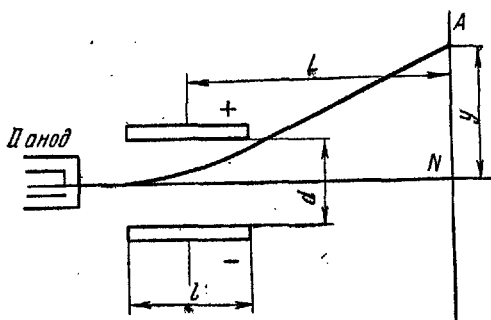


Рис. 137

Если предположить, что отклоняющие пластины каждого конденсатора параллельны друг другу и разность потенциалов между ними равна нулю, то электроны луча, обладающие по выходе из второго анода скоростью v , будут двигаться вдоль оси трубки и попадут на экран в точку N (рис. 137). При подведении к отклоняющим пластинам некоторой постоянной разности потенциалов электронный луч уже не падает в точку N экрана, а будет смещен в некоторую точку A экрана, отстоящую от начального положения светящегося пятна на расстоянии y .

Теоретические расчеты показывают, что отклонение пятна на экране может быть определено по формуле

$$y = \frac{1}{2} \frac{U_y l L}{U_a d}, \quad (3)$$

где U_y — напряжение, подведенное к отклоняющим пластинам, l — длина пластины в направлении оси трубки,

L — расстояние от центра отклоняющих пластин до экрана,
 U_a — напряжение на втором аноде относительно катода,
 d — расстояние между пластинами,

Размеры l , L , d должны быть выражены в одинаковых единицах; в этих же единицах измеряется отклонение y .

Физический смысл приведенной формулы ясен. Действительно, чем больше длина пластины l , тем больше та часть пути электронного луча, на протяжении которой он подвергается отклоняющему действию поля, и тем больше отклонение пятна на экране.

Чем меньше расстояние d между пластинами конденсатора, тем при прочих равных условиях больше напряженность поля $\left(E = \frac{U_y}{d}\right)$ между пластинами и тем больше отклоняющее действие оказывает поле на электронный луч.

Как видно из формулы (3) и рис. 137, чем дальше отстоит экран от отклоняющих пластин, тем при прочих равных условиях отклонение y будет больше. Однако значительно увеличивать расстояние L нельзя, так как это затрудняет фокусировку луча и ухудшает резкость пятна на экране. Кроме того, значительное увеличение L делает прибор неудобным с эксплуатационной точки зрения (возрастает длина трубки).

Из формулы (3) следует также, что чем больше анодное напряжение U_a , тем меньше отклонение пятна на экране. Объясняется это тем, что с повышением напряжения возрастает скорость электронов; при этом уменьшается продолжительность воздействия на них отклоняющего электрического поля и, следовательно, слабее изменяется их траектория.

Вместе с тем возрастание скорости электронов повышает яркость свечения пятна. Таким образом, повышение напряжения U_a с целью увеличения яркости изображения на экране трубки приводит к уменьшению размеров изображения. Наоборот, при уменьшении напряжения U_a размеры изображения увеличиваются, однако падает его яркость и ухудшается фокусировка.

2. Генератор развертки. Вторым важным элементом электронно-лучевого осциллографа является генератор развертки. Генератор развертки представляет собой радиотехническое устройство, позволяющее получить напряжение развертки. Генератор развертки позволяет перемещать электронный луч вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью.

Если исследуемое напряжение имеет периодический характер, то для наблюдения на экране формы кривой этого напряжения его подводят к пластинам P_y , а на пластины P_x подают периодическое напряжение, которое называется напряжением развертки. Напряжение развертки, используемое в осциллографах, изменяется во времени либо по линейному, либо по синусоидальному закону.

Если частота исследуемого напряжения равна f , а частота напряжения развертки $f : n$, то на экране мы получим n периодов исследуемого напряжения. Если деление f на n производится без остатка, т. е. частоты исследуемого напряжения и напряжения развертки кратны друг другу, то на экране мы получим неподвижное изображение. В противном случае изображение на экране осциллографа будет медленно передвигаться.

Перемещение изображения по экрану нежелательно, так как при этом затрудняется наблюдение за изображением. Для устранения этого недостатка применяется синхронизация частоты генератора с частотой какого-либо постороннего стабильного источника напряжения. Благодаря синхронизации генератор развертки вынужден будет работать точно с такой же частотой, как и исследуемый сигнал, что вызовет устойчивость изображения на экране. Синхронизировать генератор развертки можно либо частотой исследуемого напряжения, либо частотой переменного напряжения, взятого от сети, либо частотой какого-нибудь внешнего напряжения. Для этой цели осциллограф снабжен переключателем рода синхронизации (переключатель «Синхронизация») и зажимами для подключения внешнего источника напряжения синхронизирующей частоты («Внешн. синхр»).

3. Б л о к п и т а н и я. Блок питания включает в себя ряд устройств, которые обеспечивают питание энергией электронно-лучевую трубку, генератор развертки, вертикальный и горизонтальный усилители и другие части прибора.

П а н е л ь у п р а в л е н и я э л е к т р о н н о г о о с ц и л л о г р а ф а ЭО-6М. Электронный осциллограф ЭО-6М представляет собой прибор серийного производства. Он смонтирован в отдельном металлическом футляре, в котором размещены все части прибора. На рис. 138 изображена передняя панель осциллографа ЭО-6М.

1. Яркость свечения пятна на экране определяется количеством электронов, ударяющихся об экран в единицу

времени. Меняя отрицательный потенциал управляющего электрода, можно регулировать яркость пятна на экране. Это достигается при помощи потенциометра R_1 , ручка которого снабжена надписью «Яркость» на передней панели осциллографа (рис. 138).

2. Фокусировка электронов в одну точку на экране осуществляется изменением разности потенциалов между первым и вторым анодами. Фокусировка луча производится при помощи потенциометра R_3 , ручка которого имеет надпись «Фокус» на передней панели осциллографа.

3. Смещение изображения в вертикальном направлении производится при помощи потенциометра R_6 , имеющего надпись «Ось Y».

4. Смещение изображения по горизонтали производится при помощи потенциометра R_5 , имеющего надпись «Ось X».

Ручки «Ось X» и «Ось Y» устанавливают изображение в нужном месте на экране трубки.

5. Переключатель «Ослабление» дает возможность ослабить исследуемый сигнал в отношениях 1 : 10 и 1 : 100.

6. Ручкой с указателем «Вертикальное усиление» можно плавно регулировать усиление вертикального смещения от нуля до максимальной величины.

При малых амплитудах исследуемого напряжения величина отклонения электронного луча мала, что неудобно для отсчета. В этих случаях исследуемое напряжение подается на «вход» вертикального усилителя, а затем после усиления на вертикально отклоняющие пластины P_y . Цифры, стоящие

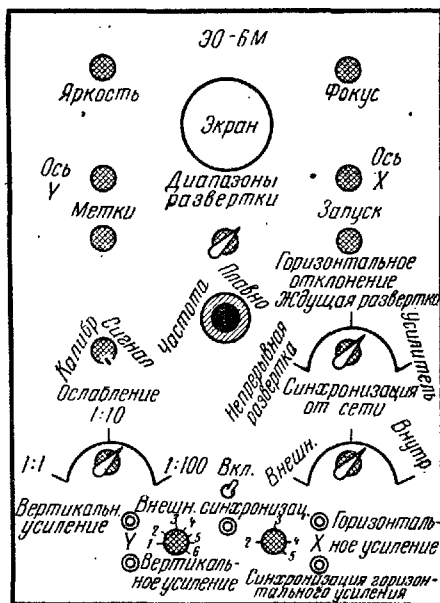


Рис. 138

у тумблера «Вертикальное усиление», показывают, во сколько раз можно усилить исследуемое напряжение.

7. Ручка с указателем «Горизонтальное усиление» служит для усиления напряжения, подаваемого на горизонтально отклоняющие пластины P_x .

8. К органам управления генератором развертки относятся переключатели: «Горизонтальное отклонение», «Диапазоны развертки» и ручка с указателем «Частота плавно».

Переключатель «Горизонтальное отклонение» дает возможность выбрать род развертки. В данной работе выбирается непрерывная развертка.

Переключатель «Диапазоны развертки» дает возможность выбрать нужный диапазон частот (в данном случае для непрерывной развертки).

Ручка с указателем «Частота плавно» дает возможность в пределах выбранного диапазона менять собственную частоту непрерывных пилообразных колебаний генератора развертки.

9. К органам управления синхронизацией относится переключатель, снабженный на передней панели надписью «Синхронизация», и ручка, снабженная надписью «Синхронизация горизонтального усиления».

При помощи переключателя «Синхронизация» выбирается род синхронизации: внутренняя (исследуемым сигналом), внешняя (внешним сигналом, синхронным с исследуемым) или от сети (частотой питающей сети).

Остальные ручки передней панели осциллографа ЭО-6М в данной работе не используются.

Измерения и обработка результатов измерений. Подготовка осциллографа к включению в сеть. Перед включением осциллографа в сеть переменного тока необходимо:

1. Проверить соответствие переключателя напряжения осциллографа с имеющимся напряжением в сети.

2. Поставить выключатель сети в положение «Выкл.»; ручки с указателями «Фокус», «Ось X» и «Ось Y» перевести в среднее положение; ручку с указателем «Яркость» — в крайнее правое положение.

3. Установить переключатель «Синхронизация» в положение «Внутр.».

4. Установить переключатель «Горизонтальное отклонение» в положение «Усилитель».

Подготовка осциллографа к работе. Выполнив указанные операции, осциллограф можно включить в сеть; для этого переключатель сети следует перевести в положение «Вкл.», при этом загорится сигнальная лампочка. Через 1—2 мин, когда прогреются лампы прибора, на экране появится зеленая точка.

1. Вращая ручки «Ось X» и «Ось Y», установить светящуюся точку точно в центре экрана.

2. Поворачивая регулятор «Яркость», уменьшить яркость светящейся точки.

3. Поворачивая регулятор «Фокус», добиться четкого изображения светящейся точки.

Примечание. Яркую неподвижную точку не рекомендуется держать на экране долго, так как попадание электронов в одно и то же место экрана вызывает выгорание его.

1. **Определение максимальной чувствительности осциллографа.** Отклонение луча в миллиметрах от оси трубки, получающееся при изменении напряжения на отклоняющих пластинах на 1 в, называется чувствительностью трубки. Эта величина является одним из параметров трубки. Для определения чувствительности осциллографа необходимо собрать схему, указанную на рис. 139.

Включают потенциометр P в сеть переменного тока 110—127 в и с движка потенциометра подают напряжение на отклоняющие пластины P_y через вход вертикального усилителя.

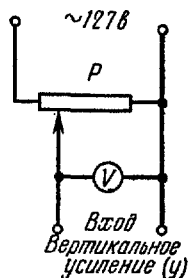


Рис. 139

Подаваемое переменное напряжение должно контролироваться вольтметром переменного тока. При выключенном генераторе развертки на экране появится вертикальная линия. По шкале, укрепленной на экране осциллографа, измеряют длину светящейся линии. Так как обычно вольтметры переменного тока измеряют эффективные значения напряжения, а осциллограф измеряет амплитудные значения тех же величин, причем длина линии пропорциональна удвоенному значению амплитуды, то чувствительность осциллографа

$$h = \frac{l}{2U_{\max}} = \frac{l}{2\sqrt{2}U_{\text{эфф}}} = \frac{l}{2,8U_{\text{эфф}}} \quad (\text{мм/в}), \quad (4)$$

где l — длина линии на экране (в мм), $U_{эфф}$ — напряжение на вольтметре.

Измерения повторить 5—7 раз при различных напряжениях на пластинах Y . По формуле (4) рассчитать чувствительность электронно-лучевой трубки h . Результаты измерений занести в таблицу.

Напряжение, поданное на пластины	Количество клеток, на которое отклонилась линия на экране	Чувствительность трубки	Средняя чувствительность трубки
$U, в$	$l, мм$	$h, мм/в$	$\bar{h}, мм/в$

По данным измерения строят градуировочную таблицу или график. На графике по горизонтали откладывается 0,5 длины линии на экране осциллографа в миллиметрах, а по вертикали — амплитудные значения напряжений, приложенных к отклоняющим пластинам Y .

Если на вертикально отклоняющие пластины подать неизвестное переменное напряжение, то по длине вертикальной линии на экране, согласно графику, можно определить величину этого напряжения. Таким образом, осциллограф можно использовать как вольтметр, измеряющий амплитудные (максимальные) значения напряжений.

2. Наблюдение на экране осциллографа синусоидально меняющегося напряжения. 1. Ручки ослабления поставить в положение (1 : 1).

2. Переключатель «Синхронизация» установить в положение «Внутр.».

3. На вертикально отклоняющие пластины через клеммы вертикального усилителя подать переменное синусоидальное напряжение (коэффициент усиления 1). Схема включения указана на рис. 139.

4. Тумблер «Метки» обязательно выключить.

5. Поставить переключатель «Горизонтальное отклонение» в положение «Непрерывная развертка».

6. Переключатель «Диапазоны развертки» поставить в положение 20—200 гц.

7. Ручкой «Частота плавно» добиться стабильности изображения, а ручкой «Синхронизация горизонтального усиления» устранить проскальзывание изображения, т. е. полностью сделать его неподвижным.

8. Меняя напряжение, подаваемое на вертикально отклоняющие пластины, проследить за изменением кривой на экране.

9. По формуле (4) чувствительности осциллографа вычислить подводимое напряжение

$$U_{эфф} = \frac{l}{2,8h}.$$

3. Измерение сопротивлений. 1. Собирают схему (рис. 140). На схеме: \mathcal{E} — источник постоянного тока, R_0 — магазин сопротивлений, $R_{ц}$ — измеряемое сопротивление, K — ключ.

2. К пластинам осциллографа Π_y подключают измеряемое сопротивление $R_{ц}$ (ставят ключ K на сопротивление $R_{ц}$) и на экране осциллографа измеряют отклонение луча l по вертикали (так же, как это делали в упражнении № 1). Перключая ключ на R_0 , подбирают в магазине такое значение сопротивления R_0 , при котором на экране осциллографа отклонение луча для R_0 будет такое же, как для $R_{ц}$. В этом случае $R_{ц} = R_0$. Зная чувствительность осциллографа h , находят значение напряжения

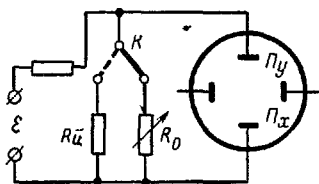


Рис. 140

$$U = \frac{l}{2h}$$

и силу тока в цепи

$$I = \frac{U}{R_0}.$$

Если измерения проводить на переменном токе, то R_0 должно быть безреактивным, т. е. $R_L = R_C = 0$.

4. Наблюдение на экране графика звуковых колебаний. 1. Разобрать схему предыдущего упражнения.

2. Включить осциллограф.

3. Подать на «Вход Y» напряжение от звукового генератора. Получить на экране график звуковых колебаний.

5. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Наблюдение фигур Лиссажу. Определение частоты исследуемого сигнала. 1. Включить генератор развертки осциллографа.

2. Подать на «Вход X» осциллографа переменное напряжение с ЛАТРа ($v_x = 50$ гц).

3. Вращая ручку «Ось Y», добиться вертикальной полосы на экране.

4. Подать на «Вход Y» исследуемое напряжение со звукового генератора.

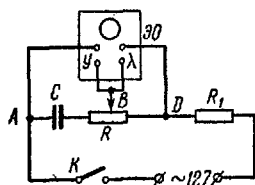
5. Вращая регулятор частоты звукового генератора, добиться появления на экране устойчивой фигуры Лиссажу (см. стр. 110).

6. Изменяя частоту подаваемого напряжения со звукового генератора, добиться новой устойчивой фигуры Лиссажу.

7. Зарисовать устойчивые фигуры Лиссажу для соотношения частот 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4.

8. Определить частоту исследуемого сигнала. Частота определяется следующим образом. За каждый период колебаний напряжения, поданного на y ,

а)



б)

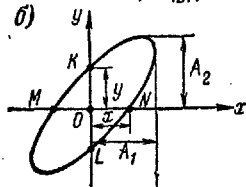


Рис. 141

луч дважды пересекает ось x (для x ось y), следовательно, отношение числа пересечений фигуры Лиссажу с осью x (n_x) и осью y (n_y) равно отношению частот, поданных на X и Y , т. е.

$$\frac{v_y}{v_x} = \frac{n_x}{n_y} \text{ и } v_y = v_x \frac{n_x}{n_y}.$$

Оси x и y мысленно выбирают так, чтобы они не проходили через точки пересечения самих фигур.

6. Измерение сдвига фаз. В данном упражнении определяется сдвиг фаз между напряжениями на участке цепи AB (U_y) и на участке BD (U_x). Напряжения

U_x и U_y имеют одинаковую частоту (одинаковые периоды), но разные амплитуды и фазы (так как на участке AB включена емкость C) (рис. 141, а). Сдвиг фаз между двумя в данном случае колебаниями луча по оси x и y можно определить по формуле сложения двух гармонических колебаний (см. стр. 113). В общем случае имеем уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cdot \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ — разность фаз.

Для точек пересечения эллипса с осями координат это уравнение имеет следующий вид:

для $x = 0$

$$\frac{y}{A_2} = \sin \Delta\varphi; \quad (5)$$

для $y = 0$

$$\frac{x}{A_1} = \sin \Delta\varphi. \quad (6)$$

Таким образом, измеряя y и A_2 или x и A_1 (рис. 141, б), по формуле (5) или (6) определяют $\Delta\varphi$.

Работа № 50

Определение удельного заряда электрона при помощи электронно-лучевой трубки

Приборы и принадлежности: электронно-лучевая трубка 8ЛЮ29И, вольтметр постоянного тока на 600 в, вольтметр постоянного тока на 300 в, ламповый выпрямитель на 350 в, реостат на 500 ом, реостат на 30 ом, аккумулятор щелочной из двух банок на 2,4 в, компас, угломер или транспортир, масштабная линейка, два ключа.

Теория метода и описание установки. При помощи электронно-лучевой трубки получают узкий направленный пучок электронов, отклонение которого исследуют в магнитном поле Земли. Описание электронно-лучевой трубки (рис. 142) дано в работе № 49. Все обозначения на рис. 142 и 134 одинаковые.

Электроны, вылетающие с катода, обладают запасом кинетической энергии, которая обусловлена напряжением, приложенным между катодом K и вторым анодом A_2 (рис. 142), т. е.

$$\frac{mv_x^2}{2} = eU, \quad (7)$$

где m и e — масса и заряд вылетающего с катода электрона, v_x — скорость электрона, U — напряжение между катодом и вторым анодом (потенциал второго анода).

Из уравнения (7) скорость электронов

$$v_x = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (8)$$

В данной работе движение ускоренного пучка электронов наблюдается в известном магнитном поле (поле Земли), перпендикулярном направлению движения электронов. На рис. 143 магнитное поле Земли B_3 перпендикулярно плоскости чертежа (на чертеже B_3 направлено за чертеж, от нас и обозначено крестом). Электроны вылетают из диафрагмы D второго анода A_2 со скоростью v_x по оси x на экран \mathcal{E} . На электроны будет действовать сила Лоренца F_L , лежащая в плоскости чертежа:

$$F_L = e[v_x, B_3], \quad (9)$$

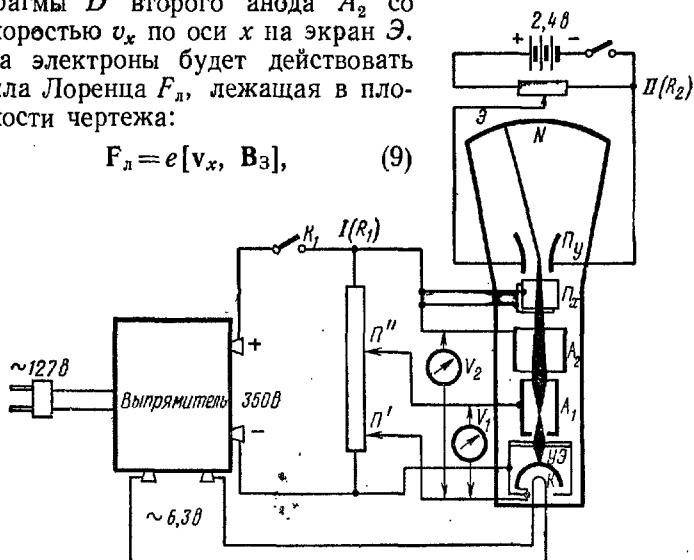


Рис. 142

где v_x — вектор скорости, B_3 — индукция магнитного поля Земли, e — заряд электрона.

Сила F_L перпендикулярна скорости движения электронов и направлению магнитного поля (находится по правилу левой руки с учетом знака электрона) и не меняется по величине. Под действием этой силы электрон будет двигаться по окружности радиуса R , лежащей в плоскости чертежа. Сила F_L — центростремительная, поэтому

$$\frac{mv_x^2}{R} = ev_x B_3 \cdot \sin \alpha, \quad (10)$$

отсюда

$$\frac{e}{m} = \frac{v_x}{RB_3 \cdot \sin \alpha}, \quad (11)$$

где α — угол между скоростью электрона и вектором индукции магнитного поля.

Под действием магнитного поля B_3 электронный пучок отклонится от оси x на отрезок y . Найдем величину отклонения электронов y . Для этого подсчитаем R из треугольника ACO :

$$R^2 = (R - y)^2 + L^2.$$

Отсюда

$$R = \frac{y^2 + L^2}{2y}. \quad (12)$$

Подставим R из формулы (12) и v_x из формулы (8) в выражение для удельного заряда (11):

$$\frac{e}{m} = \sqrt{\frac{e}{m} \frac{2U}{B_3 (y^2 + L^2) \sin \alpha}},$$

или

$$\frac{e}{m} = \frac{8Uy^2}{B_3^2 (y^2 + L^2)^2 \sin^2 \alpha}.$$

Так как величина $y^2 \ll L$, то ею в знаменателе можно пренебречь и тогда

$$\frac{e}{m} = \frac{8y^2 U}{B_3^2 L^4 \sin^2 \alpha}. \quad (13)$$

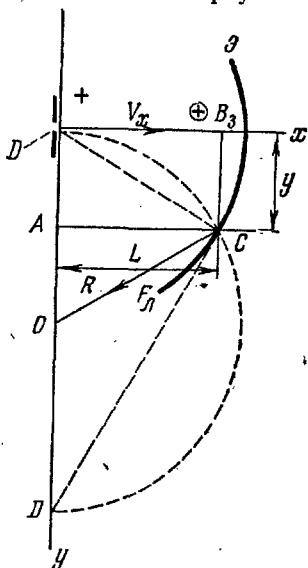


Рис. 143

Величины, входящие в формулу (13), можно легко измерить, так как: y — отклонение луча на экране \mathcal{E} (измеряется непосредственно масштабной линейкой), U — напряжение, которое подается на второй анод A_2 , B_3 — индукция магнитного поля Земли, L — расстояние от второго анода A_2 (рис. 143) до экрана \mathcal{E} , α — угол между электронным пучком Π_x и направлением вектора индукции магнитного поля Земли.

Измерение и обработка результатов измерений. 1. Разбираются в схеме (рис. 142). На схеме питания анодов $A_1 - A_2$ и управляющего цилиндра $\mathcal{U}\mathcal{E}$ берутся от лампового выпрямителя на 350 в с помощью потенциометра I ($R_1 = 5000 \text{ ом}$). Вольтметром V_1 (на 300 в) измеряется напряжение между катодом K и первым анодом A_1 . Вольтметром V_2 (на 600 в) измеряется напряжение между катодом K и вторым анодом A_2 . Горизонтально отклоняющие

пластины соединены вместе и подключены ко второму аноду A_2 . Нить накала K питается от выпрямителя. Электронный пучок на экране трубки \mathcal{E} образует пятнышко небольших размеров зеленого цвета.

2. Замыкая ключ K_1 , включают выпрямитель и ждут 1—2 мин, чтобы прогрелись лампы.

3. Устанавливают ползунок Π' потенциометра I (R_1) в такое положение, при котором на экране зеленое пятнышко будет средней яркости; ползунком Π'' фокусируют его в точку.

4. Записывают показания напряжения по вольтметру V_1 и V_2 .

5. Устанавливают электропучковую трубку A по компасу в плоскости магнитного меридиана, поворачивая стойку C (рис. 144) так, чтобы зеленое пятнышко очутилось в центре экрана. Стойка C укреплена на подставке E так, что ее можно вращать относительно оси z и закреплять винтом B .

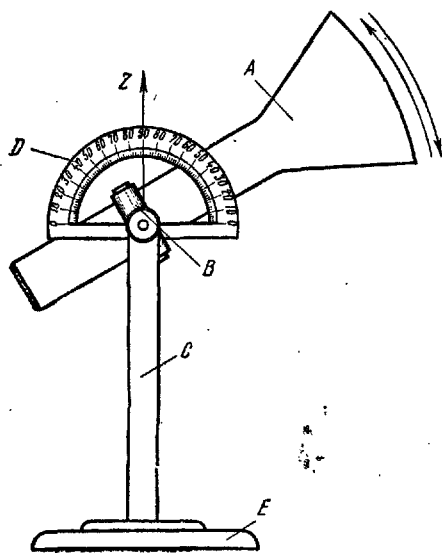


Рис. 144

6. Замыкают ключ потенциометра Π ($R_2 = 30 \text{ ом}$) и подают напряжение на вертикальную пару отклоняющих пластин. Перемещая движок потенциометра Π (R_2), добиваются лучшей фокусировки светящегося пятнышка N в центре экрана \mathcal{E} (см. рис. 142).

7. Отмечают положение трубки A (рис. 144) на лимбе угломера D (или на транспортире) и берут отсчет угла N_1 .

8. Поворачивают электропучковую трубку в вертикальной плоскости на угол $40\text{—}45^\circ$ и измеряют угол N_2 и смещение y пятнышка на экране \mathcal{E} .

9. Отсчитывают угол α поворота трубки A , равный разности $N_2 - N_1$ (этот угол соответствует смещению электронного пучка на величину y).

10. По формуле (13) вычисляют величину удельного заряда электрона, учитывая, что для Москвы $B_3 = \frac{B_0}{\cos \beta}$, где $B_0 = 0,18 \cdot 10^{-4}$ вб/м² в системе СИ (горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли), а $\beta = 70^\circ$ — угол магнитного склонения; L — расстояние от второго анода до экрана — написано на подставке прибора E .

11. Повторяют опыт несколько раз для различных углов. Все результаты измерений и вычислений заносят в таблицу.

$$V_1 =$$

№ опыта	$U = V_2$	$\alpha = N_2 - N_1$	y	$\frac{e}{m}$
Среднее значение			X	

Работа № 51

Измерение постоянной Холла и концентрации носителей тока в германии

Приборы и принадлежности: германиевый полупроводник с чисто электронной проводимостью (пластинка $0,9 \times 0,4 \times 0,03$ см) с припаянными четырьмя электродами из тонкой медной проволоки, источник постоянного тока, два реостата, миллиамперметр, три ключа, потенциометр, электромагнит, миллиамперметр с шунтом, переключатели.

Теория метода и описание установки. В качестве образца для исследования эффекта Холла в данной работе используется полупроводник германий (Γ) (рис. 145) с чисто электронной проводимостью.

К пластинке припаяны четыре электрода из тонкой медной проволоки: два — для пропускания продольного тока I (B_1, B_2) и два — для измерения поперечной разности потенциалов U (A_1, A_2). Германиевая пластинка вмонтирована между двумя текстолитовыми пластинами, на которых имеются четыре клеммы, соединенные с электродами.

Текстолитовые пластины подвешены в зазоре между полюсами электромагнита ЭЭ (см. рис. 150).

На электроны действует с одной стороны сила Лоренца

$$F_{\text{л}} = evB,$$

где e — заряд электрона (дырки), v — скорость перемещения электрического заряда, B — индукция магнитного поля. С другой — сила поперечного электрического поля, возникающего в проводнике,

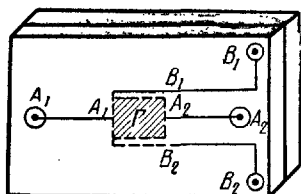


Рис. 145

$$F' = eE = e \frac{U}{b}, \quad (15)$$

где U — холловская разность потенциалов, возникающая между электродами A_1 и A_2 , b — расстояние между электродами A_1 и A_2 . При равновесии этих сил

$$evB = e \frac{U}{b},$$

отсюда

$$U = bvB. \quad (16)$$

Плотность тока в однородном образце

$$j = n_0 ev = \frac{i}{S}.$$

Отсюда сила тока

$$i = n_0 evS = n_0 evbd, \quad (17)$$

где $S = bd$ — площадь поперечного сечения образца, n_0 — число носителей тока в единице объема (концентрация), v — средняя скорость перемещения электрических зарядов.

Исключая из (16) и (17) скорость v , получим

$$U = \frac{1}{n_0 e} \frac{Bi}{d} = R \frac{Bi}{d}, \quad (18)$$

$$R = \frac{1}{n_0 e} = \frac{Ud}{Bi} \quad (19)$$

называется постоянной Холла. Измеряя холловскую разность потенциалов U (при заданных значениях магнитной индукции B и силы тока i) и зная толщину образца d , можно определить из (19) постоянную Холла R и вычислить

концентрацию электрических зарядов в данном веществе n_0 .

На рис. 146, 147 и 150 показаны схемы установки, которая состоит из трех отдельных узлов.

1. Цепи продольного тока i , который подводится к клеммам B_1 и B_2 пластинки. Цепь (рис. 146) состоит из батареи

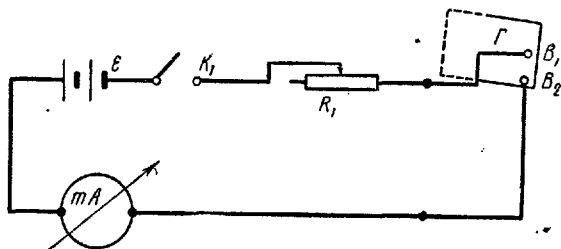


Рис. 146

постоянного тока \mathcal{E} , реостата R_1 , миллиамперметра mA и ключа K_1 .

2. Цепи измерения поперечной разности потенциалов между электродами A_1 и A_2 (рис. 147). Эта цепь состоит из потенциометра Π — прибора для измерения разности потенциалов компенсационным методом и переключателя P_1 .

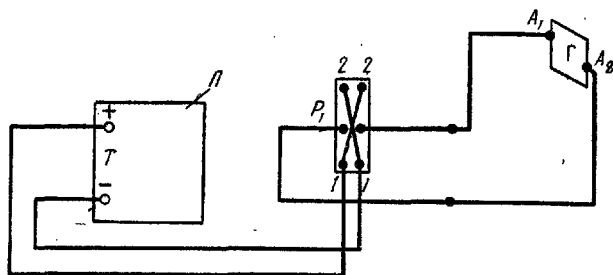


Рис. 147

Потенциометр постоянного тока Π вмонтирован в ящик. В упрощенном виде его схема изображена на рис. 148. Внешняя часть потенциометра представлена на рис. 149.

При установке переключателя $K\Pi$ в положение K (рис. 148) вращением рукоятки реостата R (рис. 149) подбирают силу тока, даваемого батареями B таким образом, чтобы стрелка гальванометра стояла на нуле. При таком

положении стрелки э. д. с. батареи B компенсируется встречной э. д. с. нормального элемента $HЭ$ (рис. 148). При установке переключателя в положение $И$ в компенсационную цепь вместо $HЭ$ включается измеряемая разность потенциалов, подключенная к клеммам T потенциометра (рис. 148). Перемещением движка M вдоль реохорда L (рис. 148) компенсируют измеряемую разность потенциалов, для чего доводят стрелку гальванометра до нулевого положения.

В практической схеме перемещение движка M осуществляется вращением рукояток M_1 и M_2 (рис. 149); M_1 позволяет изменять компенсирующую разность потенциалов

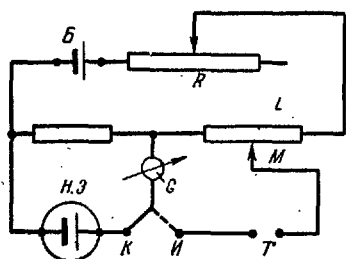


Рис. 148

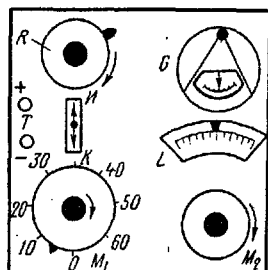


Рис. 149

скачками по 10 мв от 0 до 60 мв. Этим производится установка стрелки гальванометра G в положение, как можно более близкое к нулю. Точная установка стрелки гальванометра на нуль производится вращением рукоятки реохорда M_2 .

Шкала реохорда M_2 имеет интервал от 0 до 11 мв с наименьшим делением 0,05 мв.

3. Цепи электромагнита (рис. 150). К электромагниту $ЭЭ$ ток поступает со щита, на клеммы которого (—, +) подается напряжение 120 в. Цепь электромагнита содержит миллиамперметр mA (который может быть шунтирован при помощи ключа $З$), переключатель P_2 и реостат R_2 .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Разбираются в схемах установки.

2. Замыкают ключ K_1 (см. рис. 146) и реостатом R_1 устанавливают заданное значение силы продольного тока I , проходящего через пластинку $Г$ германия. После чего ключ K_1 размыкают.

3. Подготавливают к работе потенциометр. Для этого вращением рукоятки R при положении переключателя гальванометра на K устанавливают стрелку гальванометра на нуль и присоединяют провода к клеммам T (см. рис. 147, 148 и 149). Настольный переключатель потенциометра P_1 при этом должен находиться в среднем (разомкнутом) положении,

4. Включают рубильник на щите постоянного тока (рис. 150), замыкают переключатель P_2 на клеммы $1-1$ с помощью реостата R_2 , по миллиамперметру mA устанавливают заданное значение силы тока I в обмотках электро-

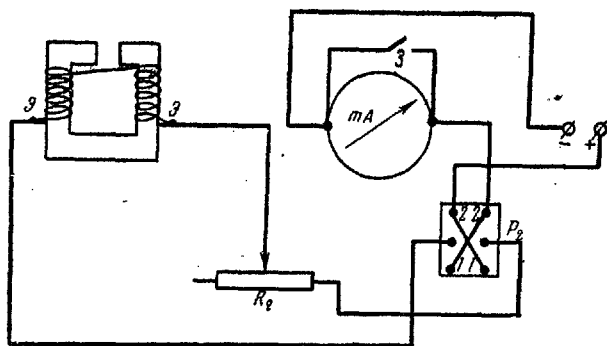


Рис. 150

магнита. После чего необходимо зашунтировать миллиамперметр mA ключом 3 и несколько раз (12—14), как можно быстрее, произвести переброску переключателя P_2 с клемм $1-1$ на клеммы $2-2$ и обратно.

Этим достигается определенное магнитное состояние железа в электромагните, соответствующее проходящему через обмотки току I .

Переключатель P_2 оставляют в положении $1-1$, отключают шунт и проверяют показание миллиамперметра mA (оно не должно измениться).

5. Замыкают ключ K_1 — рис. 146 (проверив показание миллиамперметра mA) и замыкают переключатель P_1 на клеммы $1-1$ (рис. 147), а переключатель гальванометра (рис. 148) устанавливают в положение $И$. Вращением рукояток M_1 и M_2 устанавливают стрелку гальванометра

на нуль. Отсчет по потенциометру в милливольтках производят суммированием показаний M_1 и M_2 . В положении переключателя P_2 (рис. 150) на клеммах 1—1 направление магнитного поля в зазоре электромагнита таково, что холловская разность потенциалов U складывается с начальной разностью потенциалов U' , обусловленной несколько несимметричным расположением электродов A_1 и A_2 на пластинке германия. (При изготовлении образцов для измерения эффекта Холла обычно не удается расположить контакты A_1 и A_2 точно на эквипотенциальной линии.)

Таким образом, потенциометр в первом случае показывает значение

$$U_1 = +(U + U') = U + U'. \quad (20)$$

Не меняя величины силы токов i и I , изменим направление тока I в электромагните (тем самым мы изменим направление индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита, оставив ее величину прежней), для чего перебросим переключатель P_2 в положение 2—2 (рис. 150). При этом холловская разность потенциалов изменит знак ($-U$), тогда как U' сохраняет прежнее направление. Перебросив также в положение 2—2 переключатель P_1 (рис. 147), изменим направление компенсирующей разности потенциалов. Теперь, снова установив стрелку гальванометра на нуль, получим показание потенциометра

$$U_2 = -(-U + U') = U - U'. \quad (21)$$

Очевидно, что разность потенциалов U , появляющаяся вследствие эффекта Холла, может быть вычислена как среднее значение из двух показаний потенциометра U_1 и U_2 :

$$U = \frac{(U + U') + (U - U')}{2} = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (22)$$

При данном значении тока I в электромагните измерения U_1 и U_2 повторяют для трех различных значений продольного тока i , идущего через пластинку.

6. По окончании измерений переключатели $KИ$, P_1 и P_2 устанавливают в среднее (разомкнутое) положение и размыкают ключ K_1 .

7. Весь процесс измерений, указанный в пп. 2—5, повторяют еще для трех различных значений силы тока I в электромагните.

Каждый раз при переходе к новой величине тока I в электромагните производится многократная переброска переключателя P_2 ; как указано в п. 4.

Значения силы токов i и I , рекомендуемые для измерений, указаны на табличке, прилагаемой к установке работы. На табличке указана и толщина германиевой пластинки d .

Величина индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита, соответствующая выбранному току I , определяется по графику, который приложен к работе. После выполнения всех измерений вычисляется постоянная Холла R из уравнения (19) в $\text{см}^3/\text{к}$.

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

$I, \text{ма}$	$B, \text{тл}$	$i, \text{ма}$	$U_1, \text{мв}$	$U_2, \text{мв}$	$U, \text{мв}$	$R, \text{см}^3/\text{к}$	$\Delta R, \text{см}^3/\text{к}$	n_0
I_1	B_1							
I_2	B_2							
I_3	B_3							
Среднее значение		×	×	×	×			

8. Зная $R_{\text{ср}}$ и заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{к}$, пользуясь формулой (19), вычисляют концентрацию n_0 свободных электронов в данном образце германия (в $1/\text{см}^3$), а также Δn_0 и $\frac{\Delta n_0}{n_0}$.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, переключатель.

Теория метода и описание установки. Земля представляет собой огромный магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный S , а вблизи южного географического — северный магнитный N . Магнитное поле Земли в первом приближении совпадает с магнитным полем диполя « ab » (рис. 151), помещенного в центре Земли. По последним гипотезам поле Земли связано с токами, циркулирующими по поверхности ядра Земли, а отчасти с намагниченностью горных пород и токами в радиационных поясах.

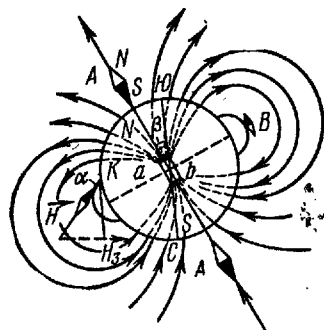


Рис. 151

Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально (точка B), а у магнитных полюсов — вертикально (точка A). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом (точка K).

Величину проекции напряженности земного магнитного поля H на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_3 . Направление этой составляющей принимается за *направление магнитного меридиана*, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется *плоскостью магнитного меридиана*. Угол α между направлением магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью называют *углом наклона*, а угол β между географическим и магнитным меридианом — *углом склонения*.

Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (H_3).

Это свойство магнитной стрелки используется в тангенс-гальванометре для определения H_3 . Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса R с некоторым числом витков n . Величина радиуса катушки и число витков указаны на тангенс-гальванометре.

В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли NS .

Поворотом 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: 1-е — горизонтальная составляющая напряженности поля Земли H_3 и 2-е — созданное током — H_1 (рис. 152).

Под действием этих полей магнитная стрелка займет такое положение равновесия, при котором равнодействующая двух полей будет совпадать с линией, соединяющей полюса стрелки. На рис. 152 NS — направление магнитного меридиана Земли, A и B — сечения витка катушки горизонтальной плоскостью, N_1S_1 — магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки, H_3 — вектор горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, H_1 — вектор напряженности магнитного поля, созданного током в катушке (определяется по правилу буравчика).

Обратите внимание на расположение магнитных силовых линий вокруг проводника с током; в точке A ток идет на нас (показан точкой), в точке B ток идет от нас (показан

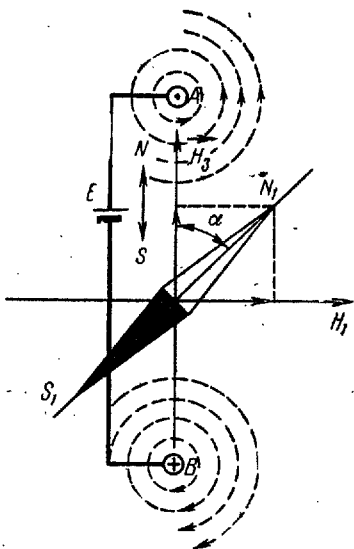


Рис. 152

крестиком). Магнитное поле тока (вектор H_1) направлено перпендикулярно к плоскости витков.

Из рис. 152 видно, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{H_3}$ и, следовательно,

$$H_3 = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Величина напряженности поля H_1 , созданного током в центре витка, для системы СИ вычисляется по закону Био — Савара — Лапласа для случая кругового тока:

$$H_1 = \frac{I}{2r}, \quad (2)$$

где I — ток, текущий в витке, в a , r — радиус витка катушки в m .

Напряженность магнитного поля в катушке с числом витков n вычисляется по выражению (2) с учетом числа витков. Подставляя значение H_1 в формулу (1), получим:

$$H_3 = \frac{In}{2r \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

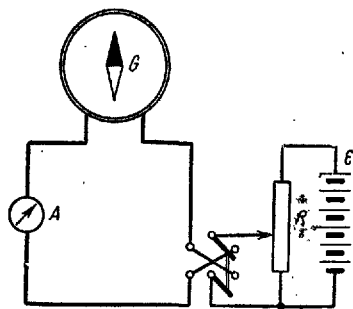


Рис. 153

Этой формулой и пользуются для опытного определения H . В системе СГСМ напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах, в системе СИ — в a/m .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают электрическую цепь из тангенс-гальванометра G ,

амперметра A , реостата R , ключа переключателя и источника тока \mathcal{E} (рис. 153).

2. Поворачивая тангенс-гальванометр и компас, устанавливают плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана так, чтобы один конец стрелки совпал с 0° .

3. Устанавливая движок реостата в некотором положении, включают постоянный ток и измеряют величину тока по амперметру (движок реостата должен быть установлен так, чтобы ток был около $0,5 a$).

4. Как только стрелка компаса придет в равновесие, отсчитывают по круговой шкале компаса угол отклонения стрелки α_1 .

5. Не меняя величины тока I , изменяют переключателем его направление и измеряют величину отклонения стрелки — угол α_2 . Берут среднее значение угла α .

6. Повторяют опыт три раза при различном токе: $0,5-0,7$ а, $1-1,2$ а, $1,5-1,7$ а. Величину тока изменяют, меняя положение движка на реостате.

7. Подставляя последовательно измеренные значения $\text{tg } \alpha$ и I в формулу (3), находят три значения H .

Все наблюдения и результаты вычислений записывают в таблицу.

I	α_1	α_2	α	$\text{tg } \alpha$	H	ΔH	$\frac{\Delta \bar{H}}{\bar{H}} \cdot 100\%$	$H_{\text{ист}} = \bar{H} \pm \Delta \bar{H}$
							X	X
Средние значения								

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Введение. Магнетиками называются макроскопические тела, способные намагничиваться — приобретать магнитные свойства.

Все тела состоят из атомов, в которых имеются вращающиеся по орбитам электроны. Магнитный момент, вызванный движением электрона по орбите, называется орбитальным магнитным моментом электрона. Векторная сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов в атоме называется *орбитальным магнитным моментом атома* μ_m .

Если движущийся по орбите электрон попадает во внешнее магнитное поле индукции \mathbf{B}_0 , то на него, кроме электрической силы притяжения ядра, действует еще сила Лоренца; действие силы Лоренца всегда вызывает изменение угловой скорости движения электрона по орбите, что в свою очередь приводит к появлению дополнительного тока, которому соответствует наведенный (индуцированный) орбитальный магнитный момент электрона. Для атома имеем общий наведенный орбитальный момент атома $\Delta \mu_m$. Оказывается, что при любом направлении вращения

электронов вектор Δp_m всегда направлен против внешнего поля \mathbf{V}_0 .

Появление в магнетике индуцированных орбитальных магнитных моментов Δp_m называется *диамагнитным эффектом*.

I. *Вещества* (висмут, сурьма, графит, таллий, цинк, золото), у которых в отсутствие внешнего магнитного поля \mathbf{V}_0 орбитальные магнитные моменты атомов $p_m = 0$ (орбитальные магнитные моменты всех электронов атома или молекулы взаимно компенсируют друг друга), называются *диамагнетиками*. При внесении диамагнетика в магнитное поле в каждом его атоме наводится магнитный момент Δp_m , направленный противоположно вектору напряженности \mathbf{H} внешнего магнитного поля. В диамагнетике собственное или внутреннее * его поле $\mathbf{V}_{\text{внутр}}$ будет направлено против внешнего поля \mathbf{V}_0 . Результирующее поле в магнетике

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_{\text{внутр}}, \quad (1)$$

где $\mathbf{V} = \mu_0 \mathbf{H}$, а $\mathbf{V}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ — магнитная индукция поля в вакууме.

Результирующее поле \mathbf{V} для диамагнетика будет иметь направление, противоположное внешнему полю \mathbf{V}_0 , — *диамагнетика намагничивается в направлении, противоположном внешнему магнитному полю*. Если диамагнетик внести в неоднородное магнитное поле, то он будет выталкиваться в область более слабого поля.

II. *Вещества* (газы, платина, кобальт), у которых в отсутствии внешнего поля $p_m \neq 0$, называются *парамагнетиками*. Если парамагнетик помещен во внешнее магнитное поле \mathbf{V}_0 , то его собственное (внутреннее) поле получает направление в ту же сторону, что и внешнее, т. е. *векторы \mathbf{V}_0 и $\mathbf{V}_{\text{внутр}}$ совпадают по направлению*. Наведенный в нем магнитный момент Δp_m будет только немного ослаблять величину внутреннего поля, так как у парамагнетиков $\Delta p_m \ll p_m$.

Магнетики характеризуются *вектором интенсивности намагничивания \mathbf{I}* , который равен векторной сумме орбитальных магнитных моментов всех атомов молекул

* Магнитное поле, которое создается атомами (молекулами) вещества, называется собственным или внутренним полем.

и электронов, находящихся в единице объема V магнетика.

Вектор намагничения связан с индукцией внутреннего поля магнетика соотношением

$$\mathbf{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \mathbf{I},$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Зависимость вектора \mathbf{I} от напряженности внешнего магнитного поля \mathbf{H} следующая:

$$\mathbf{I} = \kappa \mathbf{H},$$

где κ — магнитная восприимчивость вещества, характеризующая магнитные свойства магнетика.

Подставим в формулу (1) значения \mathbf{B}_0 и $\mathbf{B}_{\text{внутр}}$, получим

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{I} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \kappa \mathbf{H} = \mu \mu_0 \mathbf{H},$$

отсюда

$$\mu = 1 + \kappa,$$

где μ — относительная магнитная проницаемость.

Для диамагнитных веществ $\kappa < 0$ и $\mu < 1$.

Для парамагнитных веществ $\kappa > 0$ и $\mu > 1$.

В обоих случаях μ не зависит от величины напряженности внешнего магнитного поля \mathbf{H} и почти равна единице.

III. Кроме диамагнетиков и парамагнетиков существует третья группа магнетиков, которые называются ферромагнетиками.

У ферромагнетиков (железо, сталь, никель, кобальт) μ и κ зависят от напряженности \mathbf{H} внешнего магнитного поля. Величина μ очень большая.

У ферромагнетиков внутреннее поле $\mathbf{B}_{\text{внутр}}$, которое появляется при помещении их во внешнее поле, во много раз больше внешнего магнитного поля, его вызвавшего, т. е. $\mathbf{B}_{\text{внутр}} \gg \mathbf{B}_0$.

Большая величина намагниченности ферромагнетиков объясняется существованием в них «молекулярного» магнитного поля, которое вызвано многими факторами в основном ориентацией собственных магнитных моментов («спинов») самих электронов.

Большое значение μ для ферромагнетиков объясняется тем, что в ферромагнетиках имеются области 10^{-3} — 10^{-4} м.м спонтанного (самопроизвольного) намагничения. Эти об-

ласти называются доменами. В отсутствие внешнего магнитного поля орбитальные магнитные моменты всех атомов отдельного домена имеют одинаковое направление и внутри каждого домена намагниченность равна насыщению. Для различных доменов направление магнитных моментов разное и результирующая намагниченность всего магнетика может быть даже равной нулю. При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит ориентация не отдельных атомов и молекул, как в парамагнетиках, а целых областей спонтанной намагниченности (доменов), что

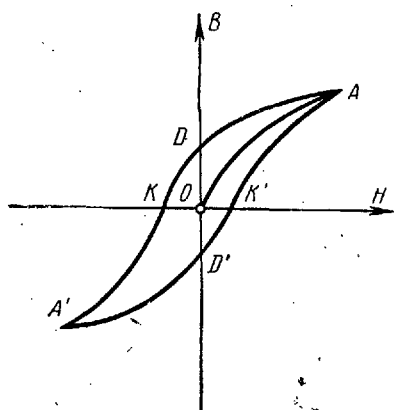


Рис. 154

и приводит к большой величине намагничивания ферромагнетика. Кривая зависимости индукции магнитного поля ферромагнетика B от величины напряженности внешнего магнитного поля H [$B = f(H)$] имеет вид петли гистерезиса (рис. 154). На кривой отрезок OA — основная кривая намагничивания тела от величины внешнего поля $H = 0$ до $H = OA$.

Если дойдя до точки A начать уменьшать намагничивающее поле H , то

индукция B будет уменьшаться по кривой AD , т. е. с некоторым отставанием. Это отставание называется гистерезисом.

Величина индукции B , равная OD , называется остаточной индукцией, т. е. ферромагнетик остается намагниченным несмотря на то, что внешнее поле $H = 0$. Полное размагничивание наступает в случае, если создать отрицательную напряженность, равную отрезку OK . Величина этого поля называется задерживающей, или коэрцитивной силой. Дальнейшее увеличение H в отрицательную сторону вызывает в сердечнике индукцию обратного направления, причем возрастание B в этом случае будет идти по кривой KA' . Уменьшая затем H до нуля, получим индукцию B , равную OD' , которая называется отрицательной остаточной индукцией. Снова переменяв направление внешнего поля, получим величину $H = OK'$. Это значение H определяет величину коэрцитивной силы, необходимой для уничтожения

отрицательной остаточной индукции OD' . При дальнейшем увеличении поля кривая от точки K' пойдет вверх и замкнется в точке A .

Объяснение явления гистерезиса такое. При наложении внешнего магнитного поля домены ориентируются вдоль него. При прекращении же действия внешнего поля не все области самопроизвольного намагничивания дезориентируются, так как изменить ориентировку группы молекул атомов гораздо труднее, чем ориентировку отдельной молекулы или отдельного атома. Для того чтобы тело стало опять ненамагниченным, надо наложить внешнее поле, обратное по знаку полю намагничивающему (коэрцитивная сила).

Работа № 53

Снятие петли гистерезиса

Приборы и принадлежности: стальной стержень, две катушки, компас, реостат, переключатель, источник постоянного тока, установка для наблюдения петли гистерезиса осциллографом.

Теория метода и описание установки. В данной работе петлю гистерезиса снимают следующим образом. Между двумя катушками a и b (рис. 155) помещают компас K и, поворачивая деревянную скамью, компас устанавливают в магнитном поле Земли так, чтобы стрелка компаса стояла на нуле (перпендикулярно скамье).

Если не изменяя положения катушек и компаса поместить в одну из катушек железный или стальной стержень, то равновесие нарушится — стрелка отклонится на какой-то угол φ (рис. 155), так как во взаимодействие войдет и магнитное поле, возникшее в стержне.

Если по катушкам пропускать ток, то, изменяя величину и направление тока в катушках (величину тока I меняем реостатом R , а направление — переключателем P), можно снять петлю гистерезиса.

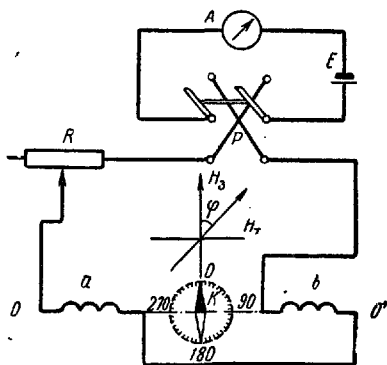


Рис. 155

чателем P), можно получить замкнутую кривую, выражающую зависимость между углом φ и величиной тока I [$\operatorname{tg} \varphi = f(I)$]. Эта кривая аналогична кривой петли гистерезиса $B = f(H)$, так как напряженность поля в катушке пропорциональна току, текущему по обмотке, а магнитное поле стержня (H стержня) пропорционально индукции B .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Снятие петли гистерезиса. 1. Разбираются в схеме (рис. 155).

2. Пропускают по катушкам ток и изменяют при этом расстояние между катушками и компасом до тех пор, пока не добьются такого положения катушек и компаса, при котором магнитные поля катушек, действующие на стрелку, взаимно скомпенсируются. В этом случае стрелка не будет отклоняться от своего первоначального положения (после этого катушки передвигать нельзя).

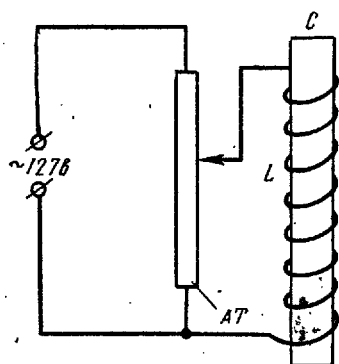


Рис. 156

3. Берут железный или стальной стержень, размагничивают его переменным током на специальной установке (рис. 156), затем вкладывают стержень либо в катушку a ,

либо в катушку b так, чтобы его середина, совпала с серединой катушки.

4. Постепенно при помощи реостата R увеличивают ток интервалами по $0,2$ а, отсчитывая показания амперметра A и углы φ , на которые отклонится стрелка. Доведя ток до 1 а, такими же интервалами уменьшают его до нуля, меняют направление тока переключателем P , повторяя измерения в обратном направлении, и т. д. Углы φ при отклонении стрелки в другую сторону считают отрицательными.

5. Откладывая по оси абсцисс величину тока, а по оси ординат $\operatorname{tg} \varphi$, получают замкнутую кривую $\operatorname{tg} \varphi = f(I)$.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу.

I на участке кривой OA	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	I на участке кривой AD	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	I на участке кривой DA' после перемены направления тока	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	I на участке кривой $A'D'$	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	I на участке кривой $D'A$ после второй перемены направления тока	φ	$\operatorname{tg} \varphi$
0			1,0			0			1,0			0		
0,1			0,9			0,1			0,9			0,1		
0,3			0,7			0,3			0,7			0,3		
0,5			0,5			0,5			0,5			0,5		
0,7			0,3			0,7			0,3			0,7		
0,9			0,1			0,9			0,1			0,9		
1,0			0			1,0			0			1,0		

Примечание. В продолжении всего опыта необходимо следить за плавным изменением величины тока; ползунок реостата передвигать очень медленно. При малейшей неосторожности, т. е. при случайном размыкании цепи или случайном изменении тока, следует опыт прекратить, стержень размагнитить и работу начать сначала.

II. Наблюдение петли гистерезиса на экране осциллографа. Для получения петли гистерезиса на экране электронно-лучевой трубки (описание трубки см. в работе № 49) собрана схема (рис. 157). На схеме T — тороид, R , R_1 , R_2 — сопротивления, V_x и V_y — вольтметры, C — конденсатор, $\mathcal{E}O$ — осциллограф. На горизонтально отклоняющие пластины X трубки осциллографа подается напряжение U_x , пропорциональное H , а на вертикальные пластины (Y) — U_y , пропорциональное B . Исследуемое вещество — железо (тороид). В первичной цепи тороида ABP происходит изменение магнитного поля H , так как ток, подводимый к тороиду и создающий в нем магнитное поле H , переменный. Во вторичной обмотке тороида DEF возникнет э. д. с. индукции, которая и является источником тока во вторичной цепи. За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности ее повторит, поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Если потенциометром R увеличивать напряжение U_x , то увеличится амплитуда колебаний H , что даст на экране

увеличение площади петли гистерезиса. Включите ключ K , и, изменяя напряжение U_x , перечертите в тетрадь петлю гистерезиса для различных значений U_x .

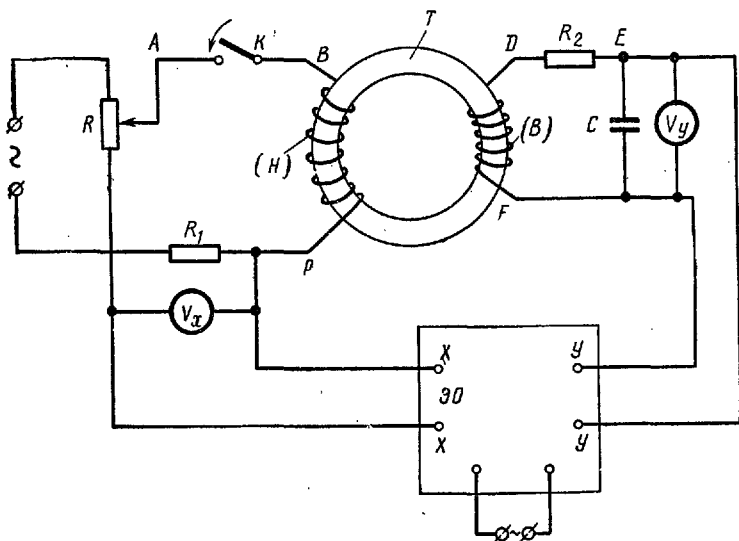


Рис. 157

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Работа № 54

Определение
диэлектрической
постоянной жидкости
методом
двухпроводной линии

Приборы и принадлежности: генератор дециметровых волн, стабилизированный выпрямитель, измерительная двухпроводная линия из медной проволоки длиной 1 м (для измерения в воздухе), измерительная двухпроводная линия из медной проволоки длиной 30 см (для измерения в воде), ванночка из плексигласа, дистиллированная вода, лампочка накаливания на 1,5—2,5 в, трубка дневного света или газонаполненная трубка, масштабная линейка.

Теория метода и описание установки. Колебательный разряд конденсатора. Цепь, состоящая из конденсатора емкостью C и катушки индуктивности L ,

называется колебательным контуром (рис. 158, а). Если конденсатор зарядить и замкнуть ключ K , то через катушку L потечет разрядный ток. Одновременно в катушке появится э. д. с., противодействующая нарастанию тока (по закону Ленца).

Напряжение конденсатора, создаваемое его зарядами, совершает работу против э. д. с. индукции и в результате электрическая энергия конденсатора будет превращаться в энергию магнитного поля. В момент полной разрядки кон-

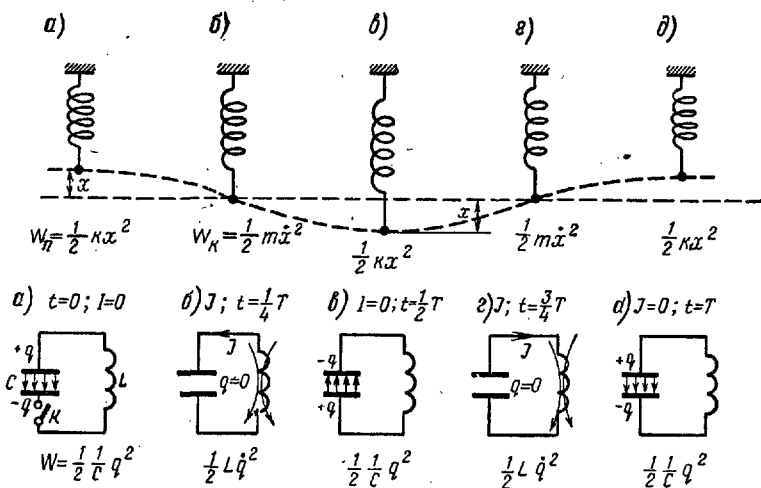


Рис. 158

денсатора э. д. с. индукции будет равна нулю и вся энергия конденсатора сосредоточится в магнитном поле тока (рис. 158, б). Далее ток из разрядного превращается в зарядный — конденсатор вновь начинает заряжаться, возникает э. д. с. индукции, которая поддерживает уменьшающийся зарядный ток. При этом э. д. с. индукции совершает работу против напряжения конденсатора — происходит переход энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора. В конце этого процесса ток опять станет равным нулю, конденсатор перезарядится (рис. 158, в). В следующее мгновение конденсатор опять начнет разряжаться и в контуре появится ток (рис. 158, г), но противоположного направления (рис. 158, б). Процесс снова повторится (на рисунке дана аналогия с пружиной).

Электромагнитные колебания, возникающие в контуре, являются гармоническими. Период таких колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{LC} \text{ (формула Томсона).}$$

Если бы в контуре полностью отсутствовало сопротивление, то процесс перехода энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно — процесс электромагнитных колебаний — повторялся бы сколь угодно долго. Вследствие наличия сопротивления и других потерь электромагнитные колебания носят затухающий характер. Для того чтобы процесс был незатухающим, необходимо все

время пополнять запас энергии конденсатора. Это можно делать различными способами. Один из наиболее простых способов получения незатухающих электромагнитных колебаний состоит в том, что собирают схему (рис. 159), в которой колебательный контур включен в анодную цепь лампы (между анодом A и катодом K). Катод питается от батареи накала B_n ; C — сетка (третий электрод),

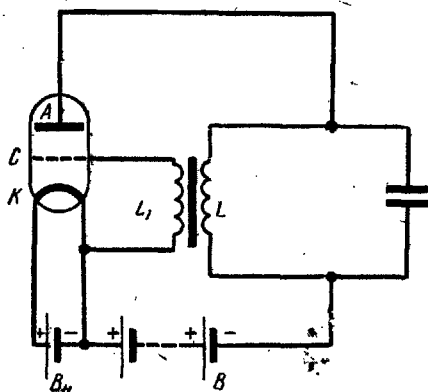


Рис. 159

в цепь которой между сеткой и катодом включена катушка L_1 , B — батарея анода. Таким образом, катушка L_1 и катушка колебательного контура L , связанные индуктивно, образуют как бы первичную и вторичную обмотки трансформатора, но без сердечника.

Катушка L_1 управляет напряжением на сетке C и осуществляет обратную связь между колебаниями в контуре и на сетке лампы. Если в контуре происходят колебания, то по катушке контура потечет переменный ток, который наводит в катушке L_1 переменную э. д. с. На сетке происходит перемена знака — то положительный знак, то отрицательный, причем период этих колебаний знака заряда на сетке вычисляется по формуле Томсона.

Таким образом, лампа периодически «отпирается» и «закрывается», в результате чего в контуре появляются пуль-

сации силы анодного тока лампы. Анодный ток периодически действует на контур и поддерживает в нем колебательный процесс. Колебания в контуре становятся незатухающими (если фаза колебания анодного тока подобрана правильно).

Такая система называется ламповым генератором.

Электрический колебательный контур является источником электромагнитных волн. В пространстве, окружающем контур, возникает переменное электромагнитное поле, которое распространяется в вакууме со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/сек (скорость света).

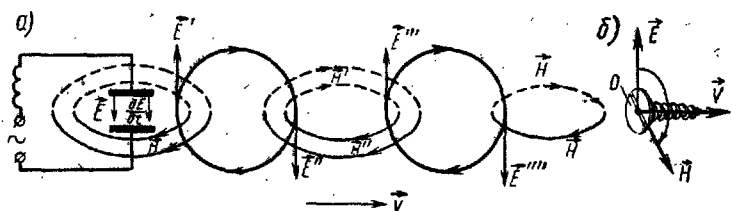


Рис. 160

Электромагнитные волны в двухпроводной линии. Картина распространения электромагнитного поля в пространстве показана на рис. 160.

Электромагнитное поле характеризуется векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} и описывается системой уравнений Максвелла:

$$\oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \frac{\partial \Phi_e}{\partial t}. \quad (2)$$

Эти два уравнения показывают неразрывную связь между электрическим и магнитным полями. Физический смысл уравнения (1) заключается в том, что *всякое переменное* (т.е. изменяющееся со временем) *магнитное поле* $\frac{\partial \Phi_m}{\partial t}$ *создает вихревое электрическое поле* (так как $\oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) \neq 0$, если же $\oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = 0$ — имеем безвихревое электростатическое поле — силовые линии не замкнуты). Уравнение (2) Максвелла говорит о том, что *изменяющееся во*

времени электрическое поле $\frac{\partial \Phi_e}{\partial t}$ создает вокруг себя вихревое магнитное поле. Кроме этих двух уравнений имеются еще четыре уравнения Максвелла (о них мы говорить не будем). Из уравнений Максвелла вытекают важные следствия:

1. Переменные электрические и магнитные поля не могут существовать независимо одно от другого; одно поле порождает другое, т. е. переменные электрическое и магнитное поля всегда существуют вместе, в виде единого электромагнитного поля.

2. Электромагнитное поле, возникнув в одном месте пространства, не остается сосредоточенным в этом месте, а распространяется от этого места с конечной скоростью

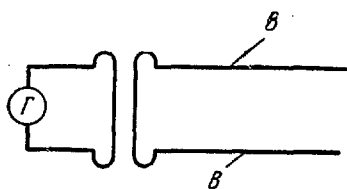


Рис. 161

в виде электромагнитной волны. Из рис. 160, а видно, что переменное электрическое поле E (возникает в конденсаторе вследствие наличия тока смещения $\frac{\partial E}{\partial t}$) уничтожается возникшим переменным электрическим полем E' ($E' = -E$), а на некотором расстоянии возникнет поле E'' ,

направленное так же, как поле в конденсаторе; то же самое можно сказать и о магнитном поле H . Таким образом, переменное электрическое (магнитное) поле, возникнув в одном месте (между обкладками конденсатора), через некоторое время в этом месте исчезнет и появится в другом месте, т. е. электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны со скоростью v от места своего возникновения. Взаимное направление векторов E , H и v показано на рис. 160, б (имеем правый винт). Если на пути электромагнитных волн поставить систему, которая поглощает некоторую часть энергии электромагнитного поля и настроить ее в резонанс с колебательным контуром, то в системе получаются электромагнитные колебания того же периода.

В данной работе резонирующей системой служит система из двух параллельных проводов B — двухпроводная линия из медной проволоки, связанных с одной стороны с генератором Γ высокочастотных колебаний (рис. 161).

Двухпроводная линия представляет собой электрическую цепь с постоянными R , L и C , которые равномерно

распределены по всей длине проводов. При достаточно высокой частоте генератора в такой линии возникает электромагнитная волна, т. е. в пространстве между проводами будет распространяться переменное во времени и пространстве электромагнитное поле с длиной электромагнитных волн $\lambda = \frac{v}{\nu}$. Бегущая электромагнитная волна несет с собой волну тока и напряжения в проводах.

Двухпроводная линия (система Лехера) может быть разомкнутой и замкнутой. Независимо от того, замкнутая

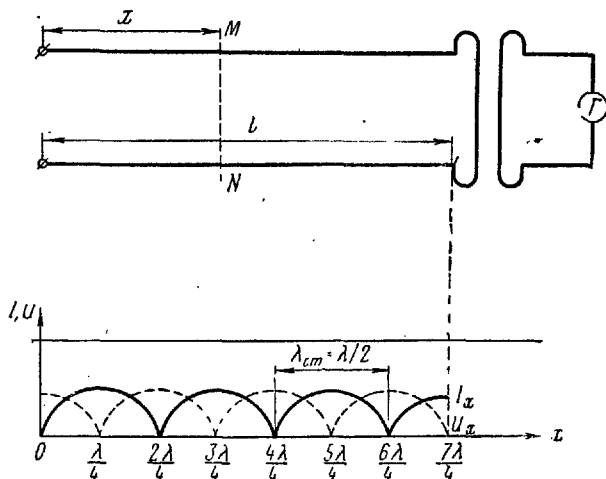


Рис. 162

или разомкнутая двухпроводная линия, в ней возникают стоячие электромагнитные волны.

1. Процесс образования стоячих электромагнитных волн в разомкнутой системе Лехера происходит следующим образом: бегущая электромагнитная волна доходит до конца проводов и отражается; отраженная и встречная волны от генератора складываются и образуют систему стоячих волн. В этом случае на концах проводов образуется пучность напряжения и узел тока. В разомкнутой линии образуются интенсивные стоячие волны (резонанс), если на входе линии уложится пучность тока, т. е. разомкнутая линия настраивается в резонанс, если ее длина l равна нечетному числу четвертей волны (рис. 162).

2. Если линия на конце *закорочена*, то в этом случае происходит сложение бегущей волны в одном проводе с волной, проходящей через перемычку из противоположного провода. В конце провода при наличии перемычки образуется пучность тока и узел напряжения (рис. 163). В этом случае закороченная линия настраивается в резонанс, если ее длина l равна четному числу четвертей волны и на входе линии образуется пучность тока.

Для обнаружения пучностей тока можно брать обычную лампочку накаливания на 1,5—2,5 в.

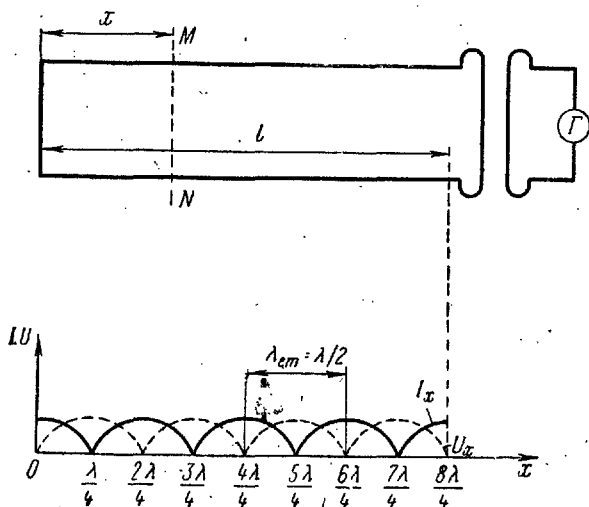


Рис. 163

В местах пучности тока лампочка L загорается. Индикатором для обнаружения пучностей напряжения может быть неоновая лампочка или газонаполненная трубка. В местах пучности напряжения газ в трубке светится. Расстояние между двумя соседними пучностями тока или напряжения равно половине длины электромагнитной волны генератора.

Система Лехера может быть использована для измерения диэлектрической проницаемости среды, в данной работе — воды. Для этого находят длину электромагнитной волны λ в воздухе и в диэлектрической среде $\lambda_{\text{в}}$ (воде) по формуле

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{\nu}; \quad \lambda_{\text{в}} = \frac{v_{\text{в}}}{\nu}, \quad (3)$$

где ν — частота генератора, c и v_B — скорости распространения электромагнитной волны в воздухе и в среде, λ_B и λ — длины электромагнитной волны в среде и воздухе.

По закону Максвелла фазовая скорость электромагнитной волны

$$v_B = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (4)$$

где ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Подставляя в формулу (4) значения v_B и c из (3), получим:

$$\epsilon = \frac{c^2}{v_B^2} = \frac{\lambda^2}{\lambda_B^2}, \quad (5)$$

где c — скорость света (скорость электромагнитной волны в воздухе), $\mu = 1$, так как имеем неферромагнитное вещество.

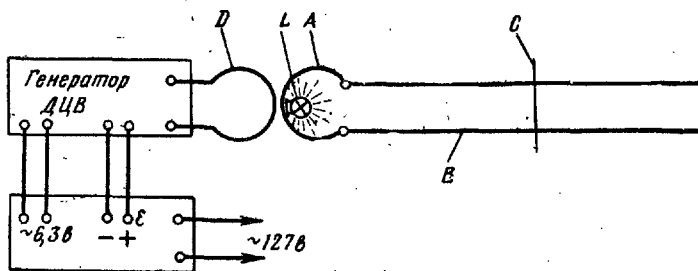


Рис. 164

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему (рис. 164), где ДЦВ — генератор дециметровых волн, А — ко~~н~~т отбора мощности, В — двухпроводная линия, D — передающая антенна, С — мостик настройки линии, L — индикаторная лампочка накаливания и выпрямитель \mathcal{E} , питаемый от сети переменного тока.

От фишки питания генератора ДЦВ идут четыре провода: два желтых — к накалу лампы (6,3 в), два черных — один с кембриковым наконечником к аноду (+300 в), другой к «0» (на корпус).

2. Проверяют наличие генерации генератора неоновой лампочкой или лампочкой накаливания (1,5—2,5 в) и получают наибольшую отдачу мощности генератора в антенну.

Генератор настраивается только преподавателем или лаборантом.

3. Контур отбора мощности A через штырьки E присоединяют к клеммам двухпроводной измерительной линии B в воздухе. Двухпроводная линия в воздухе (рис. 165) имеет длину l м и смонтирована на деревянной скамье D . По двухпроводной линии перемещается мостик C , при помощи которого настраивают линию B в резонанс с генератором.



Рис. 165

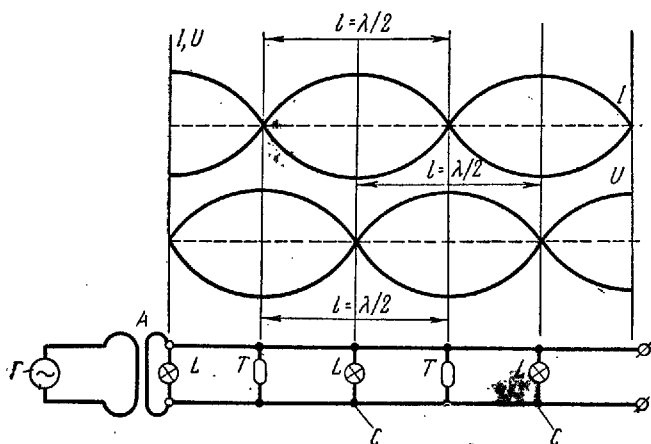


Рис. 166

4. Перемещают мостик C и отмечают положения, при которых лампочка L ярко горит (пучности тока). Измеряют это расстояние l (рис. 166). Так как $l = \frac{\lambda}{2}$, то длина электромагнитной волны, возбуждаемой генератором в воздухе,

$$\lambda = 2l. \quad (6)$$

5. Отсоединяют контур отбора мощности A от двухпроводной линии в воздухе и присоединяют его к клеммам двухпроводной линии в воде. Линия в воде проходит через боковые стенки ванночки из плексигласа.

По этой двухпроводной линии также перемещается мостик C настройки линии. Измеряют длину электромагнитной волны в воде так же, как и в воздухе. Длина волны в воде

$$\lambda_{\text{в}} = 2l_{\text{в}}.$$

6. Вычисляют диэлектрическую проницаемость воды по формуле (5)

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{в}}}\right)^2 = \left(\frac{l}{l_{\text{в}}}\right)^2.$$

7. Прodelывают такие же измерения, беря вместо лампы накаливания газонаполненную трубку. Убеждаются, что пучности тока и напряжения не совпадают.

Измерения l и $l_{\text{в}}$ прodelывают несколько раз и берут среднее значение. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу записи результатов.

№ опыта	l	$l_{\text{в}}$	ε	
			×	
Среднее значение				

ЧАСТЬ IV

ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Введение. *Линзой* называется шлифованное стекло или любое другое прозрачное вещество, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями; в частном случае одна из поверхностей линзы может быть плоской. Линзы разделяются на два класса: собирающие, или выпуклые, когда сферическая поверхность выпуклая, и рассеивающие, или вогнутые, когда сферическая поверхность вогнутая.

Эти определения применимы для линз, имеющих больший коэффициент преломления, чем среда, из которой падают лучи.

Сферические линзы применяются для получения изображений и собирания световых пучков.

Линзы бывают тонкие и толстые. Тонкой называется линза, толщина которой мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих ее поверхностей.

Рассмотрим тонкую собирающую линзу (рис. 167, а).

На рисунке S — *оптический центр* — точка, проходя которую лучи не изменяют направления.

Всякая прямая, проходящая через оптический центр, называется *оптической осью*, и если она, кроме того, проходит через центры кривизны (O_1 и O_2) — *главной оптической осью*. Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через оптический центр, называется *главной плоскостью линзы*.

Главным фокусом линзы называется точка, в которой пересекаются после преломления в линзе лучи, падающие на нее пучком, параллельным главной оптической оси (на рис. 167 точки F_1 и F_2). Расстояние главного фокуса от оптического центра линзы (расстояние CF_2 и CF_1) называется *главным фокусным расстоянием* и является основной характеристикой линзы. Для собирающих линз главное фокусное расстояние — величина положительная, для рассеивающих — отрицательная. Часто линзу характеризуют оптической силой $D = \frac{1}{F}$ в диоптриях — величиной, обратной главному фокусному расстоянию, выраженному в ме-

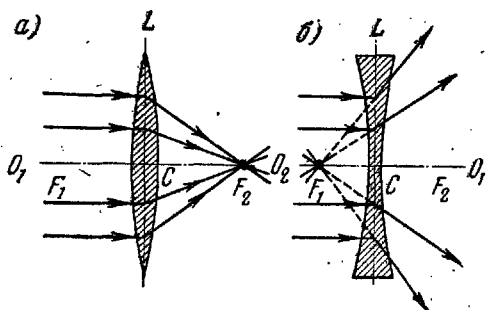


Рис. 167

трах. Для рассеивающих линз главный фокус является мнимым, и для его отыскания берут не сами лучи, а их продолжение (рис. 167, б).

Для построения изображения предмета с помощью линзы пользуются лучами, ход которых через линзу известен. Обычно берут два луча из следующих трех (рис. 168): луч 1, проходящий через оптический центр (он пройдет через линзу, не преломляясь); луч 2, падающий на линзу параллельно ее главной оптической оси (этот луч при выходе из линзы пройдет через ее главный фокус); луч 3, проходящий через главный фокус линзы (он из линзы выйдет параллельно ее главной оптической оси).

Изображение предмета AB в зависимости от того, на каком расстоянии от линзы будет находиться предмет, может получиться увеличенным (как на рисунке) или уменьшенным, действительным или мнимым. Мнимым изображением предмета называется такое его изображение,

которое находится перед линзой по одну сторону с предметом.

Обозначим через a (рис. 168) расстояние предмета до линзы, а через b — расстояние от линзы до изображения. Зависимость между a , b и f (фокусным расстоянием) дает нам формулу тонкой линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

Линейное увеличение, даваемое тонкой линзой,

$$K = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a}, \quad (2)$$

т. е. линейным увеличением называется отношение размера изображения предмета к соответствующему размеру предмета.

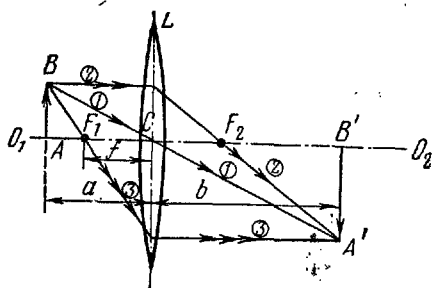


Рис. 168

Делая построение изображения, мы ограничились лучами, образующими малые углы с оптической осью линзы (параксиальные лучи).

Однако малым значениям углов φ соответ-

ствуют световые пучки, заключенные в пределах узких телесных углов. А узость световых пучков ведет к тому, что освещенности в пределах изображения малы. Поэтому с практической точки зрения удобно пользоваться широкими пучками, т. е. отказаться от параксиальных пучков световых лучей. Но в результате этого изображение объекта приобретает ряд недостатков.

Сферическая aberrация. Линза собирает в одной точке только узкий пучок лучей, падающих вдоль оптической оси OO' . Чем дальше падает на линзу луч от оси, тем ближе к стеклу он пересекает ось после преломления (рис. 169). Пересечение преломленных линзой лучей 1, 2, 3, 4 в разных точках (на рисунке точки P' и P'') называется *сферической aberrацией*.

Расстояние $\delta S = S'' - S'$ называется *продольной сферической aberrацией*. Наличие продольной сферической

абберации ведёт к размытию изображения — на экране будет размытое пятно вместо точки. Для положительной линзы $\delta S < 0$, для линз с отрицательной оптической силой $\delta S > 0$. Это позволяет путем комбинирования линз устранять сферическую абберацию.

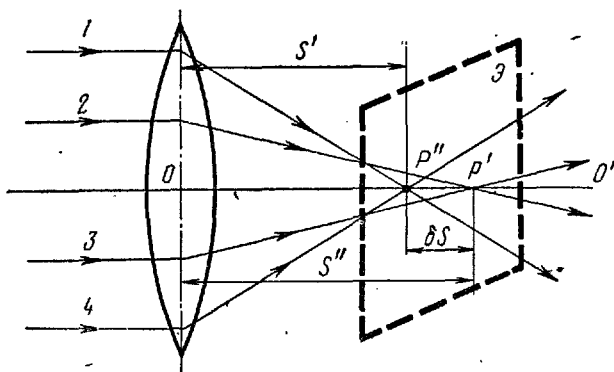


Рис. 169

Хроматическая абберация. При освещении системы монохроматическим светом фокусное расстояние линзы определяется соотношением

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

где n — показатель преломления, R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линз.

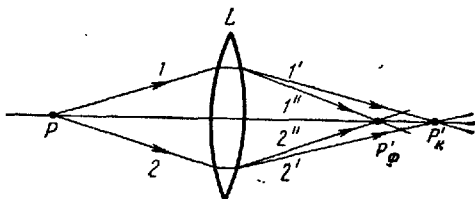


Рис. 170

Для данной линзы (т. е. при определенных R_1 и R_2) $\frac{1}{f}$ есть величина постоянная.

При сложном составе света необходимо учитывать зависимость коэффициента преломления n от длины волны.

С увеличением длины волны n уменьшается. Поэтому обыкновенная линза имеет большую оптическую силу для фиолетовых лучей, чем для красных. В результате изображение, полученное от источника, испускающего белый свет, размыто и по краям окрашено. Это явление носит название *хроматической aberrации*.

На рис. 170 P'_ϕ — изображение источника в фиолетовых лучах, $P'_к$ — в красных. Для устранения хроматической aberrации комбинируют линзы, приготовленные из различных сортов стекла.

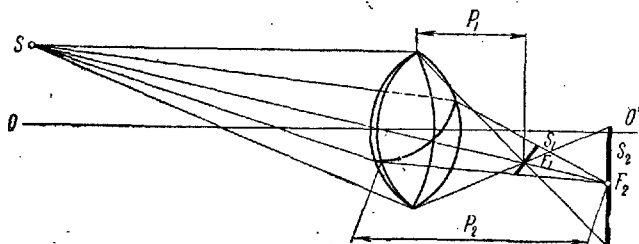


Рис. 171

Астигматизм. Астигматизм наблюдается при образовании изображения точки, посылающей лучи под значительным углом к главной оптической оси (косые пучки). При этом все лучи, посылаемые точкой S , собраться в одной точке не могут (рис. 171) и изображение получается в виде двух взаимно перпендикулярных линий S_1 и S_2 , находящихся в разных местах. Это ведет к размытости изображения. Такая погрешность линзы носит название астигматизма. Астигматизм устраняется подбором различных линз.

Работа № 55

Определение главного фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, к ней пять ползушек, собирающая линза, рассеивающая линза, осветитель, экран с масштабом, полупрозрачный экран с сеткой, миллиметровый масштаб.

Теория метода и описание установки. Для определения главного фокусного расстояния линз пользуются оптической скамьей (рис. 172). Оптическая скамья представляет

два параллельных металлических стержня на подставках. Скамья имеет по всей длине миллиметровый масштаб. Вдоль скамьи могут перемещаться на ползунках: предмет (освещенное лампой матовое стекло с нарисованной на нем тушью какой-нибудь меткой), линзы и экран. Предмет, линзы и экран нужно установить так, чтобы их середины лежали на одной прямой, параллельной длине оптической скамьи, плоскость экрана была перпендикулярна к длине оптической скамьи, а ось линзы — ей параллельна.

Определение главного фокусного расстояния выпуклой и вогнутой линз производится несколько различно, поэтому удобнее будет рассмотреть эти случаи отдельно.

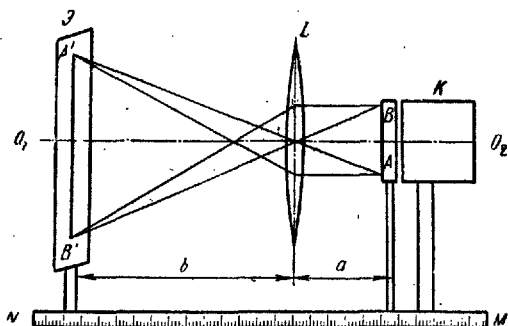


Рис. 172

Измерения и обработка результатов измерений. А. Собирающая линза. I. *Определение главного фокусного расстояния выпуклой или собирающей линзы по величинам a и b .* 1. Располагают приборы на оптической скамье NM , как показано на рис. 172, где K — осветитель, L — линза, $Э$ — экран с масштабом. Экран помещают на достаточно большом расстоянии от осветителя.

2. Перемещая линзу L , находят положение отчетливого изображения предмета AB на экране и отсчитывают по масштабу величины a и b .

3. Меняя положение экрана и линзы, повторяют измерения три раза.

4. Подставляя в формулу (1) значения a и b , взятые из каждого отдельного опыта, вычисляют f_1 , f_2 и f_3 . Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу.

a	b	f	Δf	$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100\%$	$f_{\text{ист}} = \bar{f} \pm \Delta \bar{f}$
				×	×
Среднее значение					

II. *Определение главного фокусного расстояния собирающей линзы по величине предмета, по величине его изображения и по расстоянию от изображения предмета до линзы.*

1. Расположение приборов остается таким же, что и в первом случае (рис. 172).

2. На экране Э находят сильно увеличенное изображение предмета $A'B'$.

3. Измеряют величину предмета AB , изображения $A'B'$ и расстояния от изображения предмета до линзы b .

4. По формуле (2) определяется значение a , которое подставляется в формулу линзы (1). После преобразований получается следующее выражение для вычисления фокусного расстояния f :

$$f = b \frac{AB}{AB + A'B'} \quad (4)$$

5. Меняя положение экрана и линзы, измеряют величины AB , $A'B'$ и b три раза.

6. Подставляя значения AB , $A'B'$ и b в формулу (4), вычисляют f .

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу.

b	AB	$A'B'$	f	Δf	$\frac{\Delta f}{f} \cdot 100\%$	$f_{\text{ист}} = \bar{f} \pm \Delta \bar{f}$
					×	×
Среднее значение						

Б. *Р а с с е и в а ю щ а я л и н з а.* Вогнутая, или рассеивающая, линза дает мнимое изображение. Фокусное расстояние вогнутой линзы определяют следующим образом: 1. Собирают схему, как в первом случае для выпуклой линзы (рис. 172).

2. Замечают точку D (положение экрана, когда получается резкое изображение предмета, рис. 173).

3. Между собирающей линзой L и точкой D помещают рассеивающую линзу L_1 . Опять добиваются резкого изображения предмета на экране, которое из D перейдет в точку E . Для линзы L_1 «предметом» является изображение в точке D , даваемое линзой L от предмета A .

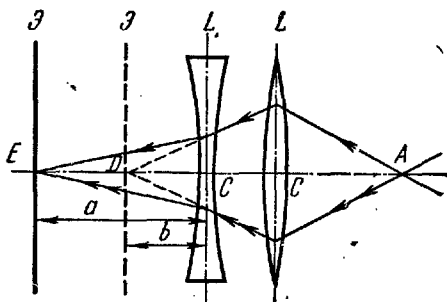


Рис. 173

Пользуясь обратимостью хода лучей в системах линз, можно рассматривать эти лучи света как распространяющиеся из точки E . Тогда точка D будет мнимым изображением точки E (после преломления лучей в линзе L_1).

Следовательно, расстояние $EC = a$, а $DC = b$. Найдём эти расстояния (не менее трех раз).

4. Найденные значения $EC = a$ и $DC = b$ подставляют в формулу (1). Принимая во внимание, что f и b имеют в данном случае отрицательный знак, получим:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f},$$

откуда

$$f = \frac{ab}{a - b}.$$

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу — такую же, как и для выпуклой линзы.

Работа № 56

Наблюдение сферической и хроматической аберраций линз

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, двояко-выпуклая линза, экран, две диафрагмы (круглая и кольцевая), набор светофильтров.

Для определения продольной сферической аберрации δS и фокусного расстояния линзы для красных и фиолетовых лучей собирают установку (рис. 172). На рисунке MN —

оптическая скамья с ползушками, K — осветитель с крестом нитей, L — линза, \mathcal{E} — экран.

Измерения и обработка результатов измерений. А. Сферическая аберрация. 1. Между источником K и линзой L помещают круглую диафрагму AB и, получив резкое изображение источника креста нитей, отмечают положение экрана S' в точке P' (рис. 174, а).

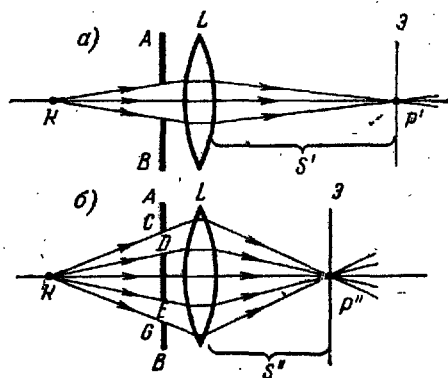


Рис. 174

2. Между источником и линзой помещают кольцевую диафрагму и, получив резкое изображение источника, замечают положение экрана S'' в точке P'' (рис. 174, б).

3. Определяют величину продольной сферической аберрации $\delta S = S'' - S'$.

Измерения проводят три раза.

Результаты записывают в таблицу.

№ п/п	S'	S''	δS	$\Delta \delta S$	$\frac{\Delta \delta S}{\delta S} \cdot 100\%$	$\delta S_{\text{ист}} = \delta S \pm \Delta \delta S$
					×	×
Среднее значение	×	×				

Б. Хроматическая аберрация. 1. Между источником K и линзой L помещают фиолетовый светофильтр и получают резкое изображение источника на экране (точка P_ϕ (рис. 170)).

Отмечают положение экрана b_ϕ и рассчитывают фокусное расстояние f_1 по формуле (1).

2. Между источником и линзой помещают красный светофильтр и получают резкое изображение источника на экране (точка P'_K).

Отмечают положение экрана b_k и рассчитывают фокусное расстояние f_2 по формуле

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b_k}.$$

Измерения прделывают три раза и результаты заносят в таблицу.

3. Вычисляют величину

$$\delta S = P'_k - P'_f = \bar{b}_k - \bar{b}_f.$$

№ п/п	a	b	f	Δf	$\frac{\Delta \bar{f}}{\bar{f}} \cdot 100\%$	$f_{\text{ист}} = \bar{f} \pm \Delta f$
Для фиолетовых лучей						
1					×	×
2						
3						
Среднее значение	×	×				
Для красных лучей						
1					×	×
2						
3						
Среднее значение	×	×				

Работа № 57

Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа

Приборы и принадлежности: измерительный микроскоп с микрометрическим винтом, микрометр, измеряемые стеклянные пластинки со штрихами на обеих поверхностях, осветитель.

Теория метода и описание установки. При прохождении света через ровную и плоскую границу двух прозрачных веществ неодинаковой оптической плотности падающий луч света AO разделяется на два луча — отраженный луч OB и преломленный луч OD (рис. 175). Направления этих

лучей определяются следующими законами отражения и преломления света:

1. Луч AO , падающий на преломляющую поверхность, нормаль к поверхности в точке падения POP , луч отраженный OB и луч преломленный OD лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения POB численно равен углу падения POA .

3. Синус угла падения i относится к синусу угла преломления r , как скорость света в первой среде v_1 относится к скорости света во второй среде v_2 :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Последний закон говорит о том, что свет распространяется в различных средах с различной скоростью.

Для двух данных сред и для луча данной длины волны отношение скорости света в среде 1 к скорости света в среде 2 или отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, т. е.

$$\frac{v_1}{v_2} = \text{const} = n_{21}; \quad n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Величина n_{21} называется *относительным показателем (коэффициентом) преломления* второй среды по отношению к первой.

Если одна из сред, например 1, — вакуум или воздух, то показатель преломления n данной среды 2 по отношению к вакууму называется *абсолютным показателем преломления* данной среды или просто *показателем (коэффициентом) преломления*.

Абсолютный показатель преломления среды 2 (рис. 175)

$$n_2 = \frac{c}{v_2}; \quad n_2 = \frac{\sin i}{\sin r},$$

где c — скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/сек), v_2 — скорость света в данной среде 2, т. е. *показатель преломления среды есть отношение скорости света в вакууме к скорости света в данной среде*:

$$n = \frac{c}{v}.$$

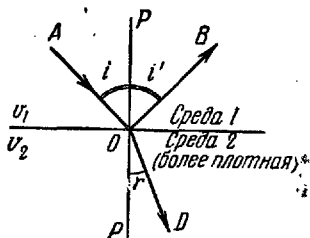


Рис. 175

Показатель преломления зависит от длины волны света и от свойств среды. Абсолютные показатели преломления больше единицы. Это означает, что скорость распространения света в данной среде всегда меньше, чем в вакууме.

Относительный показатель преломления двух сред n_{21} связан с абсолютными показателями преломления сред n_1 и n_2 следующим соотношением:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{cn_2}{n_1c} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Для определения показателей преломления веществ существуют различные методы. Одним из них является *метод определения показателя преломления стекла при помощи микроскопа*.

В основе метода лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластинки вследствие преломления световых лучей, проходящих в стекле при рассматривании пластинки нормально к ее поверхности. Схема прохождения лучей через стеклянную пластинку дана на рис. 176.

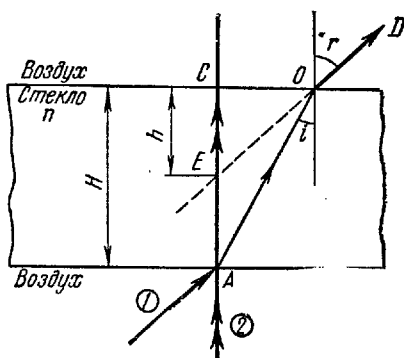


Рис. 176

В точку A , находящуюся на нижней поверхности стеклянной пластинки, падают два луча света 1 и 2 . Луч 2 падает на пластинку нормально к ее поверхности и поэтому проходит сквозь пластинку и выходит в воздух в точке C , не испытывая преломления. Луч 1 преломляется и выходит из пластинки в точку O по направлению к точке D .

При выходе из пластинки луч OD образует угол преломления r — больший, чем угол падения i . Если смотреть из точки D по направлению DO , то наблюдатель будет видеть точку пересечения лучей OD и AC не в точке A , а в точке E , т. е. толщина пластинки будет казаться равной CE .

Из рис. 176 видно, что кажущаяся толщина пластинки $CE = h$ меньше истинной, т. е. действительной ее толщины $CA = H$.

Для лучей, близких к нормально падающим лучам, углы падения и преломления малы. В этом случае синусы можно заменить тангенсами и по закону преломления света написать (рассматривая обратный ход лучей, т. е. от D к A):

$$n_{\text{стекла}} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\operatorname{tg} r}{\operatorname{tg} i}.$$

При рассмотрении рисунка и после соответствующих преобразований имеем:

$$n_{\text{стекла}} = \frac{CO \cdot H}{h \cdot CO} \quad \text{или} \quad n = \frac{H}{h}.$$

Следовательно, показатель (коэффициент) преломления стекла можно найти из отношения истинной толщины стеклянной пластинки к кажущейся ее толщине. Истинная толщина пластинки измеряется микрометром, а кажущаяся — микроскопом с микрометрическим винтом.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Измеряют микрометром истинную толщину стеклянной пластинки H в том месте, где нанесены штрихи, и берут ее значение в миллиметрах.

2. Определяют кажущуюся толщину стеклянной пластинки h , для чего пластинку кладут на столик микроскопа под объектив так, чтобы оба штриха пересекали оптическую ось прибора. Затем: а) двигая тубус, добиваются четкого изображения видимого в микроскоп штриха, нанесенного на верхнюю поверхность пластинки. Записывают отсчет микрометрического винта микроскопа и считают его за нулевое деление (от этого нулевого деления производят дальнейшие отсчеты); б) опускают тубус микроскопа до получения четкого изображения штриха на нижней поверхности пластинки. Новый отсчет микрометрического винта дает нам сразу кажущуюся толщину пластинки h .

Очевидно

$$h = (NZ + 0,002m) \text{ мм},$$

где N — число полных оборотов барабана винта, $Z = 0,002 \cdot 50$ — шаг винта, 50 — число делений в одном полном обороте барабана, 0,002 — цена одного деления барабана винта, m — число делений в неполном обороте барабана.

Как видно, за один полный оборот барабана микрометрического винта тубус микроскопа перемещается на $Z = 0,1 \text{ мм}$.

3. Вычисляют показатель (коэффициент) преломления стекла по формуле

$$n = \frac{H}{h}$$

4. Измерение истинной и кажущейся толщины пластинки производят не менее трех раз; определяют среднее и истинное значение показателя преломления стекла.

Примерное расположение записи в таблице следующее:

№ п/п	H, мм	Отсчет микрометрического винта		h = (NZ + 0,002 · m), мм	Показатель преломления n	Δn	n _{ист} = $\bar{n} \pm \Delta\bar{n}$
		N	m				
1							X
2							
3							
Среднее значение				X			

Работа № 58

Определение показателя преломления и концентрации раствора сахара при помощи рефрактометра

Приборы и принадлежности: прецизионный рефрактометр типа РПЛ-2, растворы сахара: а) известной концентрации для знакомства со шкалой прибора и б) неизвестной концентрации, пипетка, вата, миллиметровая бумага.

Теория метода и описание установки. Рефрактометром называется прибор для измерения показателя преломления твердых, жидких и газообразных тел.

Показателем преломления среды называется отношение скорости света в пустоте к скорости света в данной среде (абсолютный показатель преломления)

$$n = \frac{c}{v}$$

Определение показателя преломления жидких тел и концентрации растворов при помощи прецизионного рефрактометра типа «РПЛ-2» основано на явлении *полного внутреннего отражения*.

Полное внутреннее отражение имеет место при переходе светового луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например из воды в воздух. Среда с показателем преломления n_2 называется оптически более плотной, чем среда с показателем преломления n_1 , если $n_2 > n_1$.

Пусть луч света выходит из воды в воздух под разными углами падения (рис. 177). Луч 1 в точке O частично отразится, подчиняясь закону отражения, и пойдет по направлению $O1'$, частично преломится и пойдет по направле-

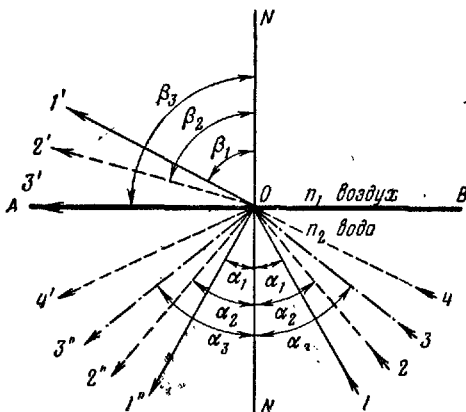


Рис. 177

нию $O1'$. То же самое происходит и с лучами 2 и 3. Обозначим углы падения лучей через α_1 , α_2 и α_3 , а углы преломления их — через β_1 , β_2 и β_3 . Луч 3 после преломления скользит по границе двух сред, т. е. его угол преломления β_3 равен 90° . Если угол падения луча станет больше угла α_3 , то луч света полностью отразится от границы AB в воду (луч 4 и 4'). Это явление называется *явлением полного внутреннего отражения*. Угол падения α_3 называется *предельным углом полного внутреннего отражения* или просто *углом полного внутреннего отражения*.

Повернем лучи (заставим их идти из воздуха в воду). Картина останется та же — это следует из принципа обратимости световых лучей: только лучи падающие и преломленные поменяются местами. То же самое и с углами: углы $\beta\beta$ станут углами падения, а углы $\alpha\alpha$ — преломления.

Основной частью рефрактометра являются две призмы ABC и $A'B'C'$ (рис. 178), изготовленные из стекла сорта флинтгласа с большим показателем преломления ($n = 1,72$). Между этими призмами вводят три капли исследуемой жидкости, которая расплывается в слой толщиной $0,02$ мм при опускании верхней призмы на нижнюю.

Пучок света от осветителя, пройдя через грань $A'C'$ осветительной призмы $A'B'C'$, падает на ее грань $A'B'$, соприкасающейся с жидкостью. Так как эта грань $A'B'$ матовая, то она рассеивает свет в жидкости по всем направлениям и часть лучей падает на грань AB измерительной

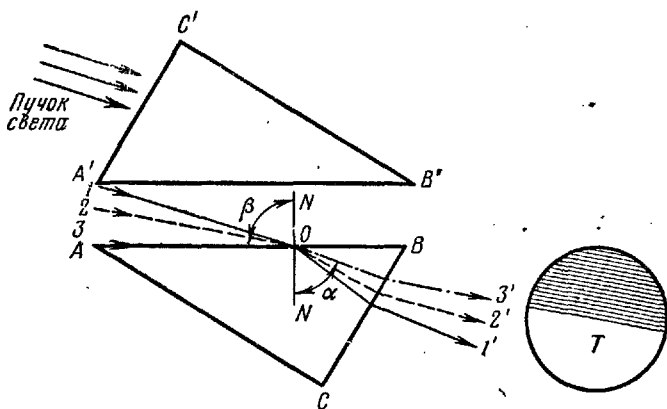


Рис. 178

призмы ABC под различными углами. Очевидно, что наибольший возможный угол падения лучей 1, 2, 3, падающих на грань AB , равен $\beta = 90^\circ$, следовательно, луча с еще большим углом падения быть не может. Этот скользящий по границе AB луч (луч 3 на рис. 178) с углом падения 90° (идуший из исследуемой жидкости с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления — призму) преломляется в призме ABC (как это следует из принципа обратимости светового луча) под предельным углом α полного внутреннего отражения. Все остальные лучи, например 2-й и 1-й, падающие на грань AB под углом, меньшим 90° , преломляются в призме под углом, меньшим предельного α .

В поле зрения трубы T , поставленной на пути лучей, прошедших систему двух призм, наблюдаются две области:

Одна светлая (нижняя половина), другая темная. Положение границы светотени определяется величиной предельного угла α , т. е. зависит от величины показателя n преломления жидкости. Дальше эти лучи посредством зеркала (отражательной призмы Π — рис. 179) направляются вдоль оси зрительной трубы T и, пройдя призму прямого видения (компенсатор), а потом шкалу прибора, попадают через окуляр O в глаз наблюдателя.

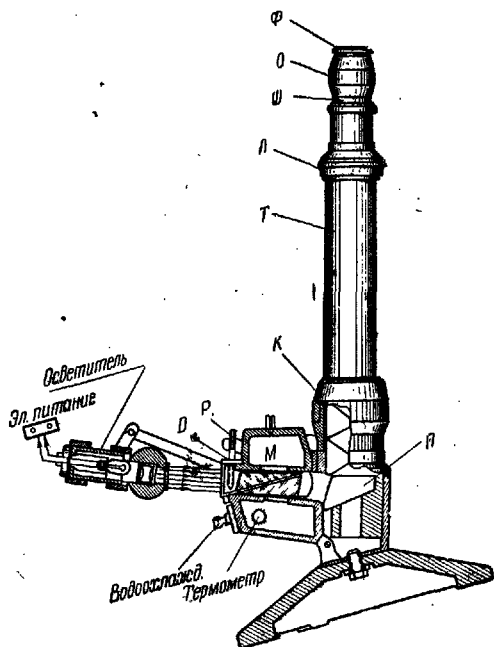


Рис. 179

Для разных длин волн показатели преломления различны, поэтому граница светотени будет окрашена в разные цвета и не будет отчетливо резкой. Для устранения этой окрашенности (дисперсии) в верхней части нижней камеры прибора на резьбе установлена трубка, в которой и смонтирована призма прямого видения (компенсатор), соединенная с кольцом K (рис. 179).

Внутри трубы T возле нижней части узла окуляра расположена шкала прибора $Ш$. Определив то показание этой шкалы, по которому проходит граница светотени, по таб-

лице перевода показаний прибора находят соответствующие значения показателя преломления и концентрации раствора.

В верхней части зрительной трубы установлен окуляр O , состоящий из трех линз и наглазника. Внутри наглазника находится диафрагма со светофильтром Φ .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Приподнимают верхнюю часть призмы M (рис. 179) вместе с укрепленной в ней осветительной призмой $A'B'C'$ (рис. 178) и на поверхность нижней (измерительной) призмы ABC пипеткой наносят 2—3 капли исследуемого сахарного раствора. При этом не следует касаться пипеткой призмы, чтобы не поцарапать ее поверхность.

2. Опускают верхнюю часть камеры с призмой. Осветителем (рис. 179) направляют пучок света через окно на грань $A'C'$ верхней призмы. Наблюдая за полем зрения перемещением диафрагмы D (с помощью винта P) и перемещением осветителя добиваются получения резкой границы светотени. Для увеличения резкости пользуются винтом окуляра O (фокусировка).

3. Устраняют окраску границы светотени, вращая кольцо K компенсатора.

№ п/п		№ раствора			
		1	2	3	4
Измерения по шкале	1				
	2				
	3				
	Среднее				
n_x (по таблице)					
C (данная)			×	×	×
C_x (по таблице)		×			

4. Устанавливают круговой лимб L (в верхней части зрительной трубы) на деление нуль. Лимб имеет 10 делений. Поворот лимба на 10 делений соответствует перемещению

границы светотени на одно деление шкалы. Если при этом граница светотени окажется между двумя делениями шкалы, то вращением лимба доводят границу до ближайшего верхнего деления. После этого отсчитывают число делений шкалы от нуля до деления, по которому проходит граница светотени, включительно. Полученный по шкале отсчет записывают как целые единицы и прибавляют к нему как десятые число делений, стоящее на лимбе против индекса. После этого лимб снова устанавливают на нуль и, смотря в трубу, вращением лимба снова доводят границу светотени до деления шкалы, где была она первый раз. Потом смотрят на число делений лимба и записывают результат второго измерения.

**Таблица перевода показаний
прецизионного рефрактометра в показатели преломления n
и в проценты концентрации сухих веществ по сахарозе**

Деления шкалы	Показания прецизионного рефрактометра n	% сухих веществ s	Деления шкалы	Показания прецизионного рефрактометра n	% сухих веществ s
0	1,33299	0	26	1,34581	8,68
1	1,33349	0,34	27	1,34630	9,01
2	1,33399	0,69	28	1,34678	9,32
3	1,33449	1,04	29	1,34726	9,63
4	1,33499	1,39	30	1,34774	9,94
5	1,33549	1,73	31	1,34822	10,25
6	1,33599	2,07	32	1,34870	10,57
7	1,33649	2,42	33	1,34918	10,88
8	1,33698	2,76	34	1,34966	11,19
9	1,33747	3,09	35	1,35014	11,50
10	1,33796	3,42	36	1,35062	11,80
11	1,33845	3,76	37	1,35111	12,11
12	1,33894	4,10	38	1,35158	12,41
13	1,33944	4,43	39	1,35206	12,72
14	1,33993	4,76	40	1,35254	13,03
15	1,34042	5,10	41	1,35302	13,33
16	1,34091	5,43	42	1,35350	13,63
17	1,34140	5,76	43	1,35398	13,94
18	1,34190	6,09	44	1,35446	14,24
19	1,34239	6,42	45	1,35494	14,55
20	1,34288	6,75	46	1,35541	14,84
21	1,34337	7,07	47	1,35589	15,14
22	1,34385	7,39	48	1,35636	15,43
23	1,34434	7,71	49	1,35683	15,72
24	1,34483	8,04	50	1,35730	16,01
25	1,34532	8,36			

Всего производят три таких измерения и берут из них среднее значение.

5. Такие же измерения делают с другими растворами сахара. Все измеренные значения показаний шкалы записывают в таблицу (см. таблицу на стр. 321).

6. Пользуясь таблицей перевода показаний прибора в показатели преломления n и в проценты концентрации C сахара (для неизвестного раствора), записывают последние в таблицу. В таблице перевода даны значения только для целых единиц шкалы прибора. Значения n и C для дробных величин показаний шкалы находят методом *интерполирования*.

7. Откладывая по оси абсцисс значение C и по оси ординат соответствующее значение показателя преломления n , строят график зависимости n от C ($n = f(C)$). При этом надо правильно выбрать масштаб, взяв точку для чистой (дистиллированной) воды.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Введение. I. Свет, с точки зрения *электромагнитной природы света*, представляет собой *поперечные электромагнитные волны*, распространяющиеся в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек. Ощущение света в нашем глазу производит электрическая составляющая световой волны — напряженность E электрического поля, поэтому мы будем говорить только о векторе E , несмотря на то, что имеется и другая компонента — напряженность магнитного поля — H . Векторы E и H колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярно к направлению скорости распространения волны. Векторы E , H , v образуют правый винт (см. рис. 160, б). Отличие световых (оптических) волн, воспринимаемых глазом, от электромагнитных волн состоит лишь в том, что «видимые» электромагнитные волны имеют значительно меньшую длину волн. Электромагнитные волны с $\lambda > 7,4 \cdot 10^{-5}$ см до $\lambda = 1-2$ мм называются *инфракрасными лучами*, волны с $\lambda > 3,9 \cdot 10^{-5}$ см до $\lambda < 7,4 \cdot 10^{-5}$ см называются *видимыми лучами* и лучи, λ которых меньше $3,9 \cdot 10^{-5}$ см, называются *ультрафиолетовыми лучами*. Еще более короткие лучи — *лучи рентгеновские* и γ -лучи.

Белый свет представляет собой совокупность различных монохроматических волн*.

Скорость света v в различных средах различна $v = \frac{c}{n}$, где n — абсолютный показатель преломления среды.

Длина волны λ монохроматического света

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = vT,$$

где ν — частота, T — период.

II. Волновая природа света проявляет себя наиболее отчетливо в явлениях интерференции, дифракции и поляризации света. *Интерференцией световых волн называется явление, возникающее при сложении когерентных волн.* В результате интерференции происходит ослабление или усиление интенсивности света в зависимости от соотношения фаз складываемых световых волн, т. е. *происходит перераспределение энергии волн* в пространстве, согласно закону сохранения энергии. Условием интерференции волн одной и той же длины является *их когерентность, т. е. сохранение неизменной разности фаз $\Delta\varphi = \text{const}$ на время, достаточное для наблюдения.* *Источники, излучающие волны одинаковой частоты с постоянной разностью фаз и совпадающими плоскостями колебаний векторов E , называются когерентными.*

Условие когерентности световых волн является совершенно необходимым, так как иначе картину интерференции наблюдать невозможно. Если в световом поле какого-либо источника света выбрать точку наблюдения, то в эту точку будут приходить световые волны в различных фазах, так как источниками световых волн являются атомы светящегося тела и постоянство разности фаз выполняться для них не будет. Для наблюдения картины интерференции необходимо создать такие условия, при которых в любой момент времени через точку наблюдения проходили бы световые колебания, излучаемые одной и той же группой атомов, имеющих постоянную разность фаз. Независимые когерентные источники осуществить невозможно, поэтому прибегают к искусственному приему, который состоит в том, что заставляют интерферировать две части от одной и той же волны, т. е. *волну, идущую от одного источника, разбивают на две части и направляют в одну и ту же точку по разным путям.*

* Монохроматический свет — свет, в котором $\nu = \text{const}$ или $\lambda = \text{const}$.

III. Первым опытом, доказавшим возможность получить интерференцию световых волн, был опыт Юнга, который заключается в следующем (рис. 180). Из точки O распространяется монохроматическая сферическая световая волна, которая падает на два очень малых и близко расположенных друг от друга отверстия S_1 и S_2 в экране SS . По принципу Гюйгенса (стр. 337) эти два отверстия являются самостоятельными источниками световых колебаний; из этих источников будут выходить когерентные волны. Пусть от отверстия S_1 на экран \mathcal{E} падает луч в точку K . От отверстия S_2

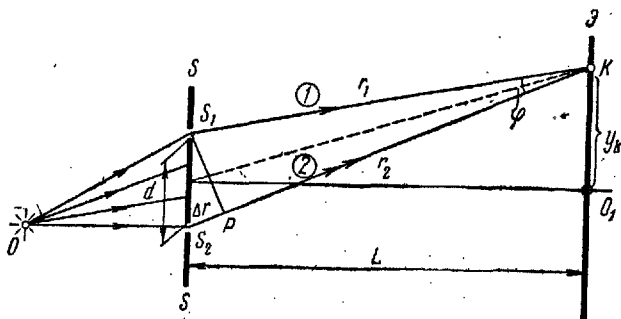


Рис. 180

всегда найдется луч, который также упадет в точку K . Рассмотрим условия интерференции в точке K .

Электрическая компонента E монохроматической волны представляется уравнением

$$E = E_0 \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\omega r}{v} \right) = E_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{v} \right),$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — частота, E_0 — амплитуда колебания вектора E , T — период гармонического колебания, t — время, r — отрезок пути, который прошла волна, v — скорость волны.

Если в точку K на экране \mathcal{E} падают два луча, то результирующая напряженность $E_{\text{рез}}$ в точке K будет равна алгебраической сумме напряженностей E_1 и E_2 волн, распространяющихся от источников S_1 и S_2 , т. е.

$$\begin{aligned} E_{\text{рез}} &= E_1 + E_2 = E_0 \cdot \sin \omega \left(t - \frac{r_1}{v} \right) + E_0 \cdot \sin \omega \left(t - \frac{r_2}{v} \right) = \\ &= 2E_0 \cdot \cos \omega \frac{r_2 - r_1}{2v} \cdot \sin \omega \left(t - \frac{r_1 + r_2}{2v} \right) = \\ &= A_{\text{рез}} \cdot \sin \omega \left(t - \frac{r_1 + r_2}{2v} \right), \end{aligned}$$

где $A_{\text{рез}}$ — амплитуда результирующего колебания:

$$A_{\text{рез}} = 2E_0 \cdot \cos \omega \frac{r_2 - r_1}{2v} = 2E_0 \cdot \cos \frac{\pi \cdot \Delta r}{\lambda},$$

где $\Delta r = r_2 - r_1$ называется разностью хода лучей 1 и 2.

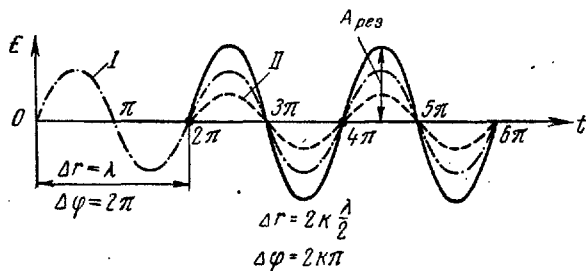


Рис. 181

Если $\cos \frac{\pi \cdot \Delta r}{\lambda} = 1$ — результирующая амплитуда $A_{\text{рез}}$ максимальна, то в точке K — имеем свет. Это соответствует тому, что $\frac{\pi \cdot \Delta r}{\lambda} = k\pi$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ В этом случае

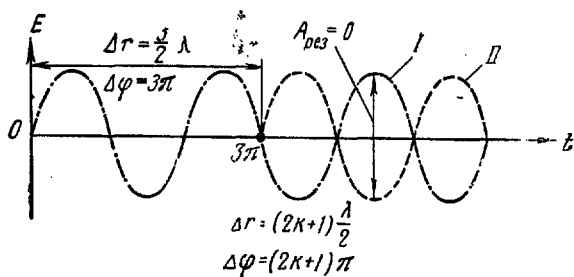


Рис. 182

разность фаз $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ складываемых колебаний I и II (рис. 181)

$$\Delta \varphi = \omega \left(t - \frac{r_1}{v} \right) - \omega \left(t - \frac{r_2}{v} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta r = 2k\pi, \quad (1)$$

а разность хода (рис. 181)

$$\Delta r = r_2 - r_1 = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Если $\cos \frac{\pi \cdot \Delta r}{\lambda} = 0$, то $A_{\text{рез}} = 0$ (в точке K имеем *темноту*). Тогда

$$\frac{\pi \cdot \Delta r}{\lambda} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}$$

и разность фаз

$$\Delta\varphi = (2k + 1)\pi,$$

а разность хода (рис. 182)

$$\Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, *максимальная освещенность* соответствует разности хода

$$\Delta r = 2k \frac{\lambda}{2} \text{ — кратной четному числу полуволн (или } \Delta\varphi = 2k\pi \text{ — кратной полному периоду).}$$

Минимальная освещенность соответствует разности хода

$$\Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ — кратной нечетному числу полуволн (или } \Delta\varphi = (2k + 1)\pi \text{ — кратной полупериоду).}$$

Работа № 59

Определение длины волны монохроматического света с помощью интерференции от двух щелей

Приборы и принадлежности: двойная щель, осветитель, отсчетный микроскоп, тонкая линза с фокусным расстоянием 10—15 см, матовый экран, набор светофильтров, оптическая скамья с ползушками, масштабная линейка.

Теория метода и описание установки. Определение длины световой волны можно произвести при помощи установки, схема которой дана на рис. 183, а. На рисунке — свет выходит из осветителя O и щели S . Линза L' фокусирует лучи на двойную щель SS , картина интерференции от двух щелей рассматривается на экране \mathcal{E} (со шкалой) микроскопом M .

Световые лучи от щелей S_1 и S_2 пропускают через различные светофильтры F и определяют длину монохромати-

ческого света. Длину волны λ можно найти, используя подобие треугольников (см. рис. 180). Из рисунка имеем:

$$\frac{\Delta r}{d} = \frac{y_k}{L},$$

где y_k — расстояние максимума и минимума порядка k от O_1 , L — расстояние от двойной щели до экрана \mathcal{E} , d — расстояние между центрами щелей S_1 и S_2 (вместо S_1P берем d , так как угол φ очень мал).

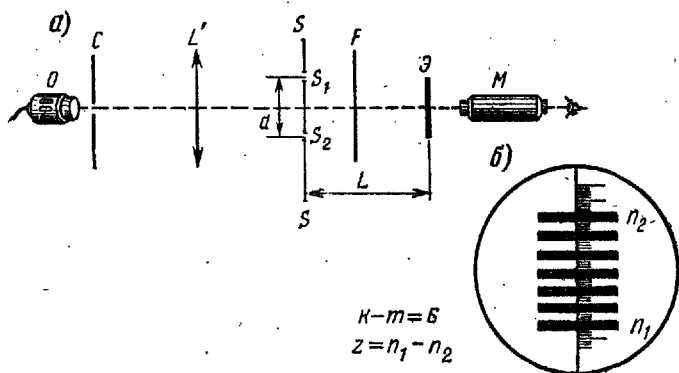


Рис. 183

Так как для минимума $\Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ [формула (2)],

то

$$y_k = \frac{L}{d} (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Для другого минимума (порядка m) будет аналогично:

$$y_m = \frac{L}{d} (2m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Расстояние между k -й и m -й темными полосами

$$z = y_k - y_m = \frac{L}{d} (k - m) \lambda$$

и длина волны

$$\lambda = \frac{zd}{L(k - m)}, \quad (3)$$

где $(k - m)$ равно числу светлых полос, заключенных между рассматриваемыми темными полосами, z — деления на экране на этом участке (рис. 183, б).

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Выбираются в схеме (рис. 183, а). Устанавливают один из светофильтров. Смотрят в микроскоп M и изменяют ширину щели C до тех пор, пока не увидят на экране \mathcal{E} интерференционную картину.

2. Измеряют z по делениям на экране равное $(k - m)$ — числу светлых полос, заключенных между темными полосами. По делениям на экране $z = n_1 - n_2$.

3. По формуле (3) вычисляют λ для трех светофильтров. Значения d и L указаны на приборе.

Результаты измерений записывают в отчете следующим образом:

Цвет светофильтра	$k - m$	$z = n_1 - n_2$	λ
1			
2			
3			

Работа № 60

Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

Принадлежности: осветитель, выпуклая линза, плоскопараллельная пластинка, объектив, экран, фильтр.

Теория метода и описание установки. При прохождении монохроматического света через систему, состоящую из плотно прижатых друг к другу плоскопараллельной пластины и выпуклой линзы на экране, поставленном за этой системой, наблюдается интерференционная картина, представляющая собой чередование светлых и темных колец Ньютона.

1. Известно, что: 1) геометрическая разность хода лучей

$$\Delta r = r_2 - r_1;$$

2) оптическая разность хода лучей, если лучи проходят в среде с показателем преломления $n \neq 1$,

$$\delta = \Delta r \cdot n = (r_2 - r_1) n = r_2 n - r_1 n,$$

где $r_1 n$ и $r_2 n$ — оптические длины пути;

3) при отражении от оптически более плотной среды световая волна (вектор E) теряет полволны $\frac{\lambda}{2}$. Эта потеря полволны равносильна увеличению оптической длины пути на $\frac{\lambda}{2}$ и учитывается при вычислении δ ; 4) условия интерференции:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для максимума } \delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \\ \text{для минимума } \delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \end{array} \right\} k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Интерференция света в природе наблюдается на поверхности тонких пленок: мыльных, нефтяных или масляных на поверхности воды.

II. Рассмотрим интерференцию на тонкой пленке.

Луч AB (рис. 184) падает на верхнюю поверхность пленки MM' . При этом получаются отраженный луч BC и преломленный — BD . На поверхности NN' луч BD тоже отражается (луч DK) и преломляется. В точку K всегда попадет какой-то луч LK (2), принадлежащий световому пучку.

Лучи KC' (1) и KC'' (2) когерентны. При наложении они либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от их оптической разности хода, которая будет равна $\delta = n \cdot \Delta r$:

$$\delta = (BD + DK) n - \left(EK + \frac{\lambda}{2} \right) n_0 = (BD + DK) n - \left(EK + \frac{\lambda}{2} \right),$$

где n — показатель преломления вещества пленки, а $\frac{\lambda}{2}$ — потеря полволны лучом LK при отражении от пленки MM' .

* Показатель преломления $n_0 = 1$, так как луч EK проходит в воздухе.

III. Аналогично получаются и кольца Ньютона. Здесь роль тонкой пленки выполняет воздушная прослойка между выпуклой поверхностью линзы и плоскопараллельной пластинкой. Разность хода лучей (рис. 185)

$$\delta = (BD + DK) + \frac{\lambda}{2}.$$

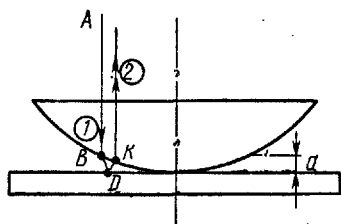


Рис. 185

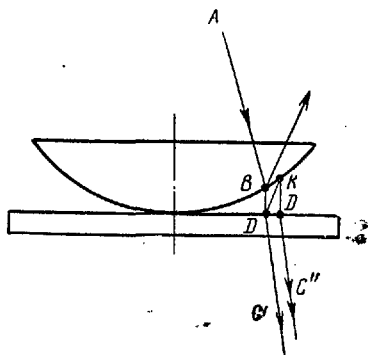


Рис. 186

Ввиду того что толщина воздушной прослойки d очень мала, $BD \approx DK \approx d$ и $\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$.

Кольца Ньютона можно наблюдать и в проходящем свете (рис. 186): Лучи BC' и KC'' будут когерентны. Разность хода у них будет:

$$\delta = 2d + 2 \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

В нашей работе кольца Ньютона наблюдаются в проходящем свете. Рассмотрим треугольник OBM (рис. 187); $OB = R$ — радиус кривизны линзы, $MB = r$ — радиус кольца Ньютона:

$$OB^2 = BM^2 + MO^2$$

или

$$R^2 = r^2 + (R - d)^2;$$

$$R^2 = r^2 + R^2 - 2dR + d^2.$$

Так как $d \ll R$, величиной d^2 можно пренебречь, тогда

$$2dR = r^2, \text{ отсюда } d = \frac{r^2}{2R}.$$

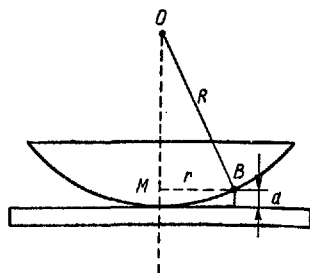


Рис. 187

Подставим это значение d в формулу (4), получим:

$$\delta = \frac{r^2}{R} + 2 \frac{\lambda}{2}.$$

Для темных колец $\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ и

$$\frac{r^2}{R} + 2 \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; \quad \frac{r^2}{R} = k\lambda - \frac{\lambda}{2}.$$

Для m темного кольца формула запишется так:

$$\frac{r_m^2}{R} = m\lambda - \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Для k темного кольца

$$\frac{r_k^2}{R} = k\lambda - \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Вычтем из уравнения (5) выражение (6), получим:

$$\frac{r_m^2 - r_k^2}{R} = (m - k) \lambda,$$

откуда

$$\lambda = \frac{(r_m + r_k)(r_m - r_k)}{(m - k)R}. \quad (7)$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Собрать установку по схеме (рис. 188). На схеме S — источник

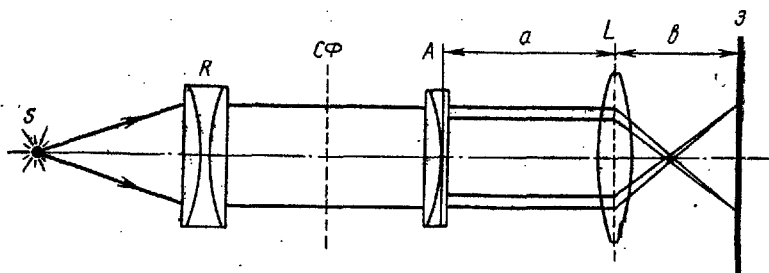


Рис. 188

света, K — конденсор, $СФ$ — светофильтр, A — устройство для получения колец Ньютона (линза и стеклянная пластинка), L — линза, $Э$ — экран.

2. Добиться на экране $Э$ четкого изображения колец Ньютона.

3. Измерить радиусы видимых на экране темных колец Ньютона. Картина, полученная на экране, есть увеличенное изображение действительных колец Ньютона. Радиусы действительных колец можно вычислить, зная увеличение, которое дает объектив:

$$\frac{r}{r'} = \frac{a}{b}, \quad \text{отсюда} \quad r = \frac{a}{b} r',$$

где r' — радиус измеренного на экране кольца, r — радиус действительного кольца Ньютона, a — расстояние от колец Ньютона до объектива, b — расстояние от объектива до экрана.

4. По формуле (7) рассчитать радиус кривизны линзы. Наблюдения и вычисления записывают в таблицу.

Номер кольца	r' измеренный	r действительный	a	b	λ

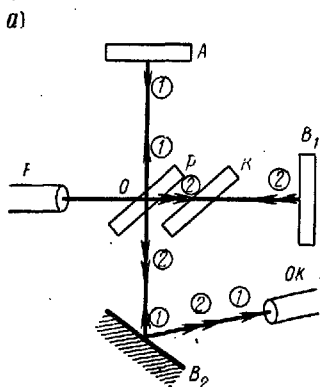
Работа № 61

Определение качества обрабатываемой поверхности интерферометром Линника

Приборы и принадлежности: микроинтерферометр Линника (МИИ-5), исследуемые образцы.

Теория метода и описание установки. Для изучения чистоты обрабатываемой поверхности и измерения глубины царапины на ней служит микроинтерферометр Линника. В основе работы прибора положен метод интерференции лучей от эталонного образца — гладкого зеркала B_1 (рис. 189, a) и исследуемой поверхности A . Картина интерференции наблюдается в окуляре Ok . На рис. 189, a лучи от источника F падают на полупрозрачную пластинку P и разделяются на два луча. Луч 1 попадает на исследуемый образец A и отражается от него. Луч 2 падает на эталонный образец — зеркало B_1 и также отражается. Лучи 1 и 2 вновь соединяются на пластинке P и зеркалом B_2 направляются

в окуляр Ok . Так как луч 1 проходит пластинку P дважды, то для компенсации разности хода для луча 2 на пути луча 2 поставлена такая же пластинка K . Если поверхности A и B_1 одинаковы и плечи интерферометра OA и OB_1 подобраны соответствующим образом, то в монохроматическом свете наблюдаемая картина интерференции представляет собой систему светлых и темных полос. В белом свете картина интерференции имеет следующий вид: в центре наблюдается белая полоса, по обе стороны которой расположены две черные полосы с цветными каймами, и дальше по 3—4 цветные полосы с каждой стороны. Переход от одной светлой (или темной) полосы к другой светлой (или темной) соответствует разности хода Δr между лучами 1 и 2 на целую длину волны λ . Для темных полос $\Delta r = 0; \frac{1}{2}\lambda; \frac{3}{2}\lambda, \dots$



Если на исследуемом образце имеется царапина глубиной в $\frac{\lambda}{2}$, то возникает добавочная разность хода, равная целой волне λ , так как свет проходит бороздку дважды. Это вызовет искривление интерференционной полосы на величину, равную расстоянию между интерференционными полосами a . На рис. 189, б:

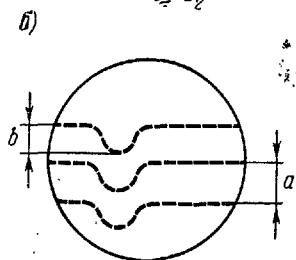


Рис. 189

a — расстояние между темными полосами интерференции, b — глубина искривления полосы (на рисунке $a \neq b$). На этом и основано измерение глубины царапины интерферометром. Глубина царапины

$$d = \frac{b}{a} \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Измерения и обработка результатов измерения. В данной работе применяется интерференционный микроскоп МИИ-5 (рис. 190). Измерения проводят следующим образом.

1. Включают осветитель F и кладут образец на столик A исследуемой поверхностью вниз.

2. Поворачивают рукоятку K так, чтобы указатель (стрелка) стоял вертикально и вращением микрометрического винта M фокусируют прибор на исследуемую поверхность, наблюдая в окуляр O_k .

3. Поворачивают рукоятку K так, чтобы указатель стоял горизонтально. В этом случае включается эталонное зеркало и наблюдаются интерференционные полосы. Таким образом, изображение интерференционных полос и изображение исследуемой поверхности образца наблюдаются в фокальной плоскости окуляра и налагаются друг на друга.

4. Вращением винта M добиваются четкой фокусировки картины полос и поверхности образца. Для получения большей контрастности полос уменьшают отверстие опертурной диафрагмы.

5. Вращая столик A , устанавливают интерференционные полосы перпендикулярно царапинам на поверхности образца.

6. Измеряют расстояние a между интерференционными полосами и величину искривления полос b (рис. 191, a и b).

При измерении поступают следующим образом.

а) Шкалу окулярного микрометра установить так, чтобы в поле зрения одна из линий креста нитей C была параллельна интерференционным полосам (рис. 191, a и b).

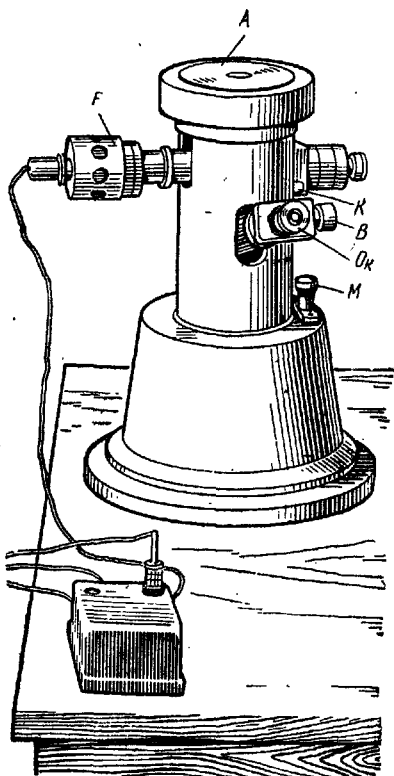
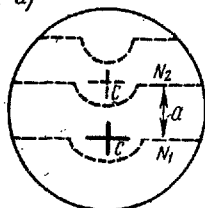


Рис. 190

б) Совмещают одну из параллельных нитей C с интерференционной полосой и измеряют показания N_1 по винту и барабану окулярного микрометра (рис: 191, а).

в) Вращая барабан микрометра, перемещают крест нитей C до следующей интерференционной полосы (пунктир на рис. 191, а) и измеряют показания N_2 по окулярному микрометру. Расстояние между полосами:

а)

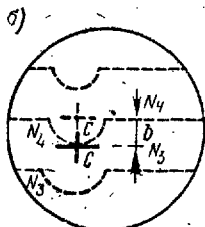


$$a = N_2 - N_1$$

$$a = N_1 - N_2.$$

Точно так же измеряется глубина искривления полос b (рис. 191, б). Глубина искривления полос

$$b = N_3 - N_4.$$



$$b = N_3 - N_4$$

7. Подставляя в формулу (8) значения a и b , вычисляют глубину царапин d :

$$d = \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где λ — длина волны света (светофильтра).

Если измерения проводят в белом свете, измерения проводят по двум черным полосам и принимают $\lambda = 0,55$ мкм. Формула (9) примет вид:

$$d = 0,27 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2}$$

Проделать измерения глубины d для трех царапин, измеряя глубину каждой царапины в нескольких местах по ее длине. Результаты записывают в таблицу.

№ п/п	1-я царапина			2-я царапина			3-я царапина		
	a	b	d	a	b	d	a	b	d
1			×			×			×
2									
3									
Среднее значение									

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Введение. Явление дифракции света заключается в отклонении световых волн от прямолинейного пути в случае прохождения света через малые отверстия или мимо малого непрозрачного экрана (препятствия) в оптически однородной среде.

Дифракция световых волн практически наблюдается, если размеры отверстий или препятствий одного порядка с длиной световых волн или если место наблюдения дифракции находится на большом расстоянии от отверстия или препятствия. Дифракция, так же как и явление интерференции, характерно для волнового процесса.

Дифракция света разделяется на два случая.

1. Преграда или отверстие, на котором происходит дифракция света, находится на конечном расстоянии от экрана, на котором производится наблюдение (дифракция Френеля). В этом случае имеем дифракцию сферических световых волн.

2. Дифракция наблюдается для плоских световых волн — в параллельных лучах (дифракция Фраунгофера). В этом случае дифракционная картина наблюдается только с помощью линзы, собирающей лучи в фокальной плоскости, или глазом, аккомодированным на бесконечность.

При расчетах дифракционных явлений пользуются особым приемом, который предложил Френель, называемым принципом Гюйгенса — Френеля. Принцип Гюйгенса — Френеля представляет собой естественное развитие принципа Гюйгенса. Принцип Гюйгенса формулируется так: *каждая точка волновой поверхности* световых волн является источником вторичных (элементарных) волн. Огибающая поверхность вторичных волн будет новым положением волновой поверхности, распространяющейся световой волны* (рис. 192).

На рис. 192, а — образование плоской волны, на рис. 192, б — сферической: *I* — старое положение волновой поверхности — фронта волны, *II* — новое положение, *A* — вторичные (элементарные) световые волны с центрами в точ-

* Поверхность, представляющая собой геометрическое место точек, колебания в которых совершаются в одинаковых фазах. В изотропной среде волновая поверхность совпадает с фронтом волны.

ках b, b_1, b_2, \dots, l — световые лучи — направление распространения волн.

Принцип Гюйгенса решает задачу о распространении волнового фронта, но не решает задачу об интенсивности волн (элементарных — A), которые идут в различных направлениях. Принцип Гюйгенса — Френеля рассматривает интенсивность результирующей волны как результат интерференции вторичных волн. Таким образом, принцип

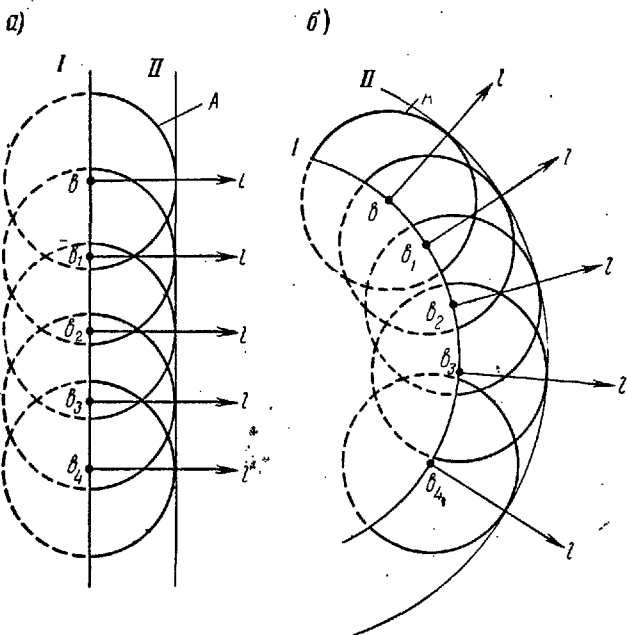


Рис. 192

Гюйгенса — Френеля представляет собой соединение принципа Гюйгенса (распространение волнового фронта) с высказыванием Френеля об интерференции элементарных волн, который приводит к тому, что при распространении в пространстве световых волн свет будет наблюдаться только там, где вторичные волны при интерференции усиливают друг друга.

Интерференция вторичных волн, по Френелю, происходит следующим образом: пусть из точки S (рис. 193) распространяется сферическая волна. Окружим источник световых

волн воображаемой поверхностью PP и будем считать ее за источник световых волн. В точку C , находящуюся на расстоянии r_0 от поверхности PP , будет приходить излучение от бесконечно малых элементов dS поверхности PP (рис. 193). Излучения элементов dS можно рассматривать как вспомогательные когерентные источники, поэтому в точке C вторичные волны, исходящие из dS , будут интерферировать между собой и их совокупное действие определяется в точке C как интерференционный эффект. В точке C будем наблюдать свет только в том случае, если вторичные волны от dS при интерференции усиливают друг друга.

В тех же местах, где вторичные волны при сложении гасят друг друга, будет темнота. Принцип Гюйгенса — Френеля имеет общее значение и служит для объяснения различных световых явлений, в том числе и для объяснения прямолинейного распространения света. Принцип Гюйгенса — Френеля является лишь приемом для расчетов направления распространения волн и распределения их интенсивностей по различным направлениям, вторичные волны являются фиктивными.

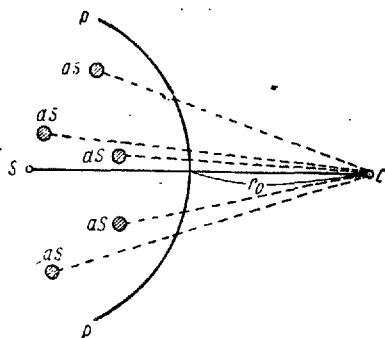


Рис. 193

Применяя принцип Гюйгенса к световым волнам и пользуясь методом зон Френеля, можно строго математически доказать, что в точку C (рис. 193) световая волна распространяется очень узким пучком (практически лучом), т. е. доказать, что свет распространяется прямолинейно.

При рассмотрении дифракции Фраунгофера (дифракции плоских волн) имеем два случая: 1) дифракция на дифракционной решетке, 2) дифракция на узкой щели.

1. Наиболее интересный случай дифракции осуществляется при использовании *дифракционных решеток*. Простейшая дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой с помощью точной делительной машины нанесены параллельные друг другу царапины и оставлены узкие неповрежденные полоски. Про-

царапанные места непрозрачны для света, и световые волны, подходя к решетке, огибают эти царапины.

Принято называть периодом решетки или постоянной решетки d сумму размеров прозрачной a и непрозрачной b полос: $d = a + b$ (рис. 194, а).

Если осветить дифракционную решетку RR пучком когерентных параллельных лучей, падающих перпендикулярно к поверхности решетки, то наблюдается следующее явление.

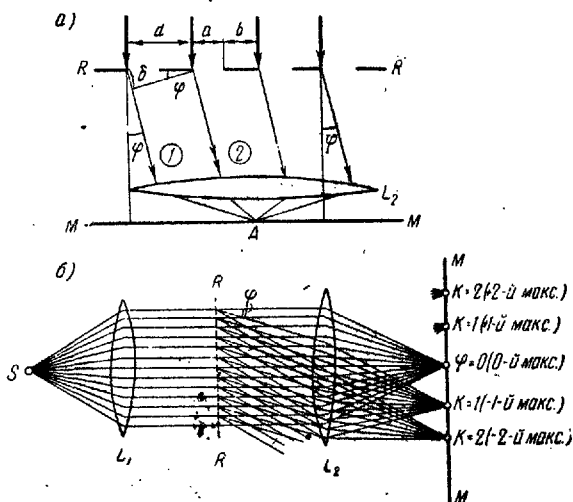


Рис. 194

Свет, проходя через узкие прозрачные полосы решетки RR , испытывает дифракцию, т. е. отклоняется в сторону от своего первоначального направления. Отклонение лучей происходит под разными углами (на рис. 194, а показано отклонение лучей для одного угла дифракции φ).

Так как каждую щель дифракционной решетки можно считать самостоятельным источником когерентных колебаний, то на экране MM в фокальной плоскости линзы L_2 будет происходить сложение многочисленных пучков лучей, приходящих в различные точки экрана с различными фазами колебаний (на рис. 194, а дана только одна точка A для угла φ , на рис. 194, б показана картина для большего числа лучей). Другими словами, вследствие явления диф-

ракции (отклонения лучей на различные углы φ) произойдет интерференция световых лучей.

Если источник света испускает свет различных длин волн, то в результате интерференции на экране появятся изображения щелей решетки, окрашенные в различные цвета (максимумы света). Если же источник света дает монохроматическое излучение — свет одной длины волны (такой свет можно получить, если поставить на пути лучей светофильтр), то изображения щелей на экране (световые максимумы) будут окрашены в один цвет — цвет светофильтра.

Кроме цветных изображений щелей наблюдаются еще и темные полосы — места, где в результате интерференции произошло полное гашение световых волн (световые минимумы).

Вся картина на экране — совокупность максимумов — носит название дифракционных спектров. Условие возникновения максимумов света определяется из соотношения:

$$d \cdot \sin \varphi = \delta,$$

где δ — разность хода лучей 1 и 2 (рис. 194, а).

Если δ кратна целому числу волн, т. е. $\delta = k\lambda$, то имеем максимум света в точке А на экране, и формула примет вид:

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

где d — постоянная дифракционной решетки, или период решетки, φ — угол дифракции, k — целое число, порядок спектра, номер спектра по отношению к нулевой (центральной) полосе ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$; рис. 194, б), λ — длина волны монохроматического света.

Решая уравнение (1) относительно λ , получим:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}. \quad (2)$$

Это выражение является основной расчетной формулой для вычисления длин световых волн при помощи дифракционной решетки и называется формулой дифракционной решетки.

Анализ формулы (2) показывает, что для различных длин волн положение световых максимумов будет разное. Следовательно, дифракционная решетка является прибором, разлагающим белый свет на составные части; с ее помощью получается дифракционный спектр.

Схематический вид дифракционных спектров дан на рис. 195. При $k = 0$ условие максимума удовлетворяется

для всех длин волн, т. е. при $\varphi = 0$ наблюдается центральная светлая нулевая полоса, соответствующая неотклоненному пучку лучей такого цвета, каков был цвет источника.

При $k = 1$ симметрично по обе стороны от центральной полосы получаются дифракционные цветные линии, от фиолетовой до красной, соответствующие разным длинам волн, входящим в состав смешанного света. Эта группа линий называется спектром 1-го порядка. Красная часть спектра отклонена больше, чем фиолетовая.

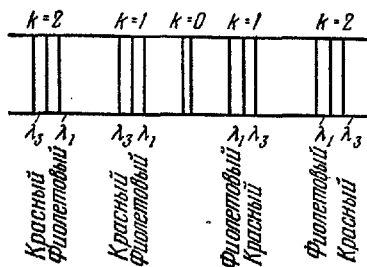


Рис. 195

При $k = 2$ получается подобная же группа линий — спектр 2-го порядка и так далее.

Линии спектров высоких порядков менее интенсивны, и практически ясно наблюдаются спектры не выше 3-го порядка.

2. В случае *одной щели* будем иметь дифракцию от щели. Условие *максимума* в этом случае будет:

$$b \cdot \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

где k — порядок дифракционного максимума (порядок спектра), b — ширина щели, φ — угол дифракции. При $\Delta\varphi = 0$ имеем центральный максимум нулевого порядка.

Работа № 62

Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки

Приборы и принадлежности: проекционный фонарь, дифракционная решетка, экран с миллиметровым масштабом, измерительная линейка, набор светофильтров, гониометр, разрядная газонаполненная трубка (неон или азот), индукционная катушка.

Теория метода и описание установки. Рассмотрим один из методов определения длины световой волны при помощи дифракционной решетки. Этот метод, схема установки ко-

того показана на рис. 196, заключается в том, что дифракционный спектр рассматривают непосредственно на экране MM без помощи линзы L_2 . Роль линзы L_2 выполняет хрусталик глаза, который фокусирует параллельные лучи, полученные в результате дифракции (например, лучи 1 и 2 на рис. 194, а) на сетчатой оболочке глаза.

На рис. 196: RR — дифракционная решетка, на которую падает параллельный пучок лучей из проекционного фонаря Φ , l — расстояние от дифракционной решетки до экрана MM , x — расстояние между средними точками полос одного и того же цвета для спектров 1-го, 2-го и т. д. порядков (на рисунке x_1 — расстояние между полосами фиолетового цвета для спектра 1-го порядка).

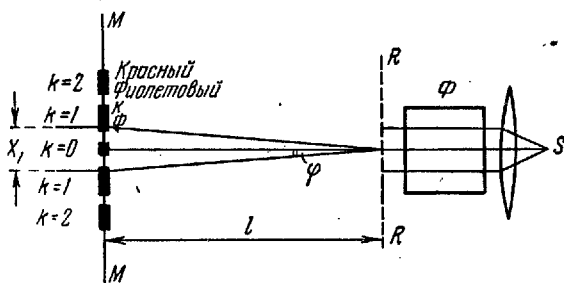


Рис. 196

Для определения длины волны λ в формуле (2) необходимо знать $\sin \varphi$. Так как $l \gg x$, то $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$ и тогда

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{2l} \quad (\text{из рис. 196}).$$

Подставляя значение $\sin \varphi$ в выражение (2), получим окончательную формулу для нахождения длины волны:

$$\lambda = \frac{xd}{2lk}. \quad (3)$$

Длины волн измеряют или в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ мм}$) или в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$).

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Включают лампочку проекционного фонаря в сеть переменного тока.

2. Устанавливают экран на таком расстоянии от дифракционной решетки, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной полосы и спектров 1-го и 2-го порядков.

3. Измеряют расстояние от экрана до дифракционной решетки l .

4. Измеряют линейкой на экране расстояние между серединами фиолетовых (или зеленых) полос — x_1 и между серединами красных полос — x_2 спектров 1-го порядка.

5. Таким же способом измеряют расстояния x_1 и x_2 для фиолетовых (или зеленых) и красных полос в спектре 2-го порядка.

6. Полученные значения l и x подставляют в формулу (3) и вычисляют длину волны красной линии спектров 1-го и 2-го порядков и длину волны фиолетовой (или зеленой) линии тех же спектров.

7. Все результаты наблюдений и вычислений записывают в таблицу.

Порядок спектра k	Расстояние между серединами фиолетовых или зеленых полос x_1	Расстояние между серединами красных полос x_2	l	$\lambda_{кр}$	$\lambda_{ф}$ (или $\lambda_{зел}$)
I					
II					
Среднее значение					

8. Между дифракционной решеткой и проекционным фонарем ставят различные светофильтры и наблюдают дифракционный спектр от монохроматического света.

Работа № 63

Определение длины волны и частоты ультразвука оптическим методом

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, осветитель, щель, собирающая линза, стеклянная ванночка с исследуемой жидкостью, кварцевая пластинка, генератор электрических колебаний, экран, масштабная линейка, ключ, набор светофильтров.

Вместо щели и собирающей линзы можно использовать коллиматор. Коллиматор — металлическая трубка, на одном конце которой имеется собирающая линза, на другом — щель, расположенная в фокусе линзы. Из коллиматора выходит параллельный пучок лучей.

Теория метода и описание установки. Ультругие колебания с частотой, превышающей 20 000 *гц*, принято называть ультразвуками. Для получения ультразвука чаще всего

используют обратный пьезоэлектрический эффект (см. работу № 32).

В данной работе определение длины волны и скорости ультразвука производят на следующей установке (рис. 197). Кварцевая пластинка S толщиной в 1 мм, грани которой обклеены станионом A , плотно прижата к стенке ванночки C , наполненной водой (можно также поместить пластинку при помощи держателя на поверхность воды ванночки или положить на дно ванночки).

От генератора электрических колебаний G (генератор питается от сети переменного тока через выпрямитель B)

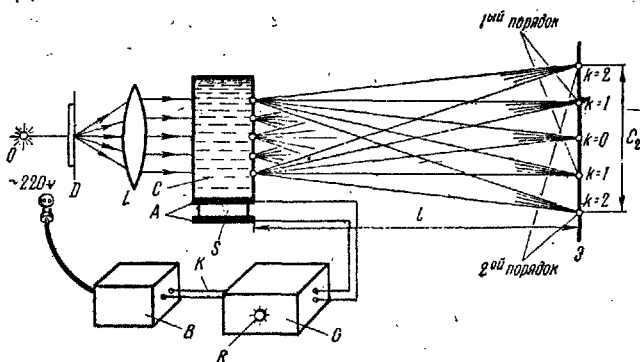


Рис. 197

на станиоль подается переменное электрическое поле, которое возбуждает колебания кварцевой пластинки на основной частоте или гармониках. Изменение частоты генератора производится ручкой управления генератора R (регулятор частоты). Колебания кварцевой пластинки (ультразвуковые колебания) проходят через стенку ванночки, распространяются в воде и, дойдя до противоположной стенки ванночки, отражаются. В результате интерференции проходящей и отраженной волн внутри жидкости устанавливается продольная стоячая ультразвуковая волна. Ультразвуковые волны образуют в воде периодические сжатия и разрежения, которые вызовут в жидкости неоднородное распределение плотности. В местах, где ультразвуковая волна вызовет сжатие, показатель преломления увеличится, в местах же разрежения — уменьшится.

Таким образом, в ванночке C установится состояние жидкости с периодическим расположением мест с различной плотностью, причем расстояние между соседними местами наибольшей (или наименьшей) плотности будет равно длине ультразвуковой волны. Прозрачная среда — вода в ванночке — станет оптически неоднородной и будет подобна объемной дифракционной решетке.

Постоянная дифракционной решетки d , т. е. сумма ширины щели прозрачного и непрозрачного промежутков, равна длине ультразвуковой волны $d = \lambda_{зв}$. Если пропустить через такую решетку свет, то можно получить на экране дифракционную картину (рис. 197). На рис. 197:

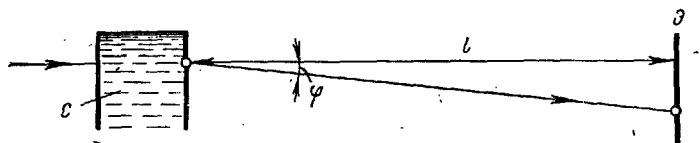


Рис. 198

O — источник света, D — щель, расположенная в фокусе линзы L . Из линзы выходит параллельный пучок лучей, который проходит через ванночку с водой под прямым углом к направлению ультразвуковых волн.

Так как вода под действием ультразвука становится подобной дифракционной решетке, то на экране E получится картина дифракционных спектров. Если свет белый, то цвет линий спектров будет соответствовать окраске линий призматического спектра, для монохроматического света окраска дифракционных спектров будет соответствовать цвету светофильтра.

Условие возникновения максимумов света на экране определяется из соотношения

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda,$$

где d — период дифракционной решетки, в данном случае равный длине ультразвуковой волны, k — порядок (номер) спектра по отношению к нулевой (центральной) полосе (на рис. 197 два порядка: $k = 1$ и $k = 2$, симметрично расположенные по отношению к нулевой полосе $k = 0$), φ — угол дифракции — угол между первоначальным направлением луча света (до прохождения через ванночку с водой)

и отклоненным лучом (после прохождения ванночки (рис. 198). Угол φ зависит от порядка спектра, λ — длина волны падающего света.

Из формулы (2) находим длину ультразвуковых волн ($d = \lambda_{зв}$):

$$\lambda_{зв} = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}. \quad (4)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Располагают приборы на оптической скамье P . Она представляет собой два направляющих параллельных металлических стержня или одну направляющую рейку, на которой имеются ползунки с различными держателями и фонарь

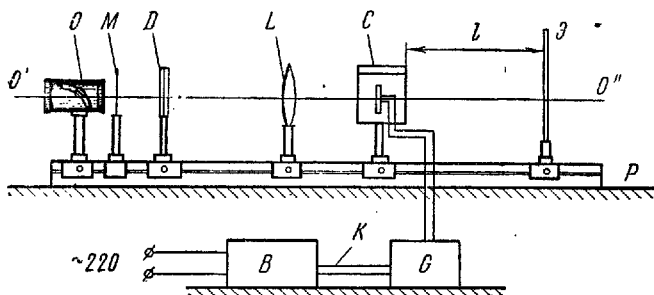


Рис. 199

с осветителем O (рис. 199). Приборы располагают перпендикулярно к оптической оси $O'O''$ таким образом, чтобы ось $O'O''$ проходила через середины щели D светофильтра M , линзы L и ванночки C (вместо линзы L и щели D можно поставить коллиматор). Положение щели D и линзы L указывается преподавателем.

2. Замыкая ключ K , вводят в действие генератор электрических колебаний G , питаемый от источника B .

3. Включают в сеть лампочку осветителя O .

4. Устанавливают экран на таком расстоянии l от края ванночки, чтобы на нем получилась четкая картина дифракционных спектров и нулевой полосы.

5. Измеряют масштабной линейкой на экране расстояние C_2 от середин спектров одинакового порядка и расстояние l от экрана до края ванночки, например для $k = 2$ (как на рис. 197).

Если пользоваться белым светом, то C_2 — расстояние между серединами полос одного и того же света в спектре одного и того же порядка, например между серединами полос желтой линии в спектре второго порядка.

6. По формуле (4) вычисляют длину ультразвуковой волны

$$\lambda_{зв} = \frac{k\lambda}{\sin \varphi},$$

где $k = 1, 2, 3$ в зависимости от порядка спектра, λ — длина монохроматического света, соответствующая поставленному светофильтру (написана на светофильтре M):

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{C_2}{2l}$$

и окончательно

$$\lambda_{зв} = \frac{k\lambda \cdot 2l}{C_2}.$$

7. Вычисление длины звуковой волны проводят несколько раз для спектров различных порядков и для различных светофильтров.

8. По формуле (1) находят частоту колебаний кварцевой пластинки, т. е. частоту ультразвука, принимая $v = 1500$ м/сек (скорость распространения ультразвука в воде), а $\lambda = \lambda_{зв}$ берут из предыдущих вычислений.

Все полученные опытным и вычислением результаты записываются в таблицу.

№ п/п	k	λ	l	C_2	$\lambda_{зв}$	$\nu_{зв}$	$\Delta\lambda_{зв}$	$\frac{\Delta\lambda_{зв}}{\lambda_{зв}} \cdot 100\%$
1								X
2								
3								
Среднее значение				X				

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Введение. Световые волны — волны поперечные. Они характеризуются не только энергией, которую несут, и длиной волны, но и направлением колебаний векторов напряженностей переменных электрического E и магнитного H полей.

Свет, в котором векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} имеют всевозможные направления колебаний, называется естественным. Естественный свет от Солнца, лампы накаливания и т. п. Это хаотическое изменение направлений плоскости колебаний векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} обусловлено тем, что мы одновременно наблюдаем излучения миллиарда атомов, и естественный свет является по сути дела наложением бесчисленного количества линейно поляризованных волн. Плоскость колебаний вектора \mathbf{E} (а следовательно, и вектора \mathbf{H}) в естественном свете непрерывно меняется (рис. 200, а). Если колебания вектора \mathbf{E} происходят в одной плоскости (а следовательно, и вектора \mathbf{H}), то волна называется плоскополяризованной (рис. 200, б).

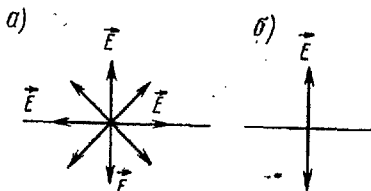


Рис. 200

Плоскость, в которой происходят колебания вектора \mathbf{E} , называется плоскостью колебаний. Произвести поляризацию света, т. е. отобрать из естественного света составляющие вектора \mathbf{E} , колеблющиеся в какой-то определенной плоскости, можно различными способами.

1. Поляризация при отражении от поверхности диэлектрика. Электромагнитная волна, падая на вещество — диэлектрик, вызывает колебания в атомах и молекулах вещества.

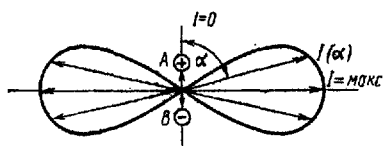


Рис. 201

Атомы и молекулы становятся сами излучателями электромагнитных волн (вторичных). Эти вторичные волны излучаются электронами, колеблющимися в атомах и молекулах диэлектрика, причем направление колебаний электронов совпадает с направлением колебаний электрического вектора \mathbf{E} падающей волны. Интенсивность I излучения электронами вторичных волн зависит от направления (рис. 201) оси диполя AB . В направлении оси диполя (колебания электрона) AB интенсивность равна нулю, в перпендикулярном — максимальна. Если преломленные и отраженные лучи составляют угол $\rho + \beta = \frac{\pi}{2}$ (рис. 202), то

кулах диэлектрика, причем направление колебаний электронов совпадает с направлением колебаний электрического вектора \mathbf{E} падающей волны. Интенсивность I излучения электронами вторичных волн зависит от направления (рис. 201) оси диполя AB . В направлении оси диполя (колебания электрона) AB интенсивность равна нулю, в перпендикулярном — максимальна. Если преломленные и отраженные лучи составляют угол $\rho + \beta = \frac{\pi}{2}$ (рис. 202), то

в отраженном луче будут полностью отсутствовать колебания вектора \vec{E} , происходящие в плоскости падения, так как происходят в направленной оси диполя AB , но зато эти колебания будут в преломленном луче (в плоскости рисунка эти колебания показаны стрелками). В отраженном луче колебания вектора \vec{E} будут происходить только в плоскости перпендикулярной рисунку (эти колебания показаны на рисунке точками), т. е. отраженный луч при определенном угле падения будет полностью поляризован. Угол ρ называется углом полной поляризации (рис. 202) или углом Брюстера. Для угла полной поляризации имеет место закон Брюстера

$$\operatorname{tg} \rho = n = \frac{\sin \rho}{\cos (90 - \beta)} = \frac{\sin \rho}{\cos \rho}, \quad (1)$$

где n — коэффициент преломления диэлектрика.

Преломленный луч будет частично поляризован. Для того чтобы преломленный луч был полностью поляризован, его пропускают через несколько плоскопараллельных пластинок диэлектрика,

например стеклянных (стопа Столетова).

2. Поляризация при двойном лучепреломлении. Явление двойного лучепреломления наблюдается в анизотропных средах (анизотропной средой называется среда, физические свойства которой в разных на-

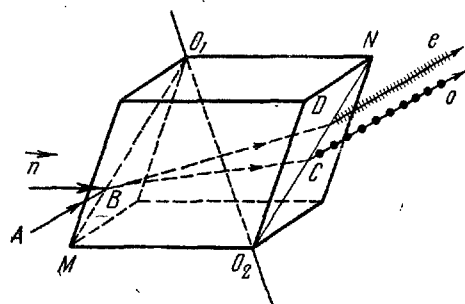


Рис. 203

правлениях различны). Анизотропной средой будут, например, кристаллы кварца и исландского шпата.

На рис. 203 показано прохождение света через кристалл исландского шпата. Прямая O_1O_2 называется кристаллографической осью кристалла (прямая, соединяющая противо-

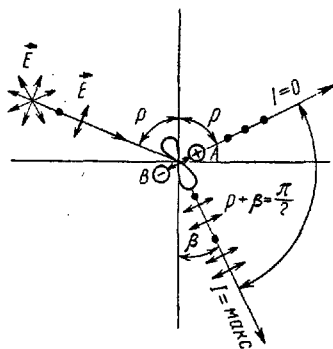


Рис. 202

положительные телесные тупые углы). Всякое направление в кристалле, параллельное O_1O_2 , называется оптической осью кристалла. Сечение MO_1NO_2 — главное сечение кристалла, или главная плоскость; это сечение проходит через оптическую ось и нормаль n , проведенную в точку B падения луча AB .

Естественный луч AB разделяется в кристалле на два луча: BD и BC . Луч BD называется необыкновенным лучом (e). Показатель преломления кристалла n_e для необыкновенного луча зависит от направления распространяющегося луча, и, следовательно, в различных направлениях необыкновенный луч в кристалле распространяется с различными скоростями. Луч BC называется обыкновенным лучом (o). Скорость его в кристалле не зависит от направления (рис. 204). Показатель преломления кристалла n_o для обыкновенного луча так же не зависит от направления его распространения. Для обыкновенного луча

$$n_o = \frac{c}{v_o}.$$

Для необыкновенного луча

$$n_e = \frac{c}{v_e},$$

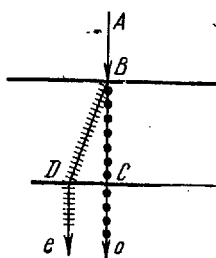


Рис. 204

где v_o — скорость обыкновенного луча, v_e — скорость необыкновенного луча в кристалле. Вдоль направления оптической оси двойного лучепреломления нет, так как $v_o = v_e$.

Оба вышедших из кристалла луча поляризованы. Колебания вектора E в луче BD совершаются в плоскости главного сечения кристалла (луч отмечен черточками), а в луче BC — в плоскости, перпендикулярной главному сечению (луч отмечен точками). Свойства обоих лучей, вышедших из кристалла, за исключением направления поляризации, абсолютно одинаковы.

Чтобы использовать такие поляризованные лучи для технических целей, их надо отделить один от другого. Это осуществляется в призме Николя $FAER$. Для изготовления призмы Николя естественный кристалл исландского шпата подпиливают определенным образом, затем кристалл распиливается по линии AR (рис. 205) и обе половины склеиваются «канадским бальзамом». Если на николю падает естественный свет, то в призме он раздваивается. Обыкновенный

венный луч I , дойдя до слоя канадского бальзама AR , в точке C испытывает полное внутреннее отражение (рис. 205), так как для обыкновенного луча канадский бальзам оптически менее плотен, чем исландский шпат, т. е.

$$n_{\text{и. ш}} > n_{\text{к. б.}}$$

Таким образом, обыкновенный луч отводится в сторону и поглощается в оправе Николя.

Необыкновенный луч 2 свободно проходит через слой канадского бальзама и выходит из призмы полностью поляризованным.

Устройства, при помощи которых получают поляризованный свет, называют поляризаторами.

Кроме двойного лучепреломления, для поляризации света применяются искусственные пленки — поляроиды,

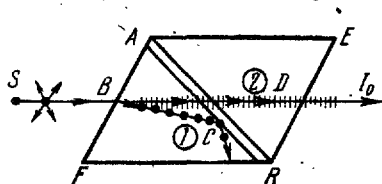


Рис. 205

представляющие собой целлюлоидные пленки, в которые введено большое количество герпатита (сернокислый иод — хинин). Такая пленка пропускает только необыкновенные лучи и поглощает обыкновенные.

3. Закон Малюса. Для анализа степени поляризации света применяются устройства, называемые *анализаторами*, в качестве которых используют те же самые поляризаторы (диэлектрики, призмы Николя, поляроиды). Если взять два поляроида (рис. 206, а): один поляроид P — поляризатор; из него выходит плоскополяризованный свет (вектор E колеблется по направлению PP), второй поляроид A — анализатор (колебания E по AA), то по закону Малюса интенсивность света I , выходящего из анализатора, пропорциональна квадрату косинуса угла α между направлением плоскостей колебаний (вектора E) поляризатора и анализатора, т. е.

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность света, выходящего из поляризатора P ; если I_0 — интенсивность естественного света, то

$$I_0 = \frac{I'_0}{2}. \quad (3)$$

Закон Малюса очень легко выводится. Интенсивности

$$I_0 = E_P^2; \quad I = E_A^2 \quad (\text{рис. 206, б}), \quad (4)$$

где E_P и E_A — амплитуды колебаний, прошедших анализатор и поляризатор. Из рисунка видно

$$E_A = E_P \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в (4), получим:

$$I = E_A^2 = (E_P \cdot \cos \alpha)^2 = E_P^2 \cdot \cos^2 \alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha.$$

Если направления плоскостей колебаний поляризатора и анализатора перпендикулярны $\alpha = 90^\circ$, то говорят, что

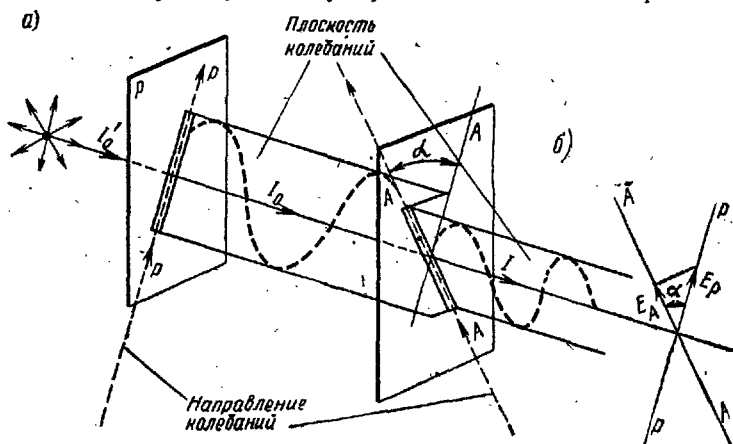


Рис. 206

поляризатор и анализатор скрещены (установлены на гашение света — через скрещенные поляризаторы свет не проходит). Если направления плоскостей поляризатора PP и анализатора AA совпадают $\alpha = 0$, то интенсивность проходящего света будет максимальной. Для любого другого угла α интенсивность света вычисляется по формуле (2).

Работа № 64

Изучение поляризации света при отражении от диэлектрика.
Проверка закона Малюса

Приборы и принадлежности: черные зеркала, фотоэлемент, гальванометр, поляроиды.

Теория метода и описание установки. В данной работе изучается поляризация света при отражении от диэлектрика и проверяется закон Малюса.

1. Изучение поляризации света при отражении от диэлектрика проводится на установке (рис. 207), в которой естественный свет от источника S падает на зеркало S_1 (диэлектрик) под углом Брюстера p . Отраженный луч AB является плоскополяризованным. Направление колебаний вектора E происходит в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа (на рисунке показан точками). Луч AB падает на зеркало S_2 и вторично отражается, попадая при отражении на фотоэлемент $\Phi Э$, жестко скрепленный с зеркалом S_2 . Сила фототока определяется по гальванометру G

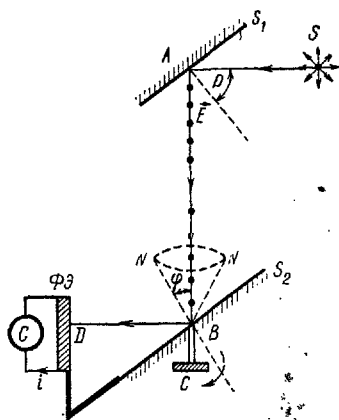


Рис. 207

и показывает интенсивность луча BD , отраженного от зеркала S_2 . Зеркало S_1 — поляризатор, S_2 — анализатор. При вращении зеркала S_2 вокруг луча AB винтом C будет изменяться ориентация плоскости падения луча AB на зеркало S_2 . Если плоскость падения * луча AB перпендикулярна к плоскости рисунка, т. е. совпадает с колебанием вектора E в луче AB , то по закону Брюстера интенсивность отраженного луча BD от зеркала S_2 будет равна нулю. Если же плоскость

падения будет в плоскости рисунка, то интенсивность отраженного луча от зеркала S_2 будет максимальной.

Измеряя углы φ поворота нормали N по отношению к плоскости колебаний вектора E , падающего света, и силу фототока i , в цепи фотоэлемента при этих углах, строят графики зависимости $i = f(\varphi)$.

2. Проверка закона Малюса проводится на установке (рис. 208), состоящей из источника естественного света S , поляроида P — поляризатора, поляроида A — анализатора. Анализатор может вращаться вокруг оси OO' . Поворачивая анализатор, изменяем интенсивность света, падающего на фотоэлемент $\Phi Э$, соединенный с гальванометром.

* Плоскостью падения называется плоскость, в которой лежит падающий луч AB и нормаль N , проведенная к поверхности в точке падения луча.

В зависимости от интенсивности света I сила фототока i в гальванометре G будет меняться. Свет, выходящий из поляризатора, плоскополяризован. Плоскость колебания вектора E показана направлением PP . Направления плоскости колебаний для анализатора — направление AA .

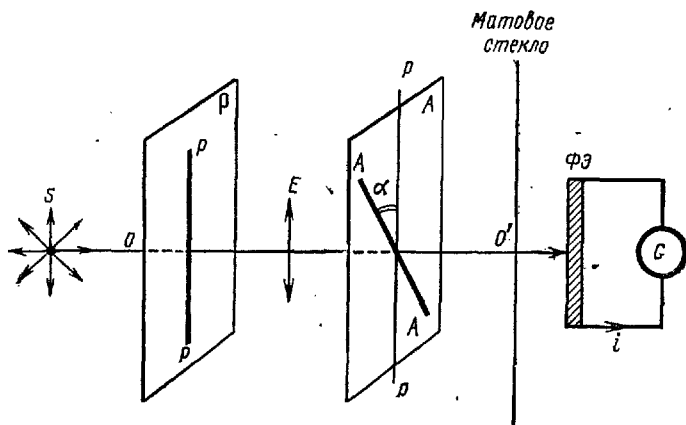


Рис. 208

В данном упражнении снимают графики зависимости фототока i от квадрата косинуса угла α , для чего поворачивают анализатор вокруг оси OO' и с того момента, как ток через гальванометр достигнет наибольшей величины, снимают показания тока через каждые 30° поворота анализатора. Отсчеты производят от 0 до 360° .

Работа № 65

Определение концентрации раствора сахара поляриметром

Приборы и принадлежности: поляриметр, трубки с раствором сахара, линейка.

Теория метода и описание установки. Некоторые так называемые «оптически активные» вещества, например раствор сахара, обладают способностью вращать (поворачивать) плоскость колебаний поляризованного луча света.

Пусть два николя *I* и *II* перекрещены и не пропускают света (рис. 209); поместим между ними слой раствора сахара. Тогда плоскость колебаний поляризованного луча, вышедшего из николя *I*, при прохождении раствора сахара повернется на некоторый угол φ . Плоскость колебаний луча, падающего на николь *II*, уже не будет перпендикулярна его главному сечению; через николь *II* будет частично проходить свет. Чтобы николь *II* опять не пропускал свет, его надо повернуть на некоторый угол φ вслед за повернутой плоскостью колебаний луча, прошедшего через раствор сахара.

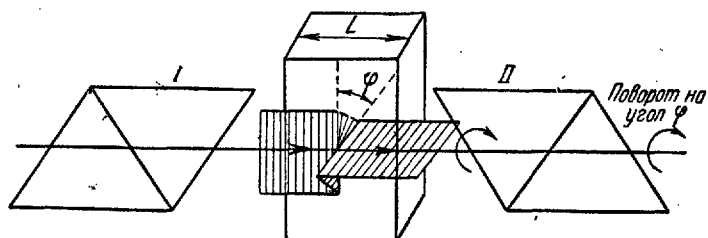


Рис. 209

Угол поворота плоскости колебаний пропорционален толщине слоя раствора и его концентрации

$$\varphi = K l C,$$

где φ — угол поворота плоскости колебания, K — постоянная прибора, l — толщина слоя раствора, C — концентрация раствора. Отсюда

$$C = \frac{\varphi}{K l}. \quad (6)$$

Итак, для нахождения концентрации раствора сахара достаточно измерить угол вращения плоскости колебаний луча света, проходящего через слой этого раствора определенной толщины; кроме того, необходимо знать значение постоянной прибора.

В данной работе используется прибор, называемый поляриметром (рис. 210). Его основные части: два николя *I*

и II, расположенные в металлической трубке, поддерживаемой штативом. На николю I падает естественный луч света от источника. Поляризованный луч света падает на николю II, который может поворачиваться при помощи кремальеры (винта) R вокруг оси прибора. Углы поворота николя II отсчитываются при помощи нониуса по разделенному градусному лимбу.

Установить николи в положения перекрещивания по наблюдениям изменения интенсивности прошедшего через них света с большой точностью очень трудно. Поэтому для повышения точности наблюдений в поляриметр вводятся

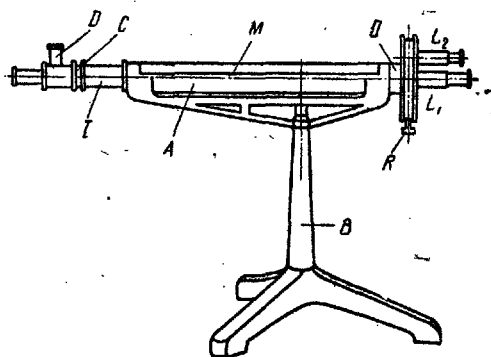


Рис. 210

добавочные оптические части. Поле зрения в таком поляриметре кажется разделенным на две половины.

Второй николю вращают до тех пор, пока обе половины поля зрения не покажутся одинаково затемненными. Часть стенки корпуса прибора может откидываться на петлях. Во внутреннюю часть корпуса помещают поочередно трубки с испытуемыми растворами сахара. Трубки имеют две длины: 1 и 2 дм.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Включают источник света.

2. Откидывают стенку корпуса поляриметра M и убеждаются, что трубка с раствором сахара вынута.

3. Вращением кремальеры R устанавливают анализатор на темноту с одинаковым затемнением обеих половинок поля зрения, смотря в окуляр L₁.

4. В верхнем окуляре прибора L_2 наблюдают лимб с нониусом (при правильной установке φ должно быть равно нулю).

5. Определяют постоянную прибора следующим образом: помещают трубку с раствором сахара известной концентрации C_0 и известной длины l_0 (длину трубки принято выражать в дециметрах) между двумя николями (трубка с известной концентрацией имеет длину 2 дм), закрывают крышку M и, вращая кремальеру R , добиваются того, чтобы обе половины поля зрения поляриметра были одинаково затемнены, так же как это было при начальной установке прибора.

По нониусу окуляра L_2 отсчитывают угол поворота плоскости поляризации φ_0 .

6. Подставляя найденное значение φ_0 , известные значения C_0 и l_0 в формулу (6), вычисляют постоянную прибора K .

Измерения угла φ_0 делают три раза и находят три соответствующих значения для K . Из трех значений определяют среднее.

7. Берут две другие трубки с растворами сахара неизвестной концентрации и, по очереди помещая их в поляриметр, находят значение угла φ_1 для одной трубки и значение φ_2 для другой.

8. Подставляя измеренные значения φ_1 и φ_2 , вычисленное среднее значение K и известные значения l_1 и l_2 в формулу (6), определяют концентрацию C_1 для одной трубки и C_2 для другой.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводят в таблицу.

		$C_0 =$			$l_0 =$					
φ_0	K	ΔK	$\frac{\Delta \bar{K}}{\bar{K}} \cdot 100\%$	$K_{\text{ист}} = \bar{K} \pm \Delta \bar{K}$	l_1	φ_1	C_1	l_2	φ_2	C_2
			×	×						
			×	×				×		
Среднее значение								×		

Приборы и принадлежности: полярископ ПКС-М или ПКС-56, набор прозрачных моделей из стекла или прозрачной пластмассы, винтовые зажимы.

Теория метода и описание установки. Путем наблюдения интерференции поляризованных лучей можно исследовать механические напряжения при искусственно созданных деформациях прозрачных изотропных тел (стекло, целлюлоид, пластмасса), так как механические деформации в таких телах создают анизотропию, т. е. делают их двоякопреломляющими.

Два поляризованных луча при наложении друг на друга могут интерферировать только в том случае, когда: 1) лучи когерентны; 2) плоскости колебаний в обоих лучах совпадают.

Лучи обыкновенный (o) и необыкновенный (e), возникающие при двойном лучепреломлении из естественного света, не когерентны, так как они получены от различных атомов. Лучи же обыкновенный и необыкновенный, возникающие из одного и того же поляризованного луча, когерентны. Если колебания в двух таких лучах привести с помощью поляризатора к одной плоскости, то лучи будут интерферировать обычным образом.

В данной работе интерференцию поляризованных параллельных лучей получают следующим образом (рис. 211). Из поляроида P выходят плоскополяризованные лучи (колебания вектора E в плоскости рисунка), которые попадают на образец B , обладающий вследствие приложенных к нему сжимающих или растягивающих усилий T (деформация сжатия или растяжения) свойствами двойного лучепреломления. В образце B лучи раздваиваются и на анализатор A падают когерентные лучи (обыкновенный и необыкновенный). Колебания в них вектора E обозначены стрелками и точками. Анализатор A приводит эти колебания к одной плоскости и на экране \mathcal{E} наблюдается картина интерференции.

При одностороннем сжатии (или растяжении) направление сжатия является оптической осью. Если падающие на образец B лучи перпендикулярны к оптической оси об-

разца, то нормальное напряжение, приложенное к образцу:

$$T = \frac{n_o - n_e}{k},$$

где k — коэффициент фотоупругости, характеризующий упругие свойства материала образца, n_o и n_e — показатели преломления образца для обыкновенного и необыкновенного лучей. При толщине образца d оптическая разность

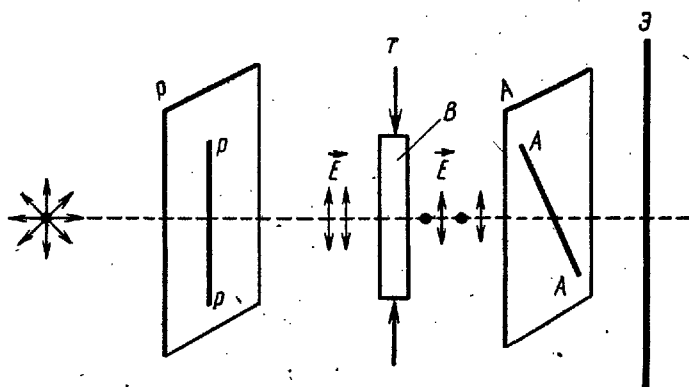


Рис. 211

хода между обыкновенным и необыкновенным лучами, выходящими из образца:

$$\delta = kTd = d(n_o - n_e). \quad (7)$$

Картина интерференции может быть сложной, потому общую картину распределения напряжений в теле можно составить только для так называемых *главных средних нормальных напряжений*. Оптически эти места отвечают одной и той же разности хода лучей и при наблюдении в белом свете образуют непрерывные линии одного цвета, которые принято называть *изохроматическими линиями*.

Изготавливая модели из прозрачного вещества (стекла, целлулоида, пластмассы), можно решать ряд практических и теоретических задач о деформациях, возникающих в телах различной формы под влиянием тех или иных сил. Такой метод изучения деформаций на прозрачных моделях, называемый методом «фотоупругости», получил в настоящее время широкое применение. Этот метод хроматической

поляризации дает возможность непосредственно видеть деформации, присутствие которых и их размеры часто интересуют строителей.

В данной работе исследование напряжений в прозрачных деталях проводится при помощи полярископа ПКС-М. Принцип действия и устройство прибора (рис. 212) следующие.

Пучок световых лучей от осветителя 4, пройдя матовое стекло 8 и поляризатор 1, выходит из поляризатора плоскополяризованным пучком и падает на испытуемый прозрачный образец В, устанавливаемый на подставку А, помещенную внутри корпуса полярископа. Корпус полярископа 6

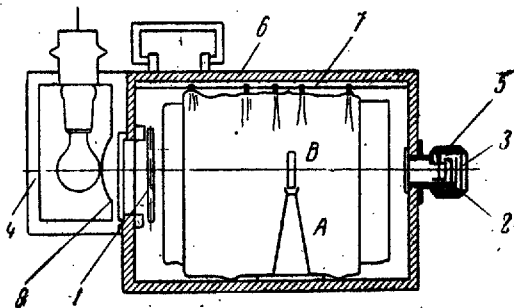


Рис. 212

представляет собой деревянный ящик без боковых стенок, вместо которых на боковых стержнях 7 подвешены две шторы. Если в образце имеются внутренние деформации, то обыкновенный и необыкновенный лучи, вышедшие из образца, имеют разность хода на большую или меньшую величину в зависимости от приложенного напряжения. Анализатор 2 приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость, в результате чего происходит интерференция света. Картина интерференции наблюдается в окуляр 3.

Поляризатор и анализатор состоят из поляроидной пленки, заключенной между двумя стеклами.

Наблюдения и обработка результатов наблюдений. I. Наблюдение картины напряжений. 1. Включают лампу осветителя в сеть переменного тока (лампа осветителя должна быть не больше 60 вт, чтобы не портился поляроид).

2. Муфту 5 поворачивают в крайнее левое положение; при этом положении муфты выключается кварцевая пластинка. Кварцевую пластинку вводят тогда, когда разность хода лучей в образце невелика; ее введение дает дополни-

тельную разность хода, что улучшает картину наблюдения.

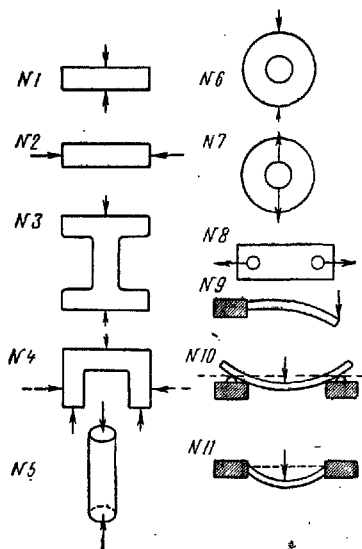


Рис. 213

тельной картины. Рассматривают картину интерференции и зарисовывают изохроматические линии.

4. Такие же действия производят с моделями № 2, 3, 4, 5, 6 (модель № 4 вставляют в пресс горизонтально и вертикально (рис. 213).

5. Помещают в полярископ модели № 7 и 8 и испытывают их на растяжение.

6. Модели № 9, 10, 11 испытывают на изгиб. При этих испытаниях следует обратить внимание, во-первых, на направление черной линии, резко заметной между остальными цветными изохроматическими линиями (если черная линия видна не очень хорошо, то необходимо повернуть муфту 5 в крайнее правое положение, что дает включение кварцевой пластинки), и, во-

3. Образец, прозрачную модель № 1 (рис. 213), устанавливают в пресс для сжатия, не зажимая его (рис. 214), и помещают между поляризатором и анализатором на столик А. Наблюдают в окуляр 3 положение образца. Затем вынимают модель и дают нагрузку (деформация сжатия), для чего не очень сильно завинчивают винт С. Помещают модель между поляризатором и анализатором и, наблюдая в окуляр 3, вращают модель до получения максимальной яркости интерференционной

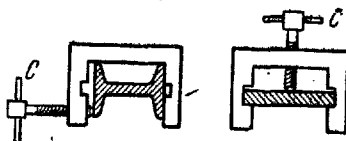


Рис. 214

вторых, на изгибы линий в тех местах пластинки, на которые непосредственно действуют винты.

Черная линия соответствует нейтральному слою при изгибе (рис. 215), а изгибы линий вблизи точек опоры винтов указывают на неоднородное распределение напряжений. При деформации изгиба слои стержня, лежащие ближе к его выпуклой стороне *A*, должны испытывать растяжение, а слои, лежащие ближе к вогнутой стороне *B* стержня, должны испытывать сжатие. Между зонами сжатия и растяжения находится очень тонкий слой O_1O_1 , длина которого при изгибе не меняется; этот слой называется нейтральным.

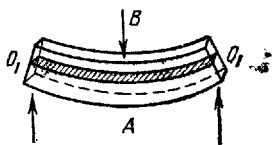


Рис. 215

II. Определение разности показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей.

1. Муфтой 5 (или рукояткой, если перископ ПКС-56) вводят чувствительную пластинку, которая дает разность хода в 1λ . Введение чувствительной пластинки делает окраску поля зрения пурпурно-фиолетовой.

2. Дают нагрузку на образец, помещают его на столик прибора и поворачивают его до получения яркой интерференционной картины. По наблюдаемой окраске находят разность хода δ по таблице.

Таблица интерференционных цветов
в напряженном образце в зависимости от разности хода

Цвет	Разность хода δ , нм	Цвет	Разность хода δ , нм
Желтый	325	Красный	25
Желто-зеленый	275	Оранжевый	130
Зеленый	200	Светло-желтый	200
Голубовато-зеленый	145	Желтый	260
Голубой	115	Белый	310
Пурпурно-фиолетовый	0		

3. По формуле (7) вычисляют разность показателей преломлений образца

$$n_o - n_e = \frac{\delta}{d}$$

обыкновенного и необыкновенного лучей для трех образцов различной толщины *d* для одного какого-либо цвета.

ПОГЛОЩЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Введение. I. Явления поглощения и отражения света веществом объясняются с точки зрения электромагнитной теории света следующим образом. Падающая на вещество электромагнитная световая волна имеет частоту 10^{14} — 10^{15} гц. С такой частотой в веществе смогут колебаться только электроны, так как ионы слишком велики и при таких частотах не успевают смещаться под действием переменного электромагнитного поля.

В результате колебания электронов возникают вторичные электромагнитные волны той же частоты: отраженные и преломленные.

Поглощением света называется уменьшение энергии световой волны, происходящее по мере проникновения ее в глубь вещества.

Если свет падает параллельным пучком нормально к поглощающему веществу, то зависимость между интенсивностью падающего потока излучения I_0 и интенсивностью I прошедшего слой тол-

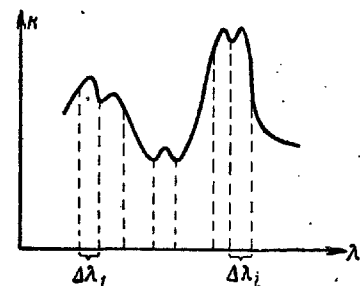


Рис. 216

щины d выражается законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-kd}, \quad (1)$$

где k — коэффициент поглощения вещества. Формула (1) справедлива только для монохроматического света, так как k зависит от длины волны λ ; k представляет собой относительное уменьшение интенсивности потока излучения в слое единичной толщины.

Зависимость k от λ представляет собой кривую с рядом максимумов; максимумы представляют собой полосы поглощения веществом света для определенного интервала длин волн (рис. 216).

У прозрачных тел полосы поглощения лежат в области инфракрасных и ультрафиолетовых участков спектра у окрашенных (растворов красок) в соответственных участках видимой области спектра. Например, «красным» явля-

ется стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи, и хорошо поглощающее синие, зеленые и фиолетовые. Если красное стекло осветить синим светом, то оно будет казаться «черным», так как синие лучи хорошо поглощаются красным стеклом.

Поглощение света веществом связано с его электропроводностью.

Металлы хорошо поглощают свет, что объясняется наличием в них свободных электронов, которые под действием падающей волны приобретают большую амплитуду колебаний.

Энергия, приобретаемая электронами, расходуется на излучение вторичных волн и переходит в тепло.

Диэлектрики слабо поглощают свет. В диэлектрике все электроны связаны; они колеблются с собственной частотой ω_0 и «раскачать» их падающей волне трудно. Однако в том случае, когда частота падающей световой волны ω близка к частоте собственных колебаний электрона $\omega \approx \omega_0$ (резонанс), амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, возрастает и коэффициент поглощения. Таким образом, поглощение света в диэлектрике имеет селективный (избирательный) характер.

Отраженная волна — вторичная волна возникла вследствие того, что падающая электромагнитная волна привела электроны в атомах в колебательное движение. В результате этого атомы сами начинают излучать электромагнитные вторичные волны с частотой падающей волны.

Металлы хорошо отражают свет. Отражение от диэлектриков зависит от состояния поляризации падающего света.

II. В данных работах измерение поглощения и отражения света твердыми телами выполняется с помощью универсального фотометра.

Фотометр (рис. 217) состоит из следующих основных узлов: фотометрической головки 1, в которой находятся оптические детали; револьверного диска с одиннадцатью светофильтрами 2, номера которых появляются в окошечке диска; штатива 3; предметного столика 4, который может перемещаться при помощи кремальеры 14; плоского зеркала 5 и осветителя 6 с двумя конденсорами (15 — выпрямитель).

Все эти детали смонтированы на массивном круглом основании 13.

В основу устройства прибора положен принцип уравнивания двух световых потоков путем изменения одного из них с помощью диафрагмы с переменным отверстием.

Два параллельных световых пучка A' и B' (рис. 218), выходящие из осветителя 6 (рис. 217), отразившись от зеркала 5 , попадают в прибор через две диафрагмы 7 , степень раскрытия которых регулируется поворотом барабана 7 . Далее световые пучки A' и B' объединяются с помощью объективов 16 и ромбических призм 17 и попадают

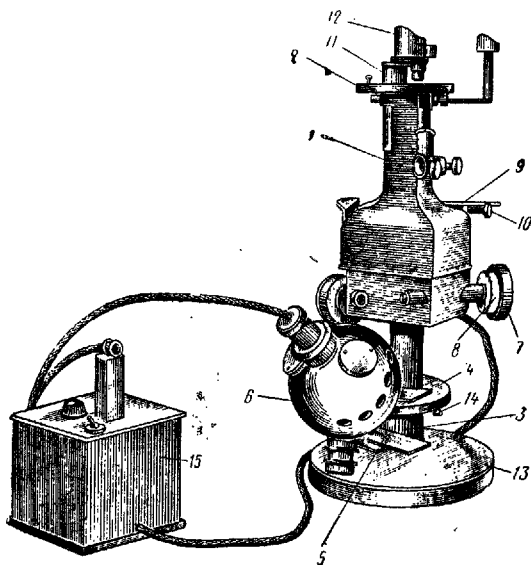


Рис. 217

на бипризму 18 , которая сводит два пучка к оси окуляра, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая часть его, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора. Левый пучок проходит симметрично.

Из бипризмы лучи проходят через один из одиннадцати светофильтров 19 , помещенных в револьверном диске 2 (рис. 217), и попадают в окуляр 20 , а из окуляра через наглазник 12 в глаз наблюдателя. Окуляр, служащий для наблюдения поля зрения, имеет кольцо 11 , с помощью ко-

торого производится установка на резкость линии раздела поля зрения.

Наблюдатель видит поле зрения в форме круга A и B , разделенного линией на две половины, имеющие в общем случае различную яркость. Яркость правой части поля определяется световым потоком, проходящим через левую диафрагму, а левой — через правую.

Когда обе диафрагмы $7'$ одинаково освещены и в одинаковой мере раскрыты, то яркость обеих половин поля зрения будет одинакова.

Если при равенстве яркостей обеих половин поля зрения на пути одного светового потока, например A' , поместить пластину из какого-либо вещества, поглощающего или отражающего свет, то фотометрическое равенство нарушится, так как поле A станет менее ярким. Чтобы уравнять поля, необходимо уменьшить яркость поля B , что осуществляется изменением отверстия диафрагмы, через которую проходит световой поток B' .

На измерительных барабанах 7 нанесены две шкалы — черная и красная. Черная шкала показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы S при данном ее раскрытии

к площади S_0 при ее максимальном раскрытии. Так как световой поток равномерного пучка света, проходящего через диафрагму, пропорционален площади ее раскрытия, то отношение площадей отверстий диафрагмы дает отношение световых потоков A' и B' . Следовательно, показания черной шкалы барабана дают непосредственно коэффициент пропускания t или отражения r для данного образца в процентах, т. е. отношение светового потока, прошедшего через данный образец или отраженного от данного образца к световому потоку, падающему на него.

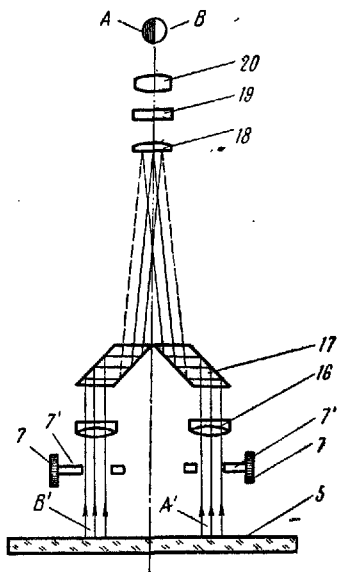


Рис. 218

Красная шкала на барабане 7 соответствует *оптической плотности образца D*. Для удобства шкалы барабанов освещаются осветителем 10 и снабжены лупами 9. Отсчет по барабану производится индексом 8.

Работа № 67

Измерение коэффициентов поглощения света прозрачных тел

Приборы и принадлежности: универсальный фотометр ФМ-56, набор исследуемых образцов.

Для вычисления коэффициента поглощения прологарифмируем формулу (1) и решим относительно k :

$$k = -\frac{1}{d} \cdot \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{2,3}{d} \cdot \lg \frac{I}{I_0} = \frac{2,3}{d} \cdot D, \quad (2)$$

где

$$-\lg \frac{I}{I_0} = -\lg t; \quad \lg \frac{1}{t} = D;$$

D — оптическая плотность данной среды, а t — коэффициент пропускания.

Для различных веществ численное значение коэффициента поглощения k различно и колеблется в широких пределах.

В качестве примера приводим коэффициенты поглощения видимых лучей, которые определяются величинами порядка $0,01$ — $0,03 \text{ см}^{-1}$ для стекла (в зависимости от сорта), $0,001 \text{ см}^{-1}$ для воды и $2 \cdot 10^{-5}$ — $4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ для воздуха (в зависимости от его влажности).

В данной работе результаты измерений изображают графически, построив зависимость коэффициента поглощения k от длины волны λ [$k = f(\lambda)$].

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Приводят фотометр в рабочее положение, для чего: а) включают через трансформатор 220/8 в лампу осветителя;

б) осветитель устанавливают так, чтобы световые пучки, направляемые зеркалом снизу, давали бы одинаковую освещенность отверстий фотометра (при этом оба барабана должны стоять на 100, что соответствует одинаковой степени раскрытия диафрагм);

в) вводят зеленый светофильтр под номером 4 (рис. 217), поворачивая револьверный диск 2, который расположен

в верхней части прибора и затем фокусируют окуляр (с помощью кольца 11) на линию раздела полей сравнения и наблюдают изображения спирали лампы осветителя, видимые в каждой половине поля зрения. Если изображения не резки, то слегка передвигают конденсоры осветителя.

Для создания равномерно светящегося фона наблюдений в пазы оправ конденсоров вставляют матовые рассеиватели. После этого светофильтр выключают.

2. Правый барабан оставляют на делении 100 (по черной шкале), что соответствует плотности потока энергии падающего света $I_0 = 100$, а левым барабаном уравнивают поля фотометра по яркости. Такое уравнивание производят 3—5 раз и вычисляют среднее положение фотометрического равновесия для левого барабана. Устанавливают левый барабан в это положение и больше не трогают.

3. Микрометром измеряют толщину d исследуемого образца из прозрачного материала. Измерения проводят в нескольких точках и берут среднее значение.

4. Исследуемый образец помещают на предметный столик под левой диафрагмой, при этом правая половина поля зрения темнеет. Вращая правый измерительный барабан, добиваются равенства яркостей обеих половин зрения и берут отсчет $D = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{t}$ прямо по красной шкале правого барабана. Установку на равенство производят 3—5 раз и из полученных отсчетов берут среднее арифметическое.

Так как яркость полей освещения определяется величиной световых потоков, то можно считать, что значение коэффициента пропускания t равно отношению плотностей потока энергии $\frac{I}{I_0}$.

5. По формуле (2) вычисляют коэффициент поглощения k исследуемого образца в белом свете.

6. Измеряют коэффициент поглощения прозрачных цветных образцов (из синего, красного, зеленого стекла или плексигласа) для различных длин волн. Для этого каждый из исследуемых образцов помещают на столик под левой диафрагмой; включают последовательно светофильтры от № 1 до № 8, поворачивая диск 2, и для каждого светофильтра делают отсчеты оптической плотности D образца (по красной шкале).

По формуле (2) вычисляют значения коэффициентов поглощения k . Каждый раз при включении нового свето-

фильтра производят установку фотометра на фотометрическое равновесие.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицы записи результатов, примерное расположение которых следующее:

$I_0 = 100$
Для белого света

№ п/п	Название образца	d	D	k
1	Бесцветный			
	Среднее значение		X	
2	Цветной образец			
	Красный			
	Синий			
	Зеленый			

Для монохроматического света

№ филь-тра	Маркировка фильтра	$\lambda_{эфф}$ нм	Красный образец		Синий образец		Зеленый образец	
			D	k	D	k	D	k
1	М-72	726						
2	М-66	665						
3	М-61	619						
4	М-57	574						
5	М-53	533						
6	М-50	496						
7	М-47	465						
8	М-43	432						
9	К-2	633						
10	К-4	550						
11	К-6	478						

Примечания. 1. Фильтр пропускает излучение определенной эффективной длины волны ($\lambda_{эфф}$).

2. Область пропускания фильтров от № 1 до № 8 сравнительно узка; эти восемь фильтров делят видимую область спектра примерно на равные участки шириной в 40 мкм каждый.

Три светофильтра № 9, 10, 11 обладают более широкой областью пропускания; они делят видимую область спектра на три части: красную, зеленую и синюю.

Для определения k используем светофильтры от № 1 до № 8.

Светофильтры № 9, 10, 11 включают только при определении коэффициента отражения r .

7. Строят график зависимости коэффициента поглощения от длины волны $k = f(\lambda)$ для синего, красного и зеленого образцов и определяют интервалы полос поглощения.

По оси абсцисс откладывают длину волны λ , а по оси ординат — найденное значение k . Длины волны света, пропускаемые каждым светофильтром, указаны в таблице записи результатов.

Работа № 68 . Измерение коэффициентов отражения света

В этой части работы изучается вопрос отражения света и окраски тел в отраженном свете.

Отражение света играет большую роль в науке и технике, в частности в строительной промышленности.

Окраска тел зависит от того, какие лучи тело отражает и в каком количестве.

Идеально белым телом называется такое тело, у которого коэффициент отражения r равен единице, поэтому r характеризует степень белизны, а величина $k = 1 - r$ характеризует степень черноты тела.

Если тело непрозрачное, то $t = 0$ *, и тогда $r + k = 1$. При освещении белым светом окрашенные тела кажутся цветными. Если слой краски достаточно толст, то цвет тела определяется ею и не зависит от свойств, лежащих под краской слоев. Краску можно представить в виде мелких зернышек, избирательно рассеивающих свет и погруженных в прозрачную связывающую их массу, например масло.

Свойства краски определяются коэффициентами k , r и t этих зернышек.

На рис. 219 показано схематически действие лучей на слой краски. Из рисунка видно, что самый верхний слой

* t — коэффициент пропускания.

отражает практически одинаково все лучи, т. е. от него идет белый свет (около 5%), остальные 95% света проникают в глубь краски и, рассеиваясь ее зернами, выходят наружу. При этом происходит поглощение части света в зернах краски, причем те или иные спектральные участки

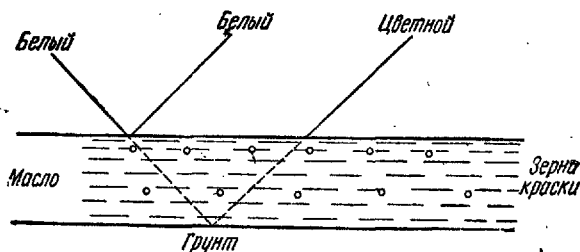


Рис. 219

поглощаются в большей или меньшей степени в зависимости от цвета краски.

Наиболее высоким коэффициентом отражения обладают металлы. Если у стекла коэффициент отражения от поверхности равен 4%, то у металлов он достигает 80—90% (с чистой полированной поверхностью). У металлов с незначительными следами коррозии

коэффициент отражения значительно уменьшается. Жидкий раствор краски, так же как и металл, обладает высокой отражательной способностью.

При определении коэффициентов отражения плоское зеркало 5 (рис. 217) прибора заменяется специальным столиком с держателями А и В для исследуемых образцов (рис. 220).

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Включают через трансформатор 220/8 в лампу осветителя.

2. Помещают на столик прибора (рис. 220) в держатели А и В две эталонные баритовые пластинки и осветитель

устанавливают так, чтобы обе пластинки были равномерно освещены (оба барабана 7 (рис. 217) должны стоять на 100 по черной шкале).

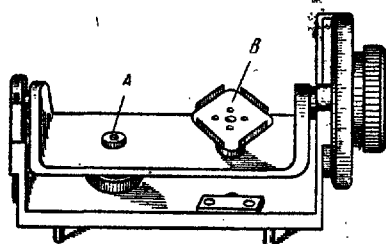


Рис. 220

3. Производят фокусировку окуляра с помощью кольца 11 (рис. 217) на линию раздела обоих полей (A и B — рис. 218).

4. Левый барабан оставляют на делении 100 (по черной шкале), что соответствует значению интенсивности падающего света $I_0 = 100$, а правым барабаном производят уравнивание полей фотометра по яркости. Такое уравнивание производят 3—5 раз и вычисляют среднее положение фотометрического равновесия. Устанавливают правый барабан в это положение и больше не трогают.

5. Заменяют эталонную пластинку в правом держателе A (рис. 220) исследуемым образом, при этом левая половина поля зрения темнеет. Вращая левый измерительный барабан, добиваются равенства яркостей обеих половин поля зрения и берут отсчет по черной шкале левого барабана. Этот отсчет дает значение коэффициента отражения образца r для белого света.

6. Поворачивая револьверный диск 2 (рис. 217), включают поочередно светофильтры № 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Для каждого светофильтра производят уравнивание полей зрения фотометра A и B по яркости и каждый раз записывают показания левого барабана — значение коэффициента отражения r для данного образца при данном светофильтре.

7. Строят график зависимости коэффициента отражения r от длины волны $r = f(\lambda)$ для каждого образца, откладывая по оси x длину волны λ , а по оси y показатель отражения r .

Длины волн света, пропускаемые каждым светофильтром, указаны в таблице записи результатов (см. стр. 370). Значения r , соответствующие светофильтрам, нишут в графе D таблицы; графу k опускают.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Введение. I. Тепловым излучением называется электромагнитное излучение тела, которое обусловлено возбуждением атомов или молекул тела вследствие их теплового движения. Интенсивность теплового излучения и его спектральный состав зависят от температуры, химической природы и агрегатного состояния нагретого тела.

Все раскаленные твердые и жидкие тела дают сплошной спектр излучения (в спектре присутствуют волны всех длин). Однако доля энергии, приходящаяся на различные участки спектра, зависит от температуры излучающего тела. При температуре 600—700° С наибольшая энергия излучения приходится на инфракрасную и красную части спектра (красное каление). При дальнейшем нагревании доля энергии, приходящаяся на видимые лучи, возрастает и свечение тела становится белым (белое каление). Таким образом, в спектре излучения наблюдается неравномерное распределение энергии между различными длинами волн.

Если на тело падает поток лучистой энергии, то часть этого потока поглощается телом. В *равновесном состоянии* энергия, поглощаемая телом, теряется им путем излучения, поэтому температура тела не изменяется.

Спектральными характеристиками теплового излучения и поглощения являются *лучеиспускательная способность тела* $E_{\lambda, T}(E_{\nu, T})$ и *поглощательная способность тела* $A_{\lambda, T}(A_{\nu, T})$. Поглощательная способность тела показывает, какая доля энергии излучения dW , падающая за единицу времени на единицу площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + \Delta\nu$, поглощается телом:

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW},$$

где $dW_{\text{погл}}$ — поглощенная телом энергия.

Лучеиспускательная способность тела $E_{\nu, T}$ и его энергетическая светимость E_T (см. стр. 20) связаны соотношением

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\nu, T} \cdot d\nu = \int_0^{\infty} E_{\lambda, T} \cdot d\lambda; \quad (1)$$

$E_{\lambda, T}$ и $A_{\lambda, T}$ зависят не только от длины волны излучения и температуры тела, но и от химического состава, формы и состояния поверхности тела.

Для всех тел $A_{\lambda, T} < 1$. Однако можно представить себе такое тело, которое поглощает все падающие на него лучи. Для такого тела $A_{\lambda, T} = 1$ для всех длин волн и температур. Такое тело называется *абсолютно черным*. В природе нет абсолютно черного тела. Но тело, близкое к нему по своим свойствам, можно создать искусственно: приближенно абсолютно черным телом можно считать сажу, платиновую чернь.

Для разных тел величины лучеиспускательной и поглощательной способностей при одинаковых условиях резко отличаются, но *отношение*

$$\frac{E_{\nu, T}}{A_{\nu, T}}$$

не зависит от материала тела и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела $\epsilon_{\nu, T}$, являющейся функцией только температуры и частоты (закон Кирхгофа в дифференциальной форме)

$$\frac{E_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = \epsilon_{\nu, T}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{\nu, T}$ называется функцией Кирхгофа.

Применяя закон Кирхгофа (2) к абсолютно черному телу и обозначая для абсолютно черного тела $E_{\nu, T} = E$ и $A_{\nu, T} = 1$, получим

$$\frac{E}{1} = \epsilon_{\nu, T},$$

т. е. $\epsilon_{\nu, T} = E$ — лучеиспускательная способность абсолютно черного тела, представляет собой функцию Кирхгофа.

Поэтому закон излучения Кирхгофа можно записать в следующем виде:

$$\frac{E_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = E. \quad (3)$$

II. Для объяснения законов теплового излучения М. Планк в 1900 г. высказал гипотезу, что поглощение и испускание энергии электромагнитного излучения атомами и молекулами возможно только отдельными «порциями», которые стали называть *квантами энергии*. Величина кванта энергии

$$e = h\nu,$$

где h — постоянная величина (постоянная Планка); $h = 6,62 \cdot 10^{-24}$ дж · сек, ν — частота света.

Планк на основе квантовых представлений вывел аналитическое выражение функции $\epsilon_{\nu, T}$. Эта функция, получившая название *функции Планка*, имеет следующий вид:

$$\epsilon_{\nu, T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{kT} - 1} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}, \quad (4)$$

где $h\nu$ — величина кванта энергии, $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-5}$ эрг \times \times см²/сек и $C_2 = 1,438$ см \cdot град — постоянные величины, e — основание натуральных логарифмов.

Интегрируя функцию Планка (4) по всему спектру излучения, получим закон Стефана—Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела (волнами всех длин) с 1 м² поверхности за 1 сек пропорциональна четвертой степени его температуры:

$$\epsilon_T = \int_0^{\infty} \epsilon_{\nu, T} \cdot d\nu = \sigma T^4, \quad (5)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ вт/м² \cdot град⁴ — постоянная Стефана—Больцмана.

Если взять производную по λ от функции планка (4) и приравнять ее нулю, получим первый закон Вина, или закон смещения Вина: длина волны $\lambda_{\text{макс}}$, соответствующая максимальной лучеиспускательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре T :

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{C'}{T}, \quad (6)$$

где C' — постоянная величина; $C' = 2,89 \cdot 10^{-3}$ м \cdot град.

Подставляя в уравнение (4) значение $\lambda = \lambda_{\text{макс}}$, будем иметь:

$$(\epsilon_{\lambda, T})_{\text{макс}} = C'' \lambda^5, \quad (7)$$

где $C'' = 1,29 \cdot 10^{-5}$ вт/м³ \cdot сек \cdot град⁵.

Формула (7) выражает второй закон Вина: максимальная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела $(\epsilon_{\lambda, T})_{\text{макс}}$ пропорциональна пятой степени абсолютной температуры T .

На рис. 221 приведены графики функции Планка для некоторых температур. Площади, ограниченные кривыми графиков, определяют энергетическую светимость ϵ_T абсолютно черного тела. Абсциссы, соответствующие максимальным ординатам кривых, определяют длины волн, которым соответствуют максимальные лучеиспускательные способности абсолютно черного тела.

Рассмотренные закономерности излучения абсолютно черного тела качественно справедливы и для тел, не являющихся абсолютно черными.

III. Если излучение происходит в среде, имеющей температуру T_0 , то отдача телом тепла (по закону Стефана—Больцмана)

$$Q = \varepsilon_{T_1} - \varepsilon_{T_0} = \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (8)$$

То обстоятельство, что состав излучения и количество излучаемой телом энергии сильно зависят от температуры, позволяет посредством измерения излучения раскаленного тела достаточно точно измерить его температуру.

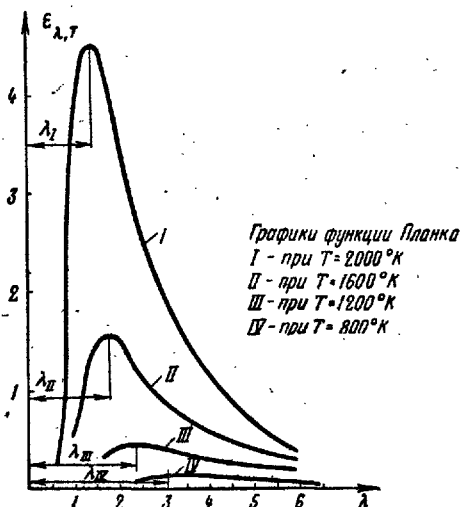
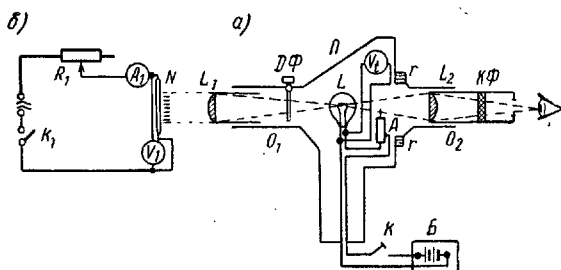


Рис. 221

При измерении очень высоких температур, например раскаленных тел, а также температур тел, удаленных от наблюдателя (звезд), нельзя пользоваться обычными методами измерения температур (термометрами, электрическими термометрами, термопарами). В этих случаях о температуре тела можно судить только по его излучению. Совокупность методов измерения высоких температур, основанных на законах теплового излучения, в частности на использовании зависимости лучеиспускательной способности тела от его температуры, называется *оптической пирометрией*. Приборы, которые применяются в оптической пирометрии, называются *пирометрами излучения*. Они бывают двух видов: *радиационные* и *оптические*.

В радиационных пирометрах регистрируется *интегральное тепловое* излучение исследуемого нагретого тела. В оптических пирометрах — излучение в каком-либо (одном или двух) *узком участке спектра*.

Измерение температуры тела в данных работах производится при помощи *оптического пирометра с исчезающей нитью*. Оптический пирометр применяется в различных отраслях промышленности. Пределы измерения температур $700\text{--}2000^\circ\text{C}$. Оптический пирометр с исчезающей нитью состоит из зрительной трубы Π , в фокусе которой находится эталонная лампочка накаливания L (рис. 222, а и б). Труба Π наводится на источник излучения (в нашем



* Рис. 222

случае — раскаленный волосок лампочки накаливания N). При помощи линзы L_1 , находящейся в фокусе объектива трубы O_1 , изображение волоска сводится в плоскость нити лампочки (волосок и нить лампочки видны одинаково четко). Вторая линза L_2 , помещенная в окуляре трубы O_2 , дает увеличенное изображение нити лампочки и поверхности раскаленного волоска.

Лампочка L питается током от аккумуляторной батареи B . Накал нити регулируют реостатом A посредством кольца r , находящегося в передней части трубы O_2 пирометра. Регулируя реостатом A величину тока в лампочке L , можно добиться исчезновения видимости нити на фоне волоска. В этом случае температуры нити лампочки L и волоска станут одинаковыми.

При пользовании пирометром сравнение яркости происходит в ограниченной области спектра, поэтому для получения монохроматического излучения в трубе окуляра O_2 помещен красный светофильтр $КФ$. Температуру нити от-

считывают по вольтметру V_t , включенному параллельно эталонной лампе, со шкалой, градуированной непосредственно в градусах. При измерении температуры выше 1400°C необходимо вводить дымчатый светофильтр $D\Phi$.

Так как волосок лампочки накаливания N не является абсолютно черным телом, то для определения действительной температуры t необходимо вводить поправку. Эта поправка определяется по графику (рис. 223). Из графика определяют поправку Δt для данной температуры t_v (которая соответствует показаниям вольтметра V_t пирометра). Действительная температура волоска лампочки накаливания

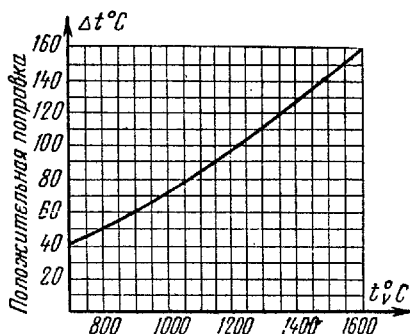


Рис. 223

$$t_d = t_v + \Delta t \quad (9)$$

и окончательно

$$T_d = t_d + 273. \quad (10)$$

Работа № 69

Определение постоянной в законе Стефана — Больцмана при помощи оптического пирометра

Приборы и принадлежности: оптический пирометр с исчезающей нитью, вольфрамовая проволока (лампа накаливания), трансформатор, вольтметр, амперметр, реостат, два ключа.

Теория метода и описание установки. В данной работе определяют постоянную в законе Стефана—Больцмана. В качестве абсолютно черного тела берут волосок лампочки накаливания. Вольфрамовый волосок лампочки накаливания дает лишь приблизительную картину, так как не является абсолютно черным телом. Лучше поместить в цепь пластинку из никеля. Излучение никеля, который

покрывается окалиной, близко к излучению абсолютно черного тела.

Для нагревания волоска лампочку включают в цепь переменного тока (рис. 222, б). Изменяя реостатом R_1 ток I в цепи лампы, получают различную степень нагретости волоска.

Мощность, затрачиваемую на поддержание волоска в накаливаемом состоянии, определяют из показаний амперметра A_1 и вольтметра V_1 . Приравнивая эту мощность количеству энергии в соответствии с законом Стефана—Больцмана (8), получают:

$$IU_1 = \sigma S (T^4 - T_0^4), \quad (11)$$

где S — общая поверхность раскаленного волоска. Отсюда постоянная величина

$$[\sigma] = \frac{[IU_1]}{[S (T^4 - T_0^4)]} = \text{дж/сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}^4.$$

По этой формуле и определяют σ .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают электрическую цепь (рис. 222, а и б) для накала лампы N .

2. Подготавливают оптический пирометр к проведению измерений, для чего:

а) проверяют положение стрелки электроизмерительного прибора V_1 на нуле;

б) вводят все сопротивление реостата A пирометра, поворачивая кольцо r влево до упора;

в) присоединяют через ключ K провод с наконечниками (от ручки пирометра) к зажимам аккумуляторной батареи B ;

г) постепенно поворачивая кольцо реостата r по часовой стрелке, включают ток в цепь лампы L и доводят накал нити приблизительно до 1000°C (по показаниям электроизмерительного прибора V_1);

д) передвигая тубус окуляра O_2 , добиваются резкости изображения нити.

3. К лампе накаливания подводят определенное напряжение (по указанию преподавателя).

4. Для получения света одной длины волны вводят монохроматический (красный) светофильтр $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$, поворачивая кольцо $K\Phi$, и еще раз подлаживают фокусировку нити.

5. Направив объектив пирометра O_1 на раскаленный волосок или пластинку и передвигая тубус объектива, устанавливают на резкость изображение полосками пластинки; это изображение должно быть в той же плоскости, что и нить лампы. Смещая немного глаз перед окуляром, можно проверить, выполняется ли это условие. Если проекция нити не смещается по отношению к изображению волоска или пластинки — установка сделана правильно.

6. Увеличивают накал волоска или никелевой пластинки и измеряют его температуру при данном накале. Для этого изменяют яркость нити эталонной лампы поворотом кольца реостата r до того момента, пока средний участок (вершина дуги) нити лампы не исчезнет на фоне раскаленной пластинки или волоска. В этот момент делают отсчет температуры (t_v °C) по электроизмерительному прибору V_t (по шкале отсчета температур от 800 до 1400° C).

Вычисляют по графику Δt и находят по формуле (9) t_x .

7. Снимают показания приборов, находящихся в цепи лампы для величин тока I и напряжения U_1 при данной температуре накала волоска.

8. Подставляют в формулу (11) измеренную температуру ($T_x = t_x + 273$), комнатную температуру ($T_0 = 273 + t_0$), площадь волоска или пластинки S (площади указаны на приборе), величину тока I , напряжение U_1 и вычисляют значение σ .

9. Под наблюдением преподавателя увеличивают накал волоска или пластинки и находят второе значение σ , снимая соответствующие показания t_v , I_1 и U_1 .

10. Третье значение σ находят для более высокой температуры (от 1400 до 2000° C). Для измерения температуры в этих пределах необходимо ввести дополнительный дымчатый светофильтр $D\Phi$, так как нить лампочки не должна накаляться свыше 1400° C (дымчатый светофильтр ослабляет яркость пластинки). Температура нити накала не достигает 1400° C, а отсчет температуры раскаленного тела делают по другой шкале электроизмерительного прибора V_t (от 1400 до 2000° C), в которой учтено влияние светофильтра и сделана соответствующая градуировка. Для установки дымчатого светофильтра необходимо белую указательную точку (индекс) на головке $D\Phi$ совместить с индексом 20 на корпусе пирометра. При введении дымчатого светофильтра изображение предмета несколько сме-

стится, поэтому линзу объектива L_1 надо немного выдвинуть вперед до получения резкости.

Дальнейшие отсчеты t , I и U_1 производят так же, как это было сделано в двух первых измерениях.

11. Из полученных значений σ_1 , σ_2 и σ_3 находят среднее значение.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводят в таблицу.

T_0	T	I	U_1	σ	$\Delta\sigma$	$\frac{\Delta\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100\%$	$\sigma_{\text{ист}} = \bar{\sigma} \pm \Delta\bar{\sigma}$
						X	X
Среднее значение							

Работа № 70

Качественная проверка законов излучения Кирхгофа и закона смещения Вина

Приборы и принадлежности: оптический пирометр с исчезающей нитью, лампа накаливания с вольфрамовой нитью, рэостат, амперметр, вольтметр, миллиамперметр, фотоэлемент, два светофильтра (красный и синий), трансформатор, стабилизированный выпрямитель, ключ.

Теория метода и описание установки. А. Качественная проверка закона излучения Кирхгофа. По закону излучения Кирхгофа (2)

$$\frac{E_{\lambda, T}}{\epsilon_{\lambda, T}} = A_{\lambda, T},$$

а так как для любых тел $A_{\lambda, T} < 1$, то

$$\frac{E_{\lambda, T}}{\epsilon_{\lambda, T}} < 1. \quad (12)$$

Последнее неравенство справедливо для всех длин волн и температур, поэтому

$$\frac{E_T}{\epsilon_T} < 1. \quad (13)$$

В равновесном состоянии вся электрическая мощность $I_T U_T$, подводимая к волоску лампы, излучается, поэтому

$$E_T = \frac{\Phi_{\text{э}}}{S} = \frac{I_T U_T}{S} \quad (\text{см. стр. 20}), \quad (14)$$

где S — светящаяся поверхность волоска лампы N , I_T , U_T — сила тока в лампе N и напряжение на ее зажимах при температуре T накала ее нити.

Подставляя в неравенство (13) значения E_T из (14) и ε_T из (5), получим

$$\frac{E_T}{\varepsilon_T} = \frac{I_T U_T}{\sigma S T^4}; \quad \frac{I_T U_T}{B T^4} < 1, \quad (15)$$

где $B = \sigma S$ — постоянная для абсолютно черного тела с площадью, равной площади волоска лампы.

Величина S указана на приборе, σ берут из таблиц.

Выполнение неравенства (15) для исследуемой лампы при разных температурах ее нити качественно подтверждает закон излучения Кирхгофа.

Б. Качественная проверка закона смещения Вина. По закону смещения Вина максимум лучеиспускательной способности тела с повышением температуры перемещается в сторону более коротких волн. Поэтому отношение лучеиспускательной способности волоска лампы N в синей и красной частях спектра будет возрастать с повышением температуры, т. е.

$$\frac{(E_T)_c}{(E_T)_k} = \varphi(T), \quad (16)$$

где $(E_T)_c$ и $(E_T)_k$ — лучеиспускательная способность соответственно в синей и красной частях спектра излучения волоска лампы N при температуре T , $\varphi(T)$ — функция, возрастающая с повышением температуры.

Световой поток лампы N (рис. 224) падает на фотозлемент Φ через синий или красный светофильтры $СФ$. В цепи фотозлемента возникают соответствующие фототоки, величина которых пропорциональна лучеиспускательной способности падающего на него света (чувствительность данного фотозлемента к синему и красному свету примерно одинакова), поэтому отношение этих фототоков будет такой же возрастающей функцией температуры, как и для лучеиспускательных способностей

$$\frac{i_c(T)}{i_k(T)} = \varphi(T), \quad (17)$$

где $i_c(T)$ и $i_k(T)$ — фототоки, возбуждаемые в цепи фотоэлемента соответственно синим и красным светом при температуре T волоска лампы.

Если построить график функции $\varphi(T)$, то получится кривая, ординаты которой возрастают с повышением температуры.

В данной работе исследования неравенства (15) и формулы (17) сводятся к измерению температуры волоска лампы накаливания N .

Исследуемая вольфрамовая лампочка N включается в цепь постоянного тока напряжения 110 в. Изменяя реоста-

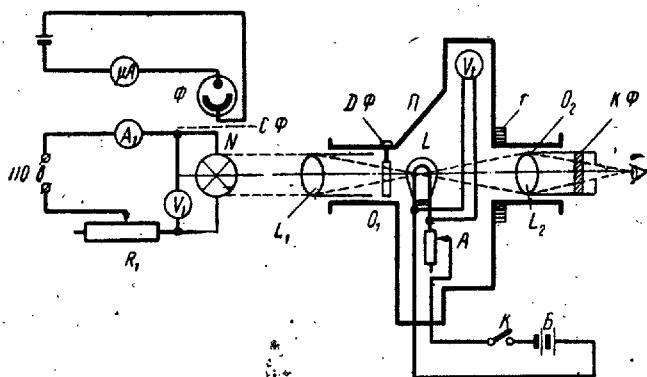


Рис. 224

том R_1 ток в цепи лампы, получают различную степень накала волоска лампочки. Зная силу тока и напряжение в цепи лампы, которые измеряются соответственно амперметром A_1 и вольтметром V_1 , можно подсчитать мощность, затрачиваемую на нагрев исследуемой лампы:

$$\Phi_s = I_T U_T.$$

Определения лучеиспускающей способности производят при помощи фотоэлемента Φ .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 224.

2. Подготавливают оптический пирометр к производству измерений, для чего:

- проверяют положение стрелки пирометра на нуле;
- вводят все сопротивление реостата A пирометра, поворачивая кольцо r влево до упора;

в) замыкают ключ K и, поворачивая кольцо реостата r по часовой стрелке, включают ток в цепь эталонной лампы и доводят накал нити до 1000°C (по вольтметру пирометра V_1);
 г) передвигая тубус окуляра O_1 , добиваются резкого изображения нити лампы пирометра L .

3. Включают ток в цепи исследуемой вольфрамовой лампы N . Одновременно записывают ток I_T по амперметру A_1 .

4. Для получения света одной длины волны вводят монокроматический (красный) светофильтр $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$, поворачивая кольцо $K\Phi$.

5. Направляют объектив пирометра O_1 на раскаленный волосок вольфрамовой лампы и устанавливают резкость ее изображения.

6. Поворотом кольца реостата r изменяют яркость нити эталонной лампы до тех пор, пока вершина дуги нити эталонной лампы не исчезнет на фоне нити исследуемой лампы. После этого делают отсчет температуры по вольтметру V_1 и отсчеты U_T и I_T в цепи лампы.

7. Изменяя напряжение U_T на исследуемой нити лампы, измеряют силу тока I_T по амперметру A_1 и соответствующие температуры t_V по вольтметру V_1 пирометра.

8. Действительную температуру T_d накала волоска лампы N определяют по формулам (9) и (10).

9. Вычисляют значения неравенства (15) для разных температур, подставляя вместо T в формулу T_d .

10. Освещают фотоэлемент через синий и красный светофильтры $C\Phi$ для одной и той же температуры лампы N и снимают показания фототока по μA для каждого светофильтра. Для экономии времени рекомендуется температуру лампы N брать из значений, найденных ранее (для I_T и U_T).

11. Строят график функции $\varphi(T)$, откладывая по оси x абсолютную температуру T , а по оси y вычисленные значения $\varphi(T)$.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты заносят в таблицу.

№ п/п	$t_V^\circ\text{C}$	T_d	U_T	I_T	Φ_ν	$\frac{I_T U_T}{BT^4}$	$i_c(T)$	$i_k(T)$	$\varphi(T)$
					Среднее значение		×	×	×

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Введение. Поглощение света веществом часто сопровождается электрическими явлениями, которые называются фотоэффектом. Различают: 1) внешний фотоэффект, 2) внутренний фотоэффект и 3) фотоэффект в запирающем слое, или вентильный фотоэффект.

1. Внешний фотоэффект. Кванты света при взаимодействии их с некоторыми веществами — металлами могут вырывать из атомов этих веществ электроны, которые окажутся таким образом свободными и могут покинуть пределы вещества. Эти электроны получили название *фотоэлектронов*, а само явление *внешнего фотоэлектрического эффекта*.

Электромагнитная теория света не может объяснить всех закономерностей фотоэффекта. Объяснение фотоэффекта дает *квантовая теория*. По квантовой теории электромагнитное излучение имеет двойственную корпускулярно-волновую природу; с одной стороны, оно обладает *волновыми свойствами*, обуславливающими явления интерференции, дифракции, поляризации, а с другой стороны, представляет собой поток *частиц* — *фотонов*. Фотоны — это *кванты электромагнитного излучения*, которые ввел в 1905 г. Эйнштейн, разлив гипотезу Планка о квантах (см. стр. 375).

Эйнштейн предположил, что свет не только излучается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных порций энергии — квантов электромагнитного излучения — фотонов. Для монохроматического излучения с частотой ν все фотоны обладают одинаковой энергией

$$\epsilon = h\nu.$$

С квантовой точки зрения при падении пучка фотонов на поверхность металла происходит соударение фотона с электроном металла; фотон отдает электрону всю свою энергию $h\nu$. Эта энергия идет на то, чтобы вырвать электрон из металла и сообщить электрону кинетическую энергию. В соответствии с законом сохранения энергии уравнение для *внешнего фотоэффекта* (*уравнение Эйнштейна*) будет иметь вид:

$$h\nu = A + \frac{m_e v_e^2}{2}, \quad (1)$$

где $h\nu$ — энергия фотона, A — работа выхода электрона из металла — минимальное значение энергии, необходимое для вывода электрона из металла, $\frac{m_e v_e^2}{2}$ — кинетическая энергия вылетевших из металла электронов; m_e и v_e — масса и скорость электронов.

Для внешнего фотоэффекта имеют место законы А. Г. Столетова.

1. Скорость фотоэлектронов зависит от частоты ν падающего света и не зависит от его интенсивности. Если $h\nu_0 \leq A$, то электроны из металла вылетать не будут. В этом случае имеем *красную границу фотоэффекта или порог фотоэффекта*.

Наибольшая длина волны λ_0 или соответствующая ей наименьшая частота ν_0 , при которой начинается фотоэффект, называется *порогом фотоэффекта или красной границей*.

Для порога фотоэффекта

$$h\nu_0 = A, \text{ так как } \frac{m_e v_e^2}{2} = 0. \quad (2)$$

2. Число фотоэлектронов, вылетающих в единицу времени с единицы поверхности при $\lambda = \text{const}$, пропорционально интенсивности потока излучения.

3. Число фотоэлектронов, вылетающих в единицу времени с единицы поверхности при постоянной интенсивности падающего потока излучения (т. е. при постоянном числе падающих фотонов), увеличивается с увеличением частоты.

2. **Внутренний фотоэффект.** *Внутренний фотоэффект* возникает при облучении светом полупроводников или диэлектриков. *Освобожденные при облучении электроны не покидают пределы тела, а, оставаясь внутри этих тел, увеличивают их электропроводность* за счет возрастания в теле числа свободных носителей тока — электронов и дырок. Если энергия фотона $\epsilon = h\nu$ достаточна для того чтобы при ее поглощении электрон перешел из валентной зоны в зону проводимости (см. рис. 117 и 118), то в зоне проводимости появятся электроны, а в валентной зоне — дырки, что увеличит число носителей тока.

3. **Фотоэффект в запирающем слое — вентиляльный.** *Вентильный фотоэффект, или фотоэффект в запирающем слое, состоит в возникновении электро-*

движущей силы на границе двух полупроводников различной проводимости (или металла и полупроводника) вследствие внутреннего фотоэффекта. При соприкосновении двух полупроводников с различной проводимостью (*p*-проводимость и *n*-проводимость) или полупроводника и металла в месте контакта возникает «запирающий слой» (толщина которого $\approx 10^{-4} - 10^{-5}$ см), который обуславливает одностороннюю проводимость такой системы. Односторонняя проводимость проявляется в том, что ток через запирающий слой практически идет только в одном направлении (см. стр. 244, 245).

При освещении светом области контакта в этой области вследствие внутреннего фотоэффекта возрастает число свободных носителей тока. Это вызывает нарушение равновесного распределения носителей тока в области контакта и приводит к изменению контактной разности потенциалов по сравнению с равновесной, т. е. к возникновению фото-э. д. с. Фото-э. д. с. поддерживается действием света ($h\nu$). Таким образом, при облучении светом места контакта образуется элемент, способный служить источником тока. В этом и заключается вентильный фотоэффект.

Все рассмотренные виды фотоэффекта нашли широкое применение в науке и технике: в фотоэлектронном контроле, в звуковом кино, в телевидении, в видении в темноте при помощи инфракрасных лучей и т. д. Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии света в электрическую энергию, называются фотоэлементами. Фотоэлементы очень разнообразны по своей конструкции и типу. Различают фотоэлементы с внешним фотоэффектом, так называемые вакуумные или газонаполненные фотоэлементы, с внутренним фотоэффектом — фотосопротивления и фотоэлементы, основанные на фотоэффекте в запирающем слое — вентильные. К. п. д. вентильных фотоэлементов выше, чем газонаполненных или вакуумных, он достигает 10—11%, теоретические расчеты говорят о том, что он может быть 20%.

В вентильных фотоэлементах происходит непосредственное преобразование энергии света в энергию тока, для таких фотоэлементов не требуется внешнего источника э. д. с. Кремниевые фотоэлементы с запирающим слоем применяются в создании солнечных батарей, в которых происходит прямое преобразование энергии солнечного излучения в электроэнергию. Такие солнечные батареи стоят

на искусственных спутниках Земли. При нормальном падении солнечных лучей фотоэлемент с площадью в 10 м^2 (к. п. д. 10%) равноценен мотору с мощностью 1 квт.

Работа № 71

Снятие вольт-амперной характеристики газонаполненного фотоэлемента

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, к ней две ползушки с держателями, зеркальный гальванометр, эталонная лампочка на 126 в, вольтметр, реостат, масштабная линейка, источник тока, газонаполненный фотоэлемент, вольтметр для газонаполненного фотоэлемента.

Теория метода и описание установки. Действие фотоэлементов с внешним фотоэффектом основано на потере отрицательного заряда катодом фотоэлемента при освещении его поверхности. На рис. 225: *B* — газонаполненный фотоэлемент, который представляет собой стеклянный сферический баллон, наполненный инертным газом при небольшом давлении порядка $1-0,005 \text{ мм рт. ст.}$ (наличие инертного газа повышает чувствительность фотоэлемента, так как при достаточной разности потенциалов между катодом *K* и анодом *A* каждый фотоэлектрон может ионизовать атомы газа, а следовательно, создать лишние электроны).

На одну половину внутренней поверхности баллона *B* путем распыления нанесен тонкий слой разных металлов; этот металлический слой *K* представляет собой фотокатод. В качестве материала для изготовления фотокатода применяются щелочные металлы Na, K, Rb, Cs, так как для этих металлов наблюдается заметный фотоэффект уже при видимом свете — работа выхода *A* у этих металлов небольшая (таблица на установке). Металлический анод *A* фотоэлемента имеет форму сферы и расположен в центральной части баллона. Электрические выводы от катода и анода впаяны в нижнюю часть баллона и смонтированы в цоколь фотоэлемента.

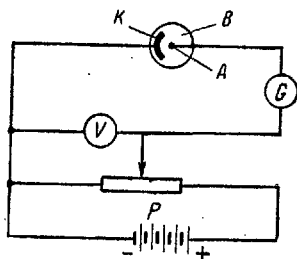


Рис. 225

Если на фотокатод K подействовать светом, содержащим длины волн, способные вырвать электроны, т. е. столкновение фотонов с электронами приведет к выбиванию электронов из фотокатода, то по цепи пойдет ток, величина которого зависит от освещенности фотокатода светом и от спектрального состава источника света; он называется фототоком.

Электроны, вырываемые светом с освещенного катода K , летят на анод A , ускоряемые электрическим полем, приложенным между катодом и анодом.

Фототок, текущий в цепи фотоэлемента, измеряется гальванометром G и растет с напряжением, подаваемым на ка-

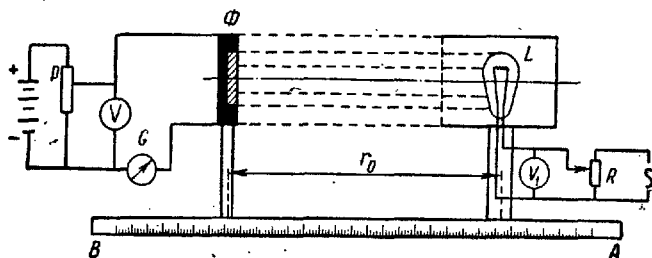


Рис. 226

тод, но при определенном напряжении достигает насыщения и дальнейшее повышение напряжения не ведет к увеличению тока.

Зависимость силы фототока i в фотоэлементе от величины наложенного на него напряжения U (при неизменной освещенности фотокатода) называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему включения газонаполненного фотоэлемента (газонаполненный фотоэлемент смонтирован отдельно в металлическом кожухе для защиты его от постороннего света).

2. Газонаполненный фотоэлемент B с источником тока помещают на оптическую скамью (рис. 226).

3. Лампочку осветителя в 20—50 св ставят на расстоянии $r_0 = 30, 40, 50$ см от фотоэлемента и продельывают для каждого положения лампочки следующие измерения: определяют силу фототока i в гальванометре через каждые 10 в, начиная от нуля до полного выключения потенциометра R , затем понижают напряжение через каждые 10 в до нуля.

Результаты измерений представляют в виде трех графиков $i = f(U)$, U — напряжение в цепи фотоэлемента.

Значения фототока, откладываемые на графике по оси y , берут средними из значений, полученных при повышении и понижении напряжения. По оси x откладывают значения напряжения U . Находят ток насыщения.

Все полученные опытом результаты сводятся в таблицу.

$I =$

r_0	U_1 при повышении	U_2 при понижении	i при U_1	i при U_2	i среднее
	0	0			
	10	10			
	20	20			
	⋮	⋮			
	⋮	⋮			
	⋮	⋮			

Работа № 72

Снятие удельной интегральной* чувствительности и вольт-амперной характеристики фотоэлемента с внутренним фотоэффектом — фотосопротивления

Приборы и принадлежности: фотосопротивление типа ФСК-1, источник постоянного тока, зеркальный гальванометр, эталонная лампочка накаливания, вольтметр, лампочки, реостат, оптическая скамья с ползушками, вольтметр, фотосопротивления.

Теория опыта и описание установки. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом называются фотосопротивлениями. Они изготавливаются из сернистого свинца, сернистого

* Чувствительность к неразложенному (белому) свету.

Каждый график вольт-амперной характеристики состоит из двух зависимостей: а) графика «темнового тока» $i'_0 = f(U_0)$ и б) графика тока при освещении $i = f(U_0)$.
Все полученные опытом результаты сводят в таблицу.

Для «темнового тока»		Для тока при освещении	
U_0	i'_0	U_0	i

График для «темнового тока» снимают один раз.

Работа № 73

Определение интегральной чувствительности фотоэлемента с запирающим слоем — вентильного

Приборы и принадлежности: селеновый фотоэлемент, оптическая скамья с ползушками, зеркальный гальванометр, эталонная лампочка накаливания, реостат, вольтметр.

Теория метода и описание установки. Чувствительностью (интегральной) фотоэлемента γ называется отношение величины тока i' , даваемого фотоэлементом, к величине падающего на него светового потока Φ :

$$\gamma = \frac{i'}{\Phi}. \quad (5)$$

Чувствительность выражают в микроамперах на люмен. Преобразуем формулу (5), заменяя Φ через ES , а E через $\frac{I}{r_0^2}$:

$$\gamma = \frac{i'}{\Phi} = \frac{i'}{ES} = \frac{i'r_0^2}{IS}, \quad [\gamma] = \frac{\text{мкА}}{\frac{\text{лм}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2} = \text{мкА/лм}, \quad (6)$$

где $E = \frac{I}{r_0^2}$ — освещенность поверхности фотоэлемента в том случае, когда световой поток падает нормально к освещенной поверхности, I — сила света лампочки накаливания, r_0 — расстояние между источником света и фотоэлементом, S — площадь светочувствительного слоя фотоэлемента, на

которую падает световой поток, равна площади диафрагмы фотоэлемента.

Если D — диаметр диафрагмы; то

$$S = \frac{1}{4} \pi D^2.$$

Подставляя в выражение (6) значение S , получим окончательную формулу для определения чувствительности фотоэлемента:

$$\gamma = \frac{4i'r_0^2}{\pi D^2}. \quad (7)$$

В данной работе используют селеновый фотоэлемент с запирающим слоем.

Селеновый фотоэлемент (рис. 227) состоит из железной пластинки M , покрытой слоем селена A , на который нанесен сверху полупрозрачный слой золота или другого металла C . На границе между селеном и золотым слоем образуется запирающий слой B . Если слой золота соединить через гальванометр с железной пластинкой и освещать селен, то кванты света будут вырывать электроны из селена, полупроводника с n -проводимостью и переводить их в золото через запирающий слой (см. стр. 388).

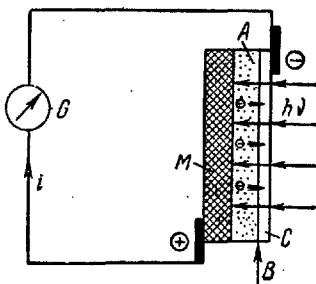


Рис. 227.

Селен заряжается положительно, контактный электрод железо получит положительный потенциал, а второй электрод золото — отрицательный, и таким образом получим элемент. В результате гальванометр покажет наличие тока i в цепи от Se к Au. Этот ток называется *фототоком*. Электроны могут переходить из одной пластинки в другую только в одном направлении (от селена к золоту), обратный же переход для них закрыт; отсюда и название — запирающий слой.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Собирают схему, как показано на рис. 228, где BA — оптическая скамья (деревянная рейка с миллиметровым масштабом и ползушками); Φ — селеновый фотоэлемент с колпачком и диафрагмой, G — зеркальный гальванометр, L — осветитель с лампочкой накалывания, V — вольтметр, R —

потенциометр, S — источник тока, r_0 — расстояние между фотоэлементом и лампочкой.

Светящаяся нить лампочки должна быть установлена на одной высоте с центром фотоэлемента.

2. Не включая лампочку, определяют нулевую точку гальванометра i_0 (при открытом фотоэлементе), предварительно посмотрев цену деления шкалы гальванометра.

3. Устанавливают напряжение на лампочке, равное 127 в , и поддерживают его все время реостатом R (сила света, даваемая лампочкой при напряжении 127 в , равна 10 св).

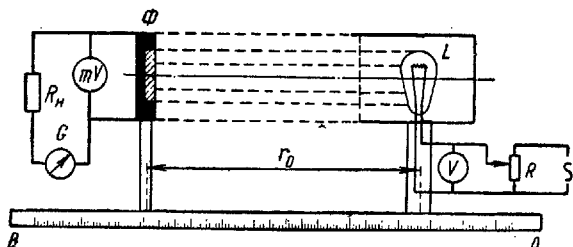


Рис. 228

4. Фотоэлемент и источник света устанавливают друг от друга на таком расстоянии, чтобы гальванометр давал отклонения более чем на половину шкалы.

5. Открыв колпачок фотоэлемента, определяют по гальванометру величину фототока i и расстояние r_0 . Сила фототока, создаваемая светом самой лампы, $i' = i - i_0$.

6. Измеряют D — диаметр диафрагмы фотоэлемента.

7. Измерения повторяют три раза, меняя немного r_0 .

8. Подставляя в формулу (7) значения i' и r_0 , взятые из каждого отдельного опыта, вычисляют три значения для γ .

Все полученные опытом (и вычислением) результаты сводятся в таблицу.

i_0	i	i'	r_0	γ	$\Delta\gamma$	$\frac{\Delta\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \cdot 100\%$	$\gamma_{\text{ист}} = \bar{\gamma} \pm \Delta\bar{\gamma}$
						×	×
Среднее значение							

Приборы и принадлежности: оптическая скамья с ползушками, источник света, солнечная батарея — кремниевый фотоэлемент, зеркальный гальванометр, микровольтметр постоянного тока, реостат, вольтметр для осветителя.

Теория метода и описание установки. В данной работе исследуется работа кремниевое фотоэлемента — фотоэлемента с запирающим слоем, в котором используется вентильный фотоэффект. Устройство кремниевое фотоэлемента основано на том, что при контакте двух примесных полупроводников, один из которых имеет дырочную, другой — электронную проводимость (см. стр. 244), в месте контакта образуется *p-n-переход*, который может служить источником фотоэлектродвижущей силы, преобразуя лучистую энергию в энергию электрическую; *p-n-переход* в кремниевых преобразователях получается следующим образом: на поверхность *p*-полупроводника (кремния) путем диффузии наносится тонкий слой фосфора, обладающего *n*-проводимостью. Между *p*- и *n*-полупроводником образуется двойной электрический слой толщиной *l* (см. рис. 121, а) — *p-n-переход*. В месте контакта под действием света возникает фото-э. д. с., которая пропорциональна интенсивности потока излучения, так как зависит от числа фотонов, падающих на единицу площади поверхности контактного слоя. Если облучать место контакта и замкнуть полупроводники на гальванометр *G*, то во внешней цепи потечет фототок (рис. 228). В данной работе снимаются графики зависимости фототока от освещенности и определяется спектральная чувствительность батареи.

1. Снятие графика зависимости фототока от освещенности поверхности фотоэлемента. 1. Собирают схему (рис. 228). На схеме Φ — кремниевый фотоэлемент, *G* — гальванометр, *mV* — милливольтметр, R_H — нагрузочное сопротивление, *L* — лампа осветителя, *V* — вольтметр лампы, *R* — потенциометр.

2. Меняя расстояние r_0 между лампой и фотоэлементом, снимают график зависимости фототока *i* от освещенности *E*,

откладывая по оси x значения освещенности, вычисленные по формуле

$$E = \frac{I}{r_0^2},$$

где I — сила света источника в свечах (дана на приборе), r_0 — расстояние между L и Φ . По оси y откладывают значения силы фототока, которые снимают по гальванометру G .

3. Одновременно с кривой $i = f(E)$ строят кривую $i = f(U_0)$, снимая значения U_0 по милливольтметру.

II. Определение спектральной чувствительности солнечной батареи. Спектральной чувствительностью C_λ называется отношение величины фототока короткого замыкания $i_{к.з}$ (когда нагрузочное сопротивление R_n в цепи батареи равно нулю) к падающему на фотоэлемент потоку Φ_λ монохроматического излучения

$$C_\lambda = \frac{i_{к.з}}{\Phi_\lambda}. \quad (8)$$

Кроме спектральной чувствительности часто строят график зависимости спектральной чувствительности от длины волны, т. е. $C_\lambda = f(\lambda)$.

Эта зависимость отражает воздействие на фотоэлемент света различных длин волн. Максимум спектральной чувствительности кремниевого фотоэлемента лежит в интервале длин волн от 0,7—0,8 мкм.

Зная распределение C_λ фотоэлемента по спектру, можно рассчитать величину тока, которая возникает во внешней цепи при падении на него светового потока от любого источника, если известен закон распределения световой энергии данного источника по спектру.

Для определения $C_\lambda = f(\lambda)$ делают следующее:

- Собирают схему (рис. 228 и 229). б) Между лампой L и фотоэлементом Φ помещают призму A и, перемещая призму по прямой SE , последовательно освещают (через диафрагму D) окошечко фотоэлемента Φ светом различных длин волн от красного до фиолетового. По гальванометру G снимают значения тока замыкания для каждой длины волны.
- По формуле (8) вычисляют значения C_λ для каждого зна-

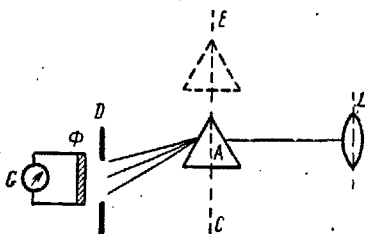


Рис. 229

чения i тока замыкания, где Φ_λ — среднее значение для данного интервала, найденного из графика $\Phi_\lambda = f(\lambda)$, распределения энергии светового потока по длинам волн при данной температуре. График дан на установке. г) По вычисленным значениям S_λ строят график $S_\lambda = f(\lambda)$, откладывая по оси x значения S_λ , а по оси y длины волн, соответствующие средним значениям Φ_λ .

При вычислении S_λ интервалы длин волн берут из следующей таблицы.

№ п/п	Лучи	Длины волн, мкм
1	Красные	0,76—0,62
2	Оранжевые	0,62—0,58
3	Желтые	0,58—0,56
4	Зеленые	0,56—0,51
5	Голубые	0,51—0,48
6	Синие	0,48—0,45
7	Фиолетовые	0,45—0,40

ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

ЧАСТЬ V

ФИЗИКА АТОМА (ТЕОРИЯ БОРА)

Введение. Атомом называется наименьшая частица химического элемента, обладающая его химическими свойствами. Атом ($d_a \approx 10^{-8}$ см) состоит из положительно заряженного ядра ($d_j \approx 10^{-12} - 10^{-13}$ см) и электронов, движущихся в его кулоновском поле. Заряд ядра равен суммарному заряду его электронов. Простейшим атомом является атом водорода. У атома водорода имеем протон (ядро) и вокруг протона движется один электрон. Водородоподобными атомами являются ионы He^+ , Li^{++} , Be^{+++} и т. п. (ионизированные атомы один, два, три и т. д.).

I. В основу теории водородного атома положены два постулата Бора.

Первый постулат; электроны могут двигаться в атоме только по определенным орбитам, находясь на которых, они, несмотря на наличие у них ускорения, не излучают. Эти орбиты соответствуют стационарным состояниям электронов в атоме и определяются условием

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar, \quad (1)$$

где r_n и v_n — радиус и скорость электрона на n -орбите, $m_e v_n r_n$ — момент количества движения электрона на этой орбите, n — целое число ($n \neq 0$) — *главное квантовое число.*

Уравнение (1) выражает условие квантования.

Второй постулат: атом излучает (поглощает) квант электромагнитной энергии, когда электрон переходит с орбиты с большим (меньшим) на орбиту с меньшим (большим) радиусом. Энергия кванта равна разности энергий электрона на орбитах до и после перехода:

$$\varepsilon = h\nu_{mn} = E_m - E_n, \quad (2)$$

где ν_{mn} — частота кванта (фотона), возникающего или поглощаемого при переходе.

Стационарные или нормальные состояния (при $n = 1$), в которых атомы могут находиться длительное время. Если электрон в атоме, находящемся в стационарном состоянии, получил извне энергию и перешел на другую орбиту (неквантованную), то атом пришел в возбужденное состояние. Все состояния с $n > 1$ возбужденные. В возбужденном состоянии атом имеет энергию большую, чем в основном состоянии. Возбужденное состояние неустойчивое, электрон мгновенно возвращается обратно на свою прежнюю орбиту. Атом приходит в прежнее стационарное состояние, а излишек энергии излучается в пространство в виде монохроматического излучения, т. е. одной какой-то спектральной линии. Частота монохроматического излучения атома или спектральной линии подчиняется условию

$$\nu_{mn} = \frac{\varepsilon}{h} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Для каждого перехода электрона излучается своя спектральная линия. Таким образом, спектр такого излучения представляет собой отдельные линии, каждая из которых соответствует определенным излучениям.

II. Постулаты Бора не следуют ни из каких положений классической физики, но они получают объяснение на основе квантовой теории. Из постулатов Бора вытекает наличие в атоме уровней энергии атома E_1, E_2, \dots, E_n , эти значения энергии соответствуют стационарным состояниям атома. Испускание или поглощение кванта энергии сопровождается переходом атома из одного стационарного состояния E_1 в другое E_2 . Наличие в атоме уровней энергии подтверждают опыты Франка и Герца (см. работу № 75).

Энергия атома состоит из потенциальной энергии U взаимодействия между ядром и электроном и кинетической энергии $\frac{m_e v_n^2}{2}$ движения электрона по орбите n со скоростью v_n .

Полная энергия атома E_n равна:

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} + U = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (3)$$

Знак минус указывает на то, что чем меньше радиус орбиты, тем меньше энергия.

Значения уровней энергии атома получаются, если подставить в формулу (3) значения

$$r_n = n^2 \cdot \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}. \quad (4)$$

III. Теория Бора объясняет происхождение линейчатых спектров водорода и водородоподобных атомов.

Спектр излучения частот атома водорода описывается формулой Бальмера—Ридберга:

$$\nu = cR' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (5)$$

где

$$R' = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{ch^3}; \quad R = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^3} \dots \quad (6)$$

Величины R' и R называются постоянными Ридберга, n и m — главные квантовые числа; $m > n$.

Преобразуем формулу (5); так как $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то

$$\frac{1}{\lambda} = N \cdot R' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7)$$

где λ — длина волны, c — скорость света, N — волновое число, характеризующее число волн, укладывающихся в 1 см.

Формула (7) называется сериальной формулой. Группа линий с одинаковым n называется серией. Для атома водорода имеем несколько серий: $n = 1, m = 2, 3, 4, \dots$ — серию Лаймана (линии лежат в далекой ультрафиолетовой области); $n = 2, m = 3, 4, 5, \dots$ — серию Бальмера (видимая часть спектра); $n = 3, m = 4, 5, 6, \dots$ — серию Пашена (инфракрасная часть спектра).

При значениях $n = 4, n = 5$ — серии лежат в инфракрасной части спектра.

Для водородоподобных атомов сериальная формула имеет вид:

$$N = Z^2 R' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где Z — порядковый номер элемента.

Теория Бора объяснила только лишь состав спектра и механизм образования спектральных линий атома водорода и водородоподобных атомов, но не смогла объяснить строение более сложных атомов.

IV. Для объяснения строения многоэлектронных атомов вводится понятие квантовых чисел. В настоящее время установлено, что состояние каждого электрона в атоме определяется четырьмя квантовыми числами*.

1. n — главное квантовое число входит в формулу (1) и (4). Формула (1) есть условие «квантования» радиуса орбиты для момента количества движения электрона; n принимает значения от 1 до ∞ , определяет размеры орбиты, от этого числа зависит энергия электрона в атоме.

2. l — орбитальное (побочное) квантовое число; l определяет эксцентриситет орбиты или орбитальный момент количества движения электрона. Различные значения l при данном n соответствуют движению электронов по эллипсам различной вытянутости. Совокупность всех электронов, движущихся по этим эллипсам, представляет собой электронный слой (оболочку). Слой с $n = 1$ называется слоем K , с $n = 2$ — L слой, с $n = 3$ — M слой (l может принимать значения от 0 до $n - 1$).

3. m_l — магнитное квантовое число. Это квантовое число определяет пространственную ориентацию орбиты электрона, т. е. проекцию вектора магнитного момента или момента количества движения на заданную ось. При помещении атома в магнитное поле спектральные линии расщепляются — появляются новые дополнительные энергетические уровни, что и определяется числом m_l . Значения m_l могут быть $l, (l - 1), \dots, 0, \dots, -(l - 1), -l$.

4. m_s — спиновое квантовое число. Это число характеризует наличие у электрона собственного момента количества движения — спина. Спин не объясняется вращением электрона вокруг собственной оси. Спин — особое свойство элементарных частиц. Наличие у электрона спина объясняет «тонкую структуру» спектральных линий (даже в отсутствие магнитного поля все линии спектра представляют из себя дублеты).

* Квантовые числа — набор динамических величин, в качестве которых можно выбрать те или другие физические величины, определяющие стационарные состояния электрона в атоме. Метод отбора орбит, соответствующих стационарным состояниям, называется квантованием.

Состояния электронов в атоме определяется *принципом Паули*: в одном и том же атоме не может быть двух (и более) электронов, у которых были бы одинаковы все четыре квантовых числа.

V. Теория Бора описывает атом с точки зрения классической физики без учета волновых свойств микрочастиц электронов. Для учета волновых свойств электронов существует волновое уравнение Шредингера; для водородного атома, находящегося в основном состоянии, это уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{8\pi^2m}{n^2} \left(W_1 + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0, \quad (7)$$

где ψ — волновая функция, она конечная, однозначная и непрерывная, W_1 — значение энергии основного состояния атома водорода, $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ — потенциальная энергия электрона, r — расстояние между электроном и ядром, m — масса электрона.

Волновая функция ψ характеризует объективное состояние микрочастицы (электрона).

Величина $|\psi|^2 \cdot \Delta V$ пропорциональна вероятности нахождения частицы в объеме ΔV , где $|\psi|^2$ — квадрат модуля — амплитуды ψ -функции.

Уравнение Шредингера дает только вероятность нахождения частицы (электрона) в определенной области пространства.

Решение уравнения (7) приводит:

1) к появлению дискретных решений, что соответствует боровским энергетическим уровням, соответствующих главным квантовым числам в теории Бора;

2) к выводу, что каждое квантовое состояние электрона в атоме водорода характеризуется набором целых чисел, соответствующих квантовым числам n , l и m , теории Бора (в теории Бора квантовые числа постулировались, а уравнение Шредингера содержит в себе все три условия квантования).

Уравнение Шредингера вносит существенное изменение в теорию Бора.

Квантовая теория отрицает существование орбит в атоме. Решение уравнения Шредингера дает лишь вероятность нахождения электрона в данном месте пространства $|\psi|^2 \times \Delta V$ — вероятность нахождения частицы в малом объеме ΔV , а $|\psi|^2$ — средняя плотность заряда в этом объеме. Таким образом, получается, что заряд электрона «размазан»

с различной плотностью по всему атому, он образует электронное «облако». Понятие «орбиты» радиуса r представляется как состояние электронного «облака», имеющего максимальную плотность на этих расстояниях r . Боровские орбиты электрона представляют собой геометрические места точек, в которых с наибольшей вероятностью может быть обнаружен электрон.

Работа № 75

Определение потенциалов возбуждения (опыт Франка и Герца)

Приборы и принадлежности: тиратрон с гелиевым или аргонным наполнением, батареи аккумуляторов на 6 в, 10 в и 30 в, два реостата, вольтметр на 6 в, вольтметр на 10 в, вольтметр на 30 в, микроамперметр на 160 а, два ключа.

Теория метода и описание установки. Непосредственные экспериментальные доказательства существования дискретных уровней энергии в атоме были получены при изучении ионизационных и резонансных потенциалов газов. Для того чтобы атом смог излучать энергию, необходимо его перевести в состояние возбуждения, т. е. переместить электрон в атоме с нормальной орбиты на одну из внешних орбит; этот процесс называется возбуждением атома. Возбуждение может быть вызвано различными способами: нагреванием до высокой температуры, неупругим столкновением атома с быстрым свободным электроном и др.

Разберем случай прохождения свободного электрона через газ. В этом случае столкновения электрона с атомами газа могут происходить двумя способами. В одном случае электрон может передать часть своей энергии атому, может иногда сам получить часть энергии от атома, при этом потенциальная энергия атома не изменяется. Такие столкновения называются *упругими*. Столкновения другого рода ведут к ионизации атома, т. е. электрон, столкнувшись с атомом, передает электрону атома такое количество кинетической энергии, что электрон может оторваться от атома. Такие столкновения называются *неупругими*. Часть кинетической энергии при этом преобразуется в потенциальную. Неупругое столкновение не всегда сопровождается ионизацией атома. Энергия электрона атома может несколько увеличиться без отрыва его от ядра; это происходит, если

электрон переходит на более высокий уровень энергии внутри атома.

В данной работе находят первый потенциал возбуждения для атома гелия или аргона, другими словами, определяют, при какой наименьшей энергии происходит первое неупругое столкновение атома гелия или аргона с быстро летящим электроном.

Принципиальная схема установки показана на рис. 230.

Баллон лампы *B* наполнен газом (например, парами ртути) при низком давлении. Горячий катод *K* испускает электроны. Перед анодом *A* ставится электрод *C* (сетка); разность потенциалов между анодом и катодом может быть

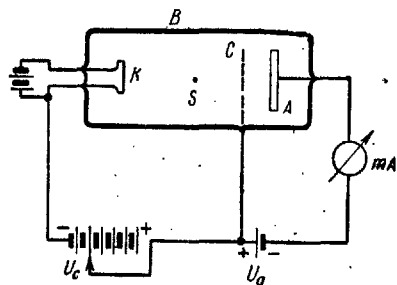


Рис. 230

любой. На анод *A* дается потенциал, слегка отрицательный по отношению к сетке *C*, например $0,5 U_c$.

Расположение электродов и давление газа подобраны так, что между сеткой *C* и анодом *A* соударений почти нет, соударения между электронами, испускаемыми катодом и атомами газа, происходят в пространстве между катодом *K* и сеткой *C*.

Если соударения упругие, электроны не теряют энергию и достигают анода. При неупругих соударениях электроны теряют энергию и оседают на сетке.

Таким образом, назначение сетки *C* заключается в том, чтобы вылавливать электроны, которые потеряли свою энергию вследствие неупругих соударений с атомами газа.

Опыт происходит следующим образом: дают на сетку потенциал, равный катоду; затем потенциал U_c увеличивают, тем самым разгоняя вылетающие с катода электроны (кинетическая энергия электронов возрастает). Электроны, вылетающие с катода, ускоряются и подлетают к сетке *C* с энергией $\frac{1}{2} mv^2 = eU_c$.

Пройдя сетку, электроны попадут в пространство между сеткой *C* и анодом *A*, где поле очень мало и скорость движения электронов v будет практически постоянной. Если энергия электронов на пути от катода к сетке не меняется, то все электроны пролетят сетку и достигнут анода, и по мере

увеличения напряжения U_c величина анодного тока I_a возрастает (рис. 231). Мы имеем участок кривой Oa — обычная вольт-амперная характеристика термоэлектронных приборов. Так будет обстоять дело до тех пор, пока разность потенциалов между катодом и сеткой U_c не достигнет определенной величины 4,9 в. Как только ускоряющий потенциал U_c достигнет этой величины, анодный ток резко убывает (участок кривой ab), а затем опять при дальнейшем увеличении U_c начинает возрастать до потенциала, 9,8 в для ртути (участок кривой bc).

Таким образом, кривая состоит из острых максимумов, отстоящих друг от друга на расстоянии 4,9 в (для ртути). Такой вид кривой говорит о том, что до тех пор, пока энергия электрона не достигла 4,9 в, электрон испытывает с атомами ртути упругие столкновения, не теряет энергию и достигает анода — ток в цепи анода растет.

При потенциале в 4,9 в столкновения электрона с атомами

ртути становятся неупругими и электрон отдает при соударении атому ртути всю свою энергию. Такие потерявшие свою энергию электроны уже не смогут пролететь сетку C (она их притянет, так как кинетическая энергия, а следовательно, и скорость электронов очень незначительны) и не достигнут анода, что дает резкое падение тока. Если же энергия заметно превосходит 4,9 в, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом ударе, все же обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть потенциал сетки и долететь до анода. При энергии электронов, равной 9,8 в, 14,7 в, электроны претерпевают неупругие соударения дважды и трижды, что дает второй и третий максимумы. Таким образом, для атомов ртути энергия в 4,9 в

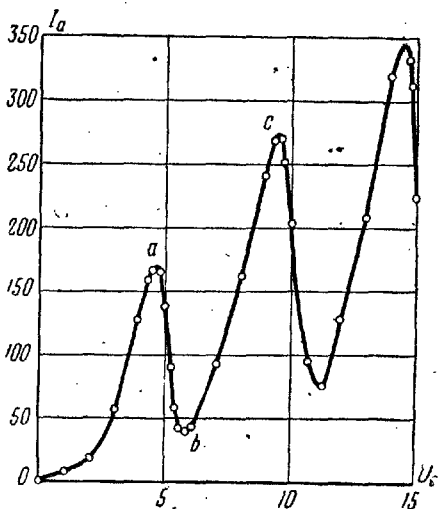


Рис. 231

имеет особое значение. Меньшую или большую (не кратную 4,9 эв) энергию атомы ртути не воспринимают, т. е. атом ртути может обладать не любым запасом энергии, а только избранным. Такой ход кривой и доказывает существование дискретных уровней энергии в атоме. Если E_1 — запас энергии «невозбужденного» атома ртути, то следующее возможное значение энергии атома будет $E_1 + 4,9$ эв. Ускоряющий потенциал 4,9 в называется «первым потенциалом возбуждения».

Как показали опыты, при неупругих ударах газ или пары металла начинают светиться и излучать в пространство

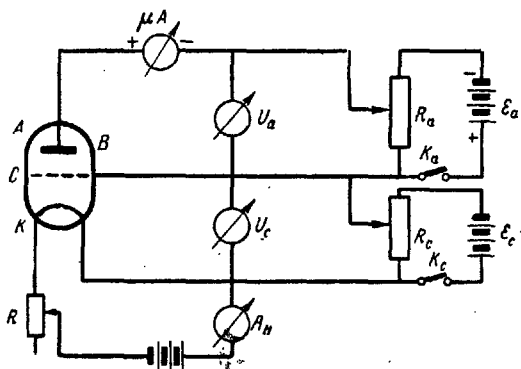


Рис. 232

совершенно определенные для данного газа спектральные линии с частотой ν , которая связана с энергией электрона E и с потенциалом возбуждения U следующим соотношением:

$$W = h\nu = eU.$$

Для ртути величина первого потенциала возбуждения 4,9 в. Длина волны, которая соответствует данному потенциалу и наблюдается в спектре ртути, $\lambda = 2537 \text{ \AA}$. Квант энергии, который соответствует данной длине волны λ , равен:

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 7,8 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Собирают схему (рис. 232). На схеме μA — микроамперметр, измеряющий ток в цепи анода A ; U_c — вольтметр, измеряю-

ший разность потенциалов между катодом K и сеткой C ; U_a — вольтметр, измеряющий разность потенциалов между анодом A и сеткой C ; A_n — амперметр в цепи катода; R_a и R_c — потенциометры в цепи анода и сетки; R — реостат, меняющий ток I_a .

2. Снимают сеточную характеристику лампы, для чего увеличивают напряжение U_c на сетке при заданном (постоянном) отрицательном напряжении на аноде и постоянном токе в цепи накала.

3. Строят график зависимости анодного тока от напряжения на сетке $I_a = f(U_c)$.

4. По графику определяют значение первого потенциала возбуждения U_c для аргона.

Все полученные опытом и вычислением результаты записываются в таблицу.

$U_a =$ $A_n =$

№ п/п	U_c	I_a	U_c
1			
2			
3			

Работа № 76

Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга

Приборы и принадлежности: спектроскоп прямого зрения, осветитель — водородная разрядная трубка, индукционная катушка с ключом, источник света для освещения шкалы спектроскопа.

Теория метода и описание установки. Спектры являются характеристикой атомов и молекул. Различают спектры линейчатые, полосатые и сплошные.

В данной работе определяем постоянную Ридберга, измеряя длину волны водородных линий [уравнение (5 и 6)].

Линейчатый спектр водорода получаем при помощи спектроскопа прямого зрения.

Оптическая схема, ход лучей в спектроскопе и спектроскоп. изображены на рис. 233 и 234.

Лучи от исследуемого источника S , пройдя через защитное стекло 1 , попадают в трубку коллиматора 2 , состоящую из объектива 3 и щели $3a$, находящейся в фокальной плос-

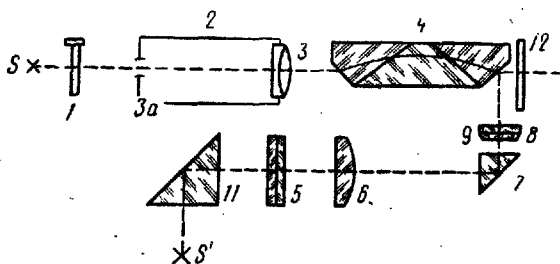


Рис. 233

кости объектива. Щель, образованную двумя параллельными гранями ножей, можно передвигать вдоль оптической оси объектива для наводки на резкость, что достигается вращением кольца 13 . Ширину щели можно изменять путем вращения кольца 14 .

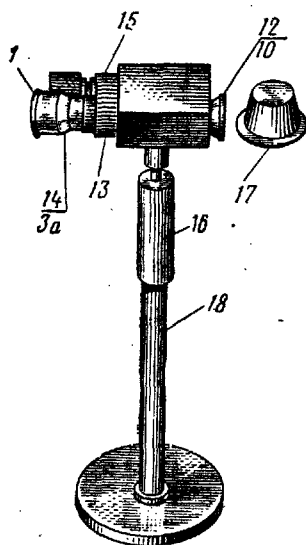


Рис. 234

Дисперсионной призмой является призма прямого зрения 4 . Средняя ее часть сделана из стекла «тяжелый флинт», а две одинаковые боковые части — из стекла «легкий крон». В результате средний (желтый) луч в пучке белого света проходит через такую призму без отклонения, по желтой линии делают правильную установку прибора. Лучи с большей и меньшей длиной волны отклоняются пропорционально в обе стороны от него.

Для отсчета длин волн имеется шкала 5 , которая с помощью линз 6 , 8 и 9 и призмы 7 проектируется в поле зрения прибора.

Фокусировка шкалы на резкость производится вращением кольца 13 . Шкала проградуирована от 390 до 760 нм. Соотношение между единицами: $1 \text{ нм} = 10^{-7} \text{ см}$; $1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^3 \text{ мм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^9 \text{ нм} = 10^{10} \text{ \AA}$.

Защитные стекла 1 и 12 предохраняют прибор от попадания внутрь его пыли и грязи. Призма 11 служит для подсвета шкалы от источника света S' , расположенного сбоку от прибора.

Для предохранения глаза от постороннего света на зрительную трубку 10 надевают большой резиновый наглазник 17. Спектроскоп 15 навинчивают на штатив 18, 16.

Источником света или осветителем является стеклянная трубка с капилляром посередине, наполненная очищенным водородом при давлении около 1 мм рт. ст. Капиллярная часть трубки укрепляется близко (параллельно) к щели, так как при включении высокого напряжения от индукционной катушки в капилляре происходит наибольшее свечение.

Водород — газ, большинство атомов которого объединено попарно в двухатомные молекулы. Так как сериальные закономерности касаются спектра одноатомного водорода, то наблюдение этого спектра в обычных условиях затруднено тем, что на линейчатый спектр атомного водорода накладывается полосатый спектр молекулярного водорода, т. е. происходит одновременное излучение обоих спектров. Но так как характер их различен, то можно наблюдать интересные нас линии серии Бальмера. Первая головная линия серии Бальмера H_α — ярко-красная линия, вторая H_β — зелено-голубая. В промежутке между этими линиями имеется ряд слабых красно-желтых и темно-зеленых молекулярных полос: их во внимание не брать. Третья линия H_γ — синяя, ей предшествуют две слабые размазанные фиолетовые молекулярные полосы. Четвертая линия H_δ — слабо-фиолетовая (в нашей установке видна плохо).

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Производят установку прибора, включают с разрешения преподавателя осветитель перед щелью спектрокопа на время, необходимое для выполнения измерения (не более).

2. Наблюдая спектр, фиксируют основные линии, начиная с красной, и записывают их длины волн.

3. Подсчитывают волновые числа $N = \frac{1}{\lambda}$ для каждой линии.

4. Вычисляют постоянную Ридберга по формуле (6) и по опытным данным для каждой линии, подставляя их в формулу (7). Из полученных значений определяют среднее и подсчитывают абсолютную и относительную ошибки.

5. Все полученные опытом и вычислением результаты сводятся в таблицу.

Цвет и индекс спектральной линии водорода	Длина волны		Волновое число N в см ⁻¹	Квантовые числа		Постоянная Ридберга R из опыта	ΔR	$\frac{\Delta R}{R} \cdot 100\%$	$R_{\text{ист}} = \bar{R} \pm \pm \Delta R$
	в н.м	в см		n	m				
Ярко-красная H_α				2	3				
Зелено-голубая H_β				2	4			×	×
Синяя H_γ				2	5				
Слабо-фиолетовая H_δ				2	6				
	Среднее значение		×	×	×				

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ

Приборы и принадлежности: спектроскоп или стилоскоп, спектральные трубки (гелий, неон, водород, ртуть, воздух), штатив для трубок, индукционная катушка с ключом, миллиметровая бумага.

Теория метода и описание установки. Излучение света различными телами при их нагревании до высоких температур принято называть *тепловым или температурным излучением*.

Если свет от раскаленного тела пропустить через призму, то на экране за призмой получим непрерывную цветную полосу, к которой прибавляют еще справа и слева невидимые части. Вся картина вместе носит название *непрерывного или сплошного спектра испускания*. Такой спектр получается, например, от раскаленной вольфрамовой нити лампы накаливания.

Если источником света является раскаленный газ или пар, то картина спектра существенно меняется: на месте непрерывно переходящих одна в другую цветных полос наблюдаются несколько ярких линий, разделенных темными полосами. Такие спектры называются *линейчатыми*. Линей-

чатые спектры испускания возникают в тех случаях, когда источником излучения служат атомы или ионы химических элементов, находящихся в газообразном состоянии. Примерами линейчатых спектров служат спектры водорода, неона, гелия.

Если источником излучения служат не атомы или ионы, а молекулы вещества, то получается так называемый *полосатый* спектр (например, спектр метана). По виду полосатый спектр похож на линейчатый, но только в полосатом спектре наблюдаются не цветные полосы на темном фоне, как у линейчатого, а наоборот, на цветном фоне — темные полосы.

Для качественных исследований видимой части спектра служат различного типа спектроскопы. Один из наиболее простых типов состоит из треножного штатива (рис. 235), на котором укреплены следующие части: коллиматор *A*, зрительная труба *B* и столик с призмой *D*.

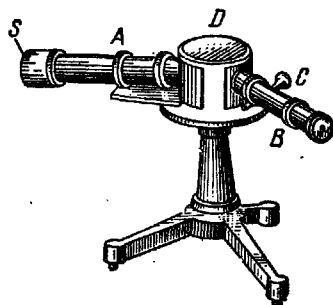


Рис. 235

Коллиматор *A* состоит из оптической трубы, в которой окуляр заменен щелью *S*. Щель помещена в главном фокусе объектива O_1 (рис. 236), поэтому лучи, идущие из нее, выходят из объектива параллельным пучком. Ширину щели *S* можно менять с помощью винта.

Призма *D*, которая помещается на столике спектроскопа, устанавливается на угол наименьшего отклонения выходящих лучей. Лучи из объектива O_1 падают на переднюю грань призмы (рис. 136), в которой разлагаются и выходят параллельными пучками разных цветов и направлений, смотря по их составу.

Пройдя призму, лучи поступают в оптическую трубу *B* через объектив O_2 , который дает изображение спектра в фокальной плоскости линзы O_3 . Так как выходящие из призмы пучки параллельных лучей различных цветов имеют различное направление, то в фокальной плоскости линзы O_3 получается ряд параллельных изображений этих пучков (ряд различно окрашенных изображений щели). Эти изображения рассматриваются через окуляр O_3 трубы *B*.

Для определения относительного положения полос спектра в окулярной трубе имеется указатель, который при помощи винта C (рис. 235) можно передвигать и совмещать с любым изображением щели. На винте C есть миллиметровые деления, а барабан винта разделен на 50 частей. Ход винта равен 1 мм; следовательно, цена делений на барабане винта

$$N = \frac{1}{50} \text{ мм} = 0,02 \text{ мм}.$$

Положение каждого изображения щели можно характеризовать отсчетом на барабане.

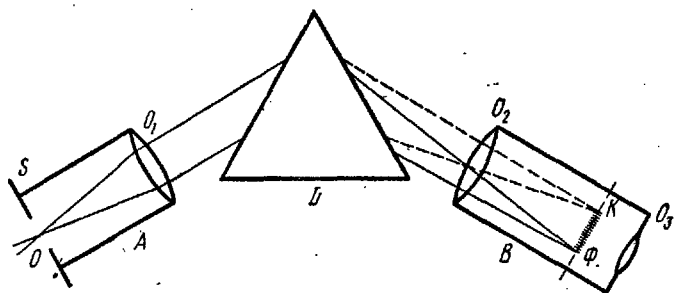


Рис. 236

Работа заключается: 1) в градуировке шкалы спектроскопа и 2) в исследовании линейчатого спектра испускания какого-либо металла или газа, т. е. в определении длины волн линий, наблюдаемых в спектре этого металла (или газа). В данной работе определяют длины волн спектра неона.

Работа № 77

Градуирование спектроскопа

Градуирование спектроскопа заключается в построении градуировочного графика спектроскопа по известным длинам волн линейчатого спектра известного газа, для чего по оси x откладывают показания барабана n , а по оси y — длины волн λ . Для этого пользуются спектральными трубками, наполненными специально очищенными газами, на-

ходящимися под давлением около 1 мм рт. ст. и имеющими в средней части капилляр, где при пропускании разряда происходит наиболее интенсивное свечение. В качестве источника тока может быть взята небольшая индукционная катушка, питаемая постоянным током.

Спектральная трубка укрепляется на штативе в вертикальном положении и присоединяется к клеммам вторичной обмотки индукционной катушки (которая присоединяется к розетке постоянного тока). Отрегулировав прерыватель катушки, включают трубку. Не следует заставлять ее работать в то время, когда не производится наблюдение, так как от продолжительной работы трубка начинает светиться менее интенсивно.

Щель предварительного установленного спектроскопа следует возможно ближе придвинуть к капилляру спектральной трубки, причем она должна быть расположена параллельно капилляру, т. е. вертикально. Следует иметь также в виду, что наблюдаемый в трубке спектр зависит помимо прочих условий и от того режима, при котором работает трубка, от величины искры, от интенсивности разряда, частоты прерывателя и т. д. Для каждой отдельной трубки необходимо найти из опыта наилучшие условия режима ее работы и обеспечить таким образом наибольшую четкость и яркость спектра. При пользовании водородной трубкой необходимо добиться условий наиболее яркого темно-красного свечения. Нужно заметить, что свечение это неодинаково по всей длине капилляра, поэтому необходимо направлять спектроскоп на наиболее яркий интенсивно окрашенный участок.

Градуирование барабана спектроскопа можно вести по любой трубке, если известны длины волн находящегося в ней газа. Длины волн для градуирования, их расположение и цвет даны в таблицах для справок в конце книги. Порядок выполнения работы дан на стр. 417.

Работа № 78

Градуирование стиллоскопа

Переносный стилоскоп СЛП-2 представляет собой спектроскоп специальной конструкции. На оптической схеме прибора (рис. 237) А — источник света (газонаполненная трубка), 1 и 2 — защитные стекла, 3 — призма, которая

направляет лучи на конденсор 4. Из конденсора лучи через щель 5 попадают на объектив 6. Щель находится в фокусе объектива. Из объектива параллельный пучок лучей проходит две диспергирующие призмы 7 и 8. Большой катет призмы 8 посеребрен, и лучи отражаются от этой грани

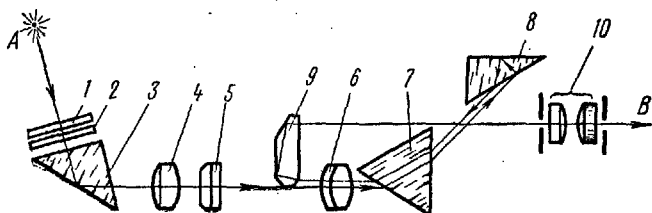


Рис. 237

и снова попадают в призму 7; такое двойное прохождение света через призмы 7 и 8 увеличивает дисперсию прибора. Через объектив 6, который делает лучи сходящимися, и призму 9 лучи попадают в окуляр 10, а отсюда в глаз наблюдателя. Спектральная схема прибора (объектив, дисперсные призмы и призма 9) находится в корпусе 11 (рис. 238).

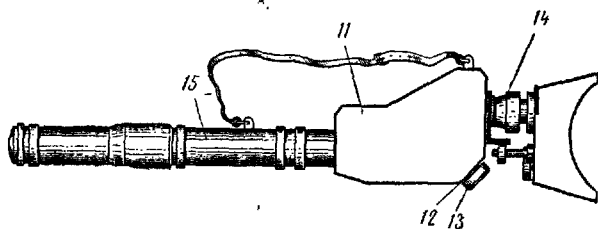


Рис. 238

Сбоку от корпуса прибора помещается барабан 12 с делениями 13. Вращением барабана 12 поворачивают призму 8, вследствие чего спектр перемещается в поле зрения окуляра 14 (на рис. 237—10) с наглазником. Оправа со щелью помещается в металлической трубке 15. Для фиксирования спектральных линий в поле зрения окуляра оптической трубы имеется указатель.

Градуирование стилоскопа, так же как и спектроскопа, заключается в построении графика $\lambda = f(n)$, где n — показания шкалы барабана 12. Для этого пользуются спектральными трубками определенного газа, длины волн испускания которого известны.

Трубку с известным газом устанавливают перед стилоскопом на расстоянии около 1 см от его трубки 15, например в точке А (рис. 238). Трубки питаются от индукционной катушки.

1. Градуирование спектроскопа (стилоскопа)

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Устанавливают трубку с гелием, азотом или водородом и включают ток.

2. Наблюдая спектр гелия, азота или водорода и осторожно вращая барабан, приводят указатель окуляра оптической трубы спектроскопа или стилоскопа в совпадение с первой хорошо различимой линией, например ярко-красной, и делают отсчет по шкале винта и барабана *. Затем, вращая барабан, переводят указатель на следующую хорошо видимую линию и опять делают отсчет по шкале винта и барабана и т. д. Результаты измерений заносят в таблицу отчета записи, предварительно записав в нее известные длины волн спектра, по которому ведется градуировка. Длины волн спектра выписывают из таблицы, помещенной на установке.

3. Строят график градуировки $\lambda = f(n)$, откладывая на миллиметровой бумаге по оси абсцисс показания шкалы винта и барабана, а по оси ординат — длины волн. По этому графику можно определить длину волны любой неизвестной линии в другом каком-либо спектре, если известно ее положение по шкале винта и барабана спектроскопа или стилоскопа.

4. Зарисовывают спектр, соблюдая интервалы по длинам волн между спектральными линиями.

Показания шкалы винта и барабана спектроскопа или стилоскопа вносят в таблицу.

* Для спектроскопа отсчет делают по шкале винта и барабана, для стилоскопа — только по шкале барабана.

Длина волн для гелия, азота или водорода (ось y) λ	Показания шкалы винта и барабана для линий гелия, азота или водорода (ось x) (n)

II. Исследование спектра испускания неона

Измерения и обработка результатов измерений. Определяют длину волны желтой линии спектра неона. Для этого:

1) берут трубку с неоном и получают в ней электрический разряд. В спектроскопе или стилоскопе наблюдают спектр неона;

2) совмещая указатель окуляра с желтой линией спектра неона, определяют положение по шкале винта и барабана спектроскопа или стилоскопа этих линий спектра. Показания на шкале винта и барабана заносят в таблицу;

Цвет спектральной линии в спектре неона	Показания по шкале винта и барабана	Длина волны (находят из графика градуирования)

3) пользуясь кривой градуирования спектроскопа или стилоскопа, построенной в первом упражнении, определяют длины волн желтой линии неона. Для этого наносят на ось x показание по шкале винта и барабана и из этой

точки восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой градуирования. Опуская из точки пересечения перпендикуляр на ось y , находят соответствующее значение длины волны в спектре неона;

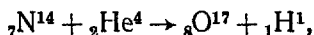
4) найденное значение длины волны записывают в таблицу (см. таблицу на стр. 418).

РАДИОАКТИВНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Введение. I. Атомное ядро представляет собой сложное образование, состоящее из элементарных частиц *: протонов и нейтронов.

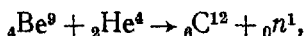
Протон (${}_1p^1$; ${}_1H^1$) имеет положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона ${}_1e^0$, и представляет из себя ядро атома водорода. *Нейтрон* ${}_0n^1$ — электрически нейтральная частица. Масса протона и нейтрона почти одинакова. Протоны и нейтроны ядра называются нуклонами.

Впервые *протон* был получен в 1919 г. Резерфордом при искусственном превращении ядра азота. Реакция идет так:



где ${}_2He^4$ — ядро гелия (α -частица).

Формула реакции получения *нейтрона*:

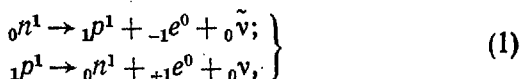


где ${}_4Be^9$ — бериллий, ${}_6C^{12}$ — углерод.

Ядерные реакции происходят в соответствии с законом суммарного массового числа A частиц (верхние индексы) и суммарного электрического заряда Z всех ядер и частиц, участвующих в реакции (нижние индексы).

Нейтрон и протон самопроизвольно превращаются друг в друга.

Реакции превращения идут по уравнениям:



* Частицы, которым нельзя приписать определенную внутреннюю структуру. Индекс внизу обозначает заряд, наверху — массовое число.

где ${}_{-1}e^0$ — символ электрона, ${}_{+1}e^0$ — символ позитрона (элементарная частица, имеющая массу электрона, заряд положительный, равный заряду электрона, *позитрон античастица электрона*), ${}_{0}\nu$, ${}_{0}\bar{\nu}$ — *нейтрино и антинейтрино* — элементарные частицы, не имеющие заряда и массы; существование этих частиц обнаруживают только косвенным путем.

II. Атомное ядро характеризуется *массой и электрическим зарядом*. Заряд ядра определяется суммарным зарядом находящихся в нем протонов. Масса ядра выражается в атомных единицах массы ($1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}$). Масса ядра практически совпадает с массой атома.

Число протонов в ядре называется *порядковым номером ядра Z* ; оно равно атомному номеру элемента.

Суммарное число протонов и нейтронов в атомном ядре называют *массовым числом* элемента — A . Так как число протонов в ядре равно Z , то число нейтронов равно $A - Z$. Массовое число равно ближайшему целому числу, выражающему атомный вес элемента.

Протоны и нейтроны прочно удерживаются внутри ядра силами, действующими на малых расстояниях ($r \approx 10^{-13} \text{ см}$). Силы, действующие между нуклонами и связывающие нуклоны в ядро, называются *ядерными силами*. Энергия, запасенная в атомных ядрах, называется *энергией связи ядра*. Эта энергия представляет собой разность между энергией всех ${}_{0}n^1$ и ${}_{1}p^1$ в ядре и их энергией в свободном состоянии. Энергия связи — мера устойчивости атомного ядра.

Энергия связи ΔE вычисляется по формуле

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2 = 931 \cdot \Delta m \text{ Мэв}, \quad (2)$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ — массы протона, нейтрона, ядра, Δm — «дефект» массы — «недостача» массы, получившаяся при образовании ядра элемента. «Дефект» массы — разность между суммарной массой частиц, составляющих данное ядро, и массой ядра ($m_{\text{я}}$).

«Дефекту» массы Δm соответствует энергия ΔE , которая выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов, Δm берется в *а. е. м.*

Закон

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 931 \Delta m \text{ (Мэв)} \quad (3)$$

называется *законом взаимосвязи массы и энергии* и является следствием теории относительности Эйнштейна.

Для вычисления энергии в ядерной физике применяется атомная единица энергии (*а. е. э.*), соответствующая Δt , равной 1 *а. е. м.*:

$$1 \text{ а. е. э.} = 1 \text{ а. е. м.} \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = \\ = 1,49 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 931 \text{ Мэв.}$$

Энергия, выделяющаяся при любых превращениях ядра, называется *ядерной энергией*. Ядро, имеющее наименьшую возможную энергию, равную энергии связи $\Delta E_{\text{мин}}$, находится в основном состоянии. Основное состояние очень устойчивое. Ядра, расположенные в конце периодической системы, менее устойчивы. Если ядро имеет энергию $\Delta E > \Delta E_{\text{мин}}$, то оно находится в возбужденном состоянии. Энергия ядра, так же как и атома, квантована.

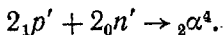
В ядре существует два рода сил: *электростатические силы* отталкивания (между протонами) и *ядерные силы* притяжения (между нуклонами). В существующей капельной модели ядра предполагается, что действие этих сил аналогично молекулярным силам в капле жидкости; в результате ядро принимает форму капли, устойчивую по отношению к деформациям. Отличие от капли жидкости — ядро заряжено и подчиняется законам квантовой механики.

III. Атомы, имеющие один и тот же атомный номер, но разные массовые числа, называют *изотопами*. Химически они тождественны и представляют собой разновидности одного и того же химического элемента.

Изотопы каждого химического элемента разделяются на стабильные и неустойчивые. *Самопроизвольное превращение неустойчивых ядер одного элемента в ядра другого элемента называется радиоактивным распадом*, а изотопы — радиоактивными. Большинство из них не встречается в природе вследствие своей неустойчивости и краткости периода полураспада по сравнению с возрастом Земли и получают лишь искусственным путем.

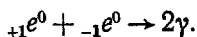
В процессе распада ядра атомов испускают радиоактивное излучение трех видов: α , β , γ .

1. α -лучи представляют собой ядра атома гелия (${}^4_2\text{He}$) с зарядом $Z = 2e$ и массовым числом $A = 4$ — это поток положительных частиц, при движении в веществе производят сильную ионизацию, α -частица возникает внутри ядра по следующей реакции:



2. β -лучи — поток быстро летящих электронов ${}_{-1}\beta^0$, ${}_{-1}e^0$; β -лучи образуются внутри ядра при реакции по формуле (1).

3. γ -лучи — жесткое электромагнитное излучение. Они образуются при делении ядра, при захвате ядром нейтрона, при радиоактивном распаде ядра, а также при взаимодействии позитрона и электрона:



Это явление называется *аннигиляцией*. Всегда при встрече всякой частицы со своей античастицей происходит превращение их в γ -фотоны (γ -кванты). Испускание γ -лучей сопровождается переходом ядра из возбужденного состояния в основное или в менее возбужденное, γ -лучи обладают большой проникающей способностью.

IV. Все радиоактивные изотопы обладают одной общей закономерностью, заключающейся в том, что количество атомов данного радиоактивного изотопа, распадающихся в среднем за единицу времени, всегда составляет определенную, характерную для данного изотопа часть от полного числа еще не распавшихся атомов. Математически это записывается так:

$$dN = -\lambda N \cdot dt^*,$$

где N — первоначальное число атомов, dN — число атомов, распавшихся за малый промежуток времени dt , λ — *постоянная распада, характерная для данного радиоактивного изотопа; характеризует долю ядер распадающихся за единицу времени*, т. е. определяет скорость распада.

В интегральной форме закон радиоактивного распада имеет вид:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

где N_0 — число атомов в начальный момент времени t_0 , N — число атомов, оставшихся к моменту времени t .

Обычно для характеристики скорости радиоактивного распада пользуются понятием: период полураспада.

Период полураспада T — это время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоак-

* Знак минуса указывает на то, что положительному dt соответствует отрицательное dN .

тивного вещества распадается наполовину. Из формулы (4) находим:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda T} = \frac{1}{2};$$

откуда

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (5)$$

Важной характеристикой радиоактивного препарата является его активность.

Активность В радиоактивного изотопа — это число атомов, распадающихся в 1 сек.:

$$B = - \frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (6)$$

В качестве единицы активности принят *кюри*. *Кюри* — это есть активность, при которой происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов за 1 сек; для радия — это соответствует активности 1 г, для урана-238 — 3 т. Часто употребляются производные единицы милликюри (*мкюри*) и микрокюри (*мккюри*).

1 *мкюри* = $3,7 \cdot 10^7$ распадов за 1 сек; 1 *мккюри* = $3,7 \cdot 10^4$ распадов за 1 сек.

Для измерения β - и γ -излучений используют приборы, называемые радиометрами. В радиометрах устройство, регистрирующее присутствие заряженных частиц, называется счетчиком. В данных работах используются газовые счетчики с самостоятельным разрядом Гейгера — Мюллера и сцинтилляционные счетчики.

V. *Счетчик Гейгера регистрирует β - и γ -излучение.* Он представляет собой проводящий цилиндр (катод) 1 с натянутой вдоль оси цилиндра тонкой металлической нитью 2 (анод), изолированной от катода (рис. 239).

Пространство между электродами заполнено газом при пониженном давлении. Между анодом и катодом создается высокая разность потенциалов порядка 300—1500 в. Нить через сопротивление соединяется с землей.

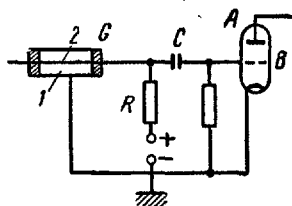


Рис. 239

β -частица или γ -квант, пройдя сквозь цилиндр счетчика, попадает в пространство между электродами счетчика и вызывает ионизацию газа. Образовавшиеся в газе между электродами ионы будут притягиваться полем к электродам.

Так как поле неоднородно и сильно возрастает вблизи нити, то движущийся к нити электрон на длине своего свободного пробега приобретает кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации. Возникающий лавинный процесс имеет в результате попадание на нить значительного числа электронов, что и является причиной изменения

потенциала нити, фиксируемого счетным механизмом, как единичный разрядный импульс.

Появившийся благодаря этому импульс тока регистрируется специальной электрической схемой.

VI. *Принцип действия сцинтилляционного счетчика* основан на явлении люминесценции вещества (свечении) под влиянием ударов заряженных частиц или фотонов. Эти счетчики обладают большей чувствительностью, чем счетчик Гейгера — Мюллера.

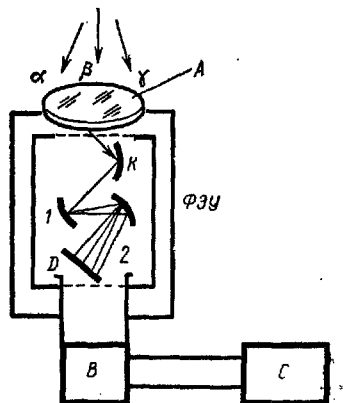


Рис. 240

Схема такого счетчика показана на рис. 240. На рисунке α -, β - или γ -лучи попадают на кристалл — фосфор А, в котором происходят сцинтилляции (вспышки света), свет от сцинтилляций попадает на фотокатод многокаскадного фотоумножителя ФЭУ. Из фотокатода К под действием света вылетают фотоэлектроны. Для усиления сигнала фотоэлектроны проходят ряд электродов — эмиттеров фотоумножителя (на рисунке — 1 и 2); потенциалы каждого следующего повышаются. Попадая на эмиттер 1, фотоэлектрон выбивает из него вторичные электроны, вторичные электроны попадают на следующий эмиттер 2 и т. д. На анод D приходит усиленный, таким образом, первичный импульс, который дает возможность через усилитель В передать его на счетное устройство С.

Таким образом, на появление в кристалле А частицы (α , β , γ) радиоактивного излучения ФЭУ отвечает кратко-

временным электрическим сигналом (импульсом), достаточно сильным для регистрации его при помощи усилительных ламповых схем *B* и счетного устройства *C*.

Работа № 79

Снятие счетной характеристики счетчика по космическому излучению

Приборы и принадлежности: радиометр типа Б-2, секундомер.

Теория метода и описания установки. Космическими лучами называются потоки элементарных частиц и атомных ядер (главным образом протонов), приходящих на Землю из космического пространства.

Первичное космическое излучение — излучение, наблюдаемое за границей атмосферы Земли. *Вторичное излучение* — излучение, которое возникает в результате взаимодействия частиц первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферных газов.

Вторичное излучение состоит из двух компонент: «мягкой», легкопоглощаемой, в которой имеются электроны, позитроны и фотоны, и «жесткой» (малопоглощаемой), которая состоит из μ -мезонов ($m_{\mu} \approx 200 m_e$) громадной энергии. Для измерения «мягкой» компоненты вторичных космических лучей (β - и γ -излучения) в данной работе используется радиометр. Блок-схема радиометра представляет собой (рис. 241) счетчик Гейгера — Мюллера 1, высоковольтный выпрямитель для питания счетчика 2, усилитель импульсов вместе с пересчетным блоком 3, электромеханический счетчик импульсов 4.

Принципиальная схема включения счетчика Гейгера — Мюллера показана на рис. 239.

Если менять напряжение на электродах 1 и 2 счетчика, то будет меняться его режим работы и, следовательно, свойства счетчика как регистрирующего прибора. На рис. 242 изображена зависимость скорости счета от разности потенциалов между электродами при неизменной интенсивности облучения.

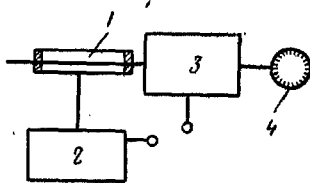


Рис. 241

Зависимость числа импульсов N , даваемых счетчиком в минуту, от приложенного к нему напряжения U при постоянном источнике радиоактивного излучения, т. е. $N = f(U)$, называется *счетной характеристикой счетчика*. Как видно из рисунка, при напряжениях ниже U_3 счетчик ничего не регистрирует (импульсы настолько малы, что не регистрируются счетной установкой).

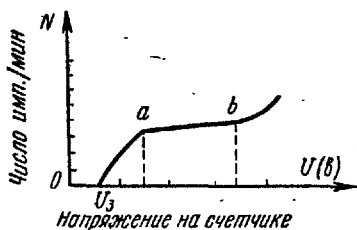


Рис. 242

Напряжение U_3 , при котором счетчик начинает считать, называется *потенциалом зажигания* *.

Выше точки U_3 (от U_3 до a) скорость счета быстро увеличивается с ростом напряжения: В этой области счетная установка регистрирует не все попадающие в счетчик частицы, так как разрядные импульсы имеют разную величину.

В области ab счет почти не меняется при возрастании напряжения. На участке ab , называемом «плато», счетчик фиксирует все частицы, попавшие в его объем.

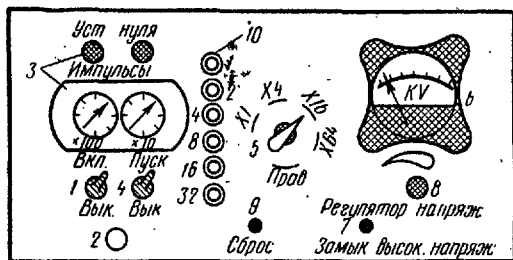


Рис. 243

При напряжениях выше точки b скорость счета быстро увеличивается в связи с ростом числа самопроизвольных разрядов. Чем больше плато и меньше его наклон, тем счетчик лучше.

Измерения и обработка результатов измерений. I. Ознакомьтесь с деталями управления радиометра Б-2 (рис. 243).

* Для каждого счетчика потенциал зажигания имеет свое значение; для данного счетчика он написан на приборе.

На лицевой панели счетной установки Б-2 расположены: 1 — тумблер включения сети, 2 — сигнальная лампочка, 3 — электромеханический счетчик с двумя ручками установки нуля, 4 — тумблер пуска пересчетного устройства, 5 — переключатель коэффициента пересчета, позволяющий фиксировать каждый 1-й (1 : 1), 4-й (1 : 4), 16-й (1 : 16) или 64-й (1 : 64) импульс, 6 — вольтметр, контролирующий выходное напряжение выпрямителя, 7 — кнопка замыкания высокого напряжения, 8 — ручка регулятора высокого напряжения.

II. Подготовить радиометр Б-2 к работе.

Для этого необходимо сделать следующее:

1. Проверить и привести в соответствие с напряжением сети переменного тока (≈ 127 в) положение переключателя напряжения (колодка расположена на задней панели).

2. Вывести ручку регулятора высокого напряжения в крайнее левое положение.

3. Тумблер включения в сеть поставить в положение «выключено».

4. Проверить подключение заземления на задней панели прибора.

III. Снятие счетной характеристики.

1. Включить тумблер «сеть». При этом должна загореться сигнальная лампочка. Прибору необходимо дать прогреться в течение 1—2 мин.

2. Регулятором высокого напряжения 8 установить напряжение, равное 0,5 кв.

3. Тумблер «пуск» выключить.

4. Нажать кнопку «сброс» 9.

5. Установить на нуль шкалы 3 электромеханического счетчика.

6. Установить ручкой 5 необходимый коэффициент пересчета (лучше 1 × 64).

7. Включить тумблер «пуск» одновременно с включением секундомера и определить число импульсов фона за 3—5 мин (радиоактивные препараты должны быть удалены). По полученным данным вычислить число импульсов фона в минуту — N_{ϕ} .

Число зарегистрированных импульсов равно показанию счетчика, умноженному на коэффициент пересчета, плюс сумма чисел, стоящих у горящих неоновых лампочек 10.

Каждый счетчик обладает фоном, т. е. при отсутствии облучения в нем все же возникают разрядные импульсы. Эти разрядные импульсы могут быть вызваны космическими лучами, радиоактивными примесями в материалах, из которых изготовлен счетчик, и самопроизвольными разрядами.

8. Аналогичные измерения произвести для значений $U=100, 150, 200$ в и т. д., каждый раз записывая N_{Φ} (значения U даются преподавателем).

9. По полученным данным строят график $N_{\Phi}=f(U)$, откладывая по оси абсцисс напряжение U , а по оси ординат — число импульсов в минуту N_{Φ} .

10. Из графика определяют рабочий участок (плато) счетчика.

Работа № 80

Определение активности изотопа относительным методом

Приборы и принадлежности: радиометр типа Б-3, радиоактивный препарат неизвестной активности, эталонный радиоактивный источник, секундомер, счетчик Гейгера.

Если имеется изотоп известной активности, то можно, используя его в качестве эталона, определить значение активности других образцов, приготовленных из того же изотопа.

В настоящей работе требуется определить активность изотопа стронция, используя в качестве эталона Sr^{90} , активность которого равна $0,055$ мккюри.

Изотоп Sr^{90} , распадаясь, дает β -излучение. β -излучение — это поток электронов $_{-1}\beta^0$ или позитронов $_{+1}\beta^0$, испускаемых ядрами.

Зная активность эталонного изотопа B_s и число импульсов, даваемых им в единицу времени N_s , а также число импульсов, даваемых в минуту исследуемым изотопом N_x , можно определить активность исследуемого изотопа по формуле (6). Применяя ее дважды, получим:

$$B_x = B_s \frac{N_x}{N_s}, \quad (7)$$

где B_x — активность исследуемого изотопа, B_s — активность эталонного изотопа, N_x — число импульсов в мину-

ту, даваемое исследуемым изотопом (с поправкой на фон), N_s — число импульсов в минуту, даваемое эталонным изотопом (с поправкой на фон).

Измерения и обработка результатов измерений. I. Знакомятся с устройством радиометра Б-3 (рис. 244).

Радиометр Б-3 состоит из пересчетного устройства ПС-20: А — блока газовых счетчиков БГС-3, счетчика

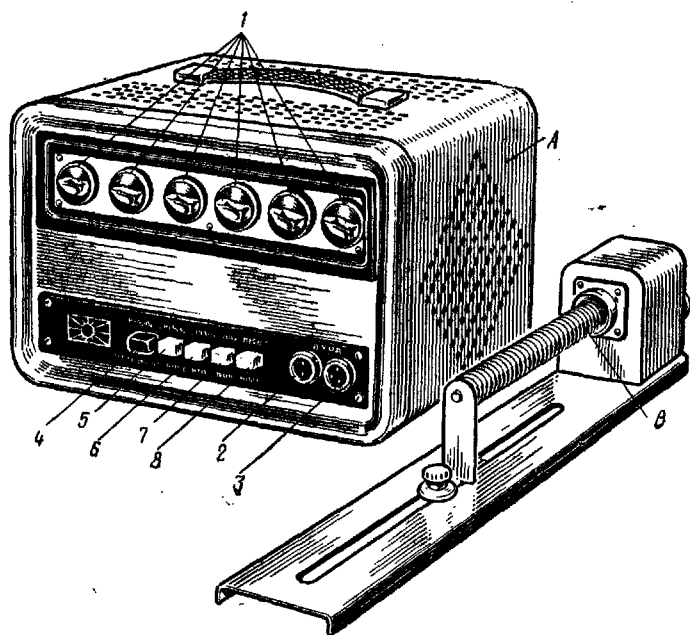


Рис 244

Гейгера — Мюллера — В. На лицевой панели пересчетного устройства расположены: шесть декабронов — 1, считающих импульсы в десятичной системе, тумблер — 2, переключающий полярность электрических импульсов, фишка «вход» — 3, кнопка выключения прибора — 4, кнопка для сброса показаний декабронов, т. е. возвращение их в нулевое положение — 5, кнопка для подсчета импульсов, поступающих в прибор ПС-20 с частотой 50 гц, — 6 включается с целью проверки правильности работы

прибора, кнопка — 7 для пуска пересчетного устройства, кнопка для остановки счета — 8.

II. Подготавливают радиометр Б-3 к работе.

Для этого делают следующее:

1. Проверяют и проводят в соответствие с напряжением сети переменного тока положение переключателя напряжения, расположенного на задней панели.

2. Проверяют подключение заземления на задней панели прибора.

3. Выключают все кнопки.

4. Устанавливают радиоактивный препарат Sr^{90} (эталон) в предназначенное для него место (вблизи счетчика).

5. Определяют три раза число импульсов N за минуту для радиоактивного препарата (эталона).

6. Удаляют радиоактивный препарат Sr^{90} (эталон) и трижды производят измерения числа импульсов фона * за минуту.

7. Исправляют полученные данные для радиоактивного изотопа (эталона) на фон (вычитают средний фон), т. е. получают $N_э = N - N_ф$.

8. Измерения пп. 1—8 производят с радиоактивными препаратами неизвестной активности, т. е. измеряют N_x . По окончании работы кнопку 8 выключить. Постепенно снять напряжение со счетчика. Отключить установку от сети.

9. По формуле (7), зная что $B_э = 0,055$ мкюри, рассчитать активность радиоактивного изотопа неизвестной активности.

10. Получив три значения активности B_{x1} , B_{x2} и B_{x3} , найти среднее значение активности B_x и рассчитать абсолютную и относительную ошибки измерений. Результаты измерений занести в таблицу.

$N_э$ п/п	$N_э$	N_x	B_x	\bar{B}_x	ΔB_x	$\Delta \bar{B}_x$	$\frac{\Delta \bar{B}_x}{\bar{B}_x} \cdot 100\%$

* Каждый счетчик обладает фоном, т. е. при отсутствии облучения в нем возникают импульсы от космических лучей и других причин.

Предупреждение

1. *Следует помнить*, что на выходе выпрямителя развивается высокое напряжение, поэтому нигде не должно быть концов высоковольтной цепи, доступных для прикосновения.

2. В процессе работы никаких переключений высоковольтного кабеля не делать.

3. Руками к счетчику не прикасаться.

Работа № 81

Определение линейного коэффициента поглощения γ -лучей

Приборы и принадлежности: радиометр типа Б-3, радиоактивный препарат (например, изотоп кобальта Co^{60}), свинцовые пластинки различной толщины, секундомер, счетчик Гейгера.

Теория метода. Прохождение γ -лучей через вещество сопровождается рассеянием и поглощением их атомами вещества.

Падение интенсивности I γ -излучения определяется следующим законом:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (8)$$

где I_0 — интенсивность γ -излучения в отсутствие поглощающего вещества ($x=0$), x — толщина поглощающего слоя, μ — линейный коэффициент ослабления; μ представляет собой величину, зависящую от четырех слагаемых:

$$\mu = \mu_{\text{я}} + \mu_{\text{ф}} + \mu_{\text{к}} + \mu_{\text{п}},$$

где $\mu_{\text{я}}$ — коэффициент поглощения γ -лучей при неупругих взаимодействиях γ -лучей с атомными ядрами, $\mu_{\text{ф}}$ — коэффициент фотопоглощения — энергия γ -лучей расходуется на фотоэффект (выбивание электронов), $\mu_{\text{к}}$ — коэффициент комптоновского рассеивания, $\mu_{\text{п}}$ — коэффициент образования пар* (электрон — позитрон или протон — антипротон; $\gamma \rightarrow +_1e^0 + -_1e^0$).

Интенсивность излучения I пропорциональна скорости счета импульсов N , поэтому из уравнения (8) можно по-

* Этот процесс вызывается столкновением γ -кванта с ядром или электроном оболочки. При этом энергия фотона $h\nu \geq 2 m_0 c^2 = 1,022 \text{ Мэв}$, где m_0 — энергия покоя $-_1e^0$ и $+_1e^0$.

лучить выражение для определения линейного коэффициента поглощения

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_0}{N}}{x} = 2,3 \frac{1}{x} \cdot \lg \frac{N_0}{N}. \quad (9)$$

Если выражение (9) представить графически, откладывая по оси абсцисс толщину слоя x , а по оси ординат величину $2,3 \lg \frac{N_0}{N}$, получим прямую линию. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен коэффициенту поглощения μ .

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Знакомятся с работой радиометра Б-3 (работа № 80) (раздел I, II).

2. Вычисляют фон N_0 счетчика (пп. 1—8 работы № 80).

3. Помещают источник γ -излучения и счетчик в свинцовый домик и определяют число импульсов в минуту N_0 без поглощающего вещества.

4. Между счетчиком и радиоактивным препаратом помещают пластинки свинца различной толщины x и определяют число импульсов в минуту N с поглощающими пластинами различной толщины.

5. Строят график зависимости значений $2,3 \cdot \lg \frac{N_0}{N}$ от толщины x поглощающего вещества.

Из графика определяют значение коэффициента ослабления μ .

6. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ п/п	N_0	N	x	$\frac{N_0}{N}$	$2,3 \cdot \lg \frac{N_0}{N}$	μ
1						
2						
3						
4						

Приборы и принадлежности: радиометр типа Б-3, радиоактивный препарат, набор свинцовых и медных пластинок, алюминиевая пластинка толщиной 2 мм, секундомер, свинцовый домик.

Теория метода. Проходя через вещество, в результате взаимодействия с его атомами, β -частицы замедляются; β -излучение полностью поглощается слоем вещества определенной толщины.

γ -излучение, проходя через вещество, образует в нем вторичные электроны; γ -лучи поглощаются свинцовыми пластинками.

Поглощение β - и γ -лучей веществом можно рассчитать по формуле

$$N = N_0 e^{-kx}, \quad (10)$$

где N_0 — число частиц (импульсов), зарегистрированных прибором без преграды, за время t , N — число частиц, прошедших через слой вещества толщиной x и зарегистрированных прибором за то же время, k — коэффициент поглощения.

Если взять прохождение γ - или β -лучей через две пластинки толщиной x_1 и x_2 , то из уравнения (10) можно получить значение коэффициента поглощения

$$k = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{x_2 - x_1}. \quad (11)$$

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Знакомятся с работой радиометра по работе № 80 (пп. I и II).

2. Вводят в работу установку Б-3 так же, как это описано в работе № 80 (раздел II, пп. 1—3; напряжение на счетчике не должно превышать 0,8 кВ) и вычисляют фон N_Φ (п. 6 раздела II).

3. Помещают в свинцовый домик γ -активный препарат и счетчик и определяют число импульсов N_1 , прошедших за 1 мин через свинцовую пластинку толщиной x_1 , поставленную между препаратом и счетчиком.

4. Помещают вторую свинцовую пластинку толщиной x_2 и определяют число импульсов N_2 .

5. По формуле (11) определяют коэффициент поглощения k свинцом γ -лучей.

6. Помещают в свинцовый домик радиоактивный препарат, излучающий α -, β - и γ -лучи. Счетчик α -лучи не регистрирует.

β -лучи полностью поглощаются алюминиевой пластинкой толщиной 2 мм.

Помещают на пути лучей алюминиевую пластинку ($x=2$ мм) и определяют число импульсов N_1 γ -лучей.

7. Снимают алюминиевую пластинку и определяют суммарное число импульсов для β - и γ -лучей — N_2 . Разность отсчетов $N_2 - N_1 = \Delta N$ даст число импульсов для β -лучей.

8. На пути лучей помещают по очереди две медные пластинки толщиной x_1 и x_2 и определяют число импульсов N_1' и N_2' .

9. Вычисляют число импульсов для β -лучей — ΔN_1 , прошедших через медную пластинку толщиной x_1 ,

$$\Delta N_1 = N_1' - N_1.$$

Число импульсов для β -лучей, прошедших медную пластинку толщиной x_2 , соответственно равно:

$$\Delta N_2 = N_2' - N_1.$$

10. Подставляя в формулу (11) значения ΔN_1 и ΔN_2 , находят коэффициент поглощения медью β -лучей

$$k = \frac{\ln \Delta N_2 - \ln \Delta N_1}{x_2 - x_1}.$$

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу

№ п/п	N_{Φ}	x_1	N_1	x_2	N_2	k -свинца	N_1'	N_2'	ΔN	x_1	ΔN_1	x_2	ΔN_2	k меди
1														
2														
3														
Среднее значение														

Работа № 83**Определение содержания
калия в солях
радиометрическим методом**

Приборы и принадлежности: радиометр типа Б-3, соли, содержащие калий, секундомер.

Соли, содержащие калий, радиоактивны. В зависимости от количества, имеющегося в соли калия, величина радиации меняется. Это свойство можно использовать для определения процентного содержания калия в солях.

Измерения и обработка результатов измерений. 1. Знакомятся с устройством установки Б-3 (работа № 80) и счетчика.

2. Включают установку Б-3 (раздел I, II, пп. 1, 2, 3, 6 работы № 80) и определяют фон.

3. Берут три соли с известным содержанием в них калия a_1, a_2, a_3 (дает преподаватель или лаборант) и измеряют для каждой соли число импульсов N_1, N_2, N_3 .

4. Строят график, откладывая по оси абсцисс процентное содержание калия для трех солей, а по оси ординат соответствующее число импульсов (с поправкой на фон).

5. Берут соль a_x с неизвестным содержанием калия и определяют число импульсов N_x .

6. По графику находят содержание калия в соли a_x .

Работа № 84**Регистрация γ -излучения
сцинтилляционным
счетчиком**

Приборы и принадлежности: прибор типа Б-2, сцинтилляционный счетчик, набор кристаллических фосфоров, потенциометр, выпрямитель на ВЭС-2500 в, электронный осциллограф ЭО-7, источник γ -излучения.

Теория метода и описание установки. Сцинтилляционный счетчик регистрирует все виды частиц — α , β , γ . Преимущество данного счетчика 100% регистрация γ -квант, тогда как счетчик Гейгера — Мюллера дает регистрацию γ -лучей порядка 1%. В качестве фосфора A (рис. 240) берутся кристаллы антрацена, нафталина, иодистого натрия и др. Фосфор A помещают вплотную к окну ФЭУ, к которому присоединены усилительные и регистрирующие схемы B

и С. Следует заметить, что помимо полезных сигналов, вызванных исследуемым радиоактивным излучением, в счетчике возникают сигналы постороннего происхождения — шумовые. Эти сигналы вызываются в основном фоном фотоумножителя. Шумовые сигналы необходимо исключить при счете γ -квантов.

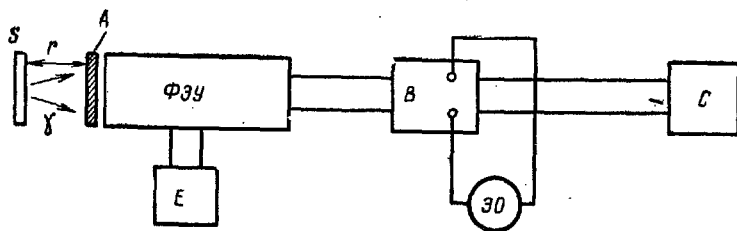


Рис. 245

Измерения и обработка результатов измерения. 1. Собирают установку по схеме (рис. 245). На рис. 245: *S* — источник γ -лучей, *A* — фосфор, *ФЭУ* — фотоэлектронный умножитель, питаемый через высоковольтный выпрямитель *E*, *B* — усилитель, *ЭО* — электронный осциллограф, на экране которого наблюдаются получаемые импульсы, и *C* — счетное устройство.

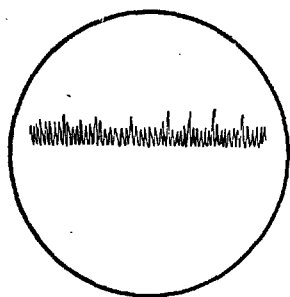


Рис. 246

2. Источник *S* γ -лучей убирают и отсоединяют счетное устройство.

3. Включают осциллограф и устанавливают частоту развертки, равную 50 гц.

4. Включают высоковольтный выпрямитель и, *медленно вращая ручку потенциометра (2 мин)*, подают на *ФЭУ* напряжение 1200 в.

5. На экране осциллографа будет видна картина (рис. 246). Пики

на экране соответствуют импульсам, вызванным фоном фотоумножителя. Увеличивают напряжение на *ФЭУ* до 1400 в и убеждаются в том, что амплитуда импульсов шума и частота их появления будет увеличиваться в зависимости от напряжения на *ФЭУ*, т. е. картина на рис. 246 действительно картина фона.

6. Вновь устанавливают на ФЭУ напряжение и подносят к фосфору A источник γ -лучей (препарат Co^{60} активностью 1 мкюри).

Наблюдают на экране осциллографа картину (рис. 247) фона a и добавочных импульсов b , вызванных облучением кристалла A γ -лучами. Амплитуда импульсов b превосходит амплитуду шумовых сигналов a в несколько раз.

7. Снимают графики зависимости скорости счета n от расстояния r (см. рис. 245), откладывая по оси x расстояния r от 0 (S ставят вплотную к A), до $r=50$ см. По оси y откладывают скорость счета импульсов на счетчике $n = \frac{N}{t}$,

где N — общее число импульсов за время измерения t . Число импульсов снимают для $t_1=1$ мин и $t_2=5$ мин следующим образом:

а) удаляют препарат S от кристалла A ;

б) подключают усилитель B и счетное устройство C ;

в) напряжение на ФЭУ поддерживают 1200 в;

г) после того как установится на экране осциллографа картина фона, подносят препарат S к кристаллу A и через каждые 10 сек снимают на пересчетном устройстве число импульсов N . Общее число импульсов

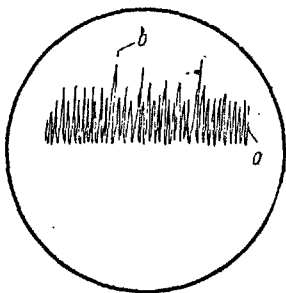


Рис. 247

$$N = AK + m,$$

где A — показания механического счетчика, K — кратность пересчета, m — добавка по неоновым лампам.

Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

№ п/п	r	t	A	K	m	N	$n = \frac{N}{t}$
1	0						
2	10						
3	20						
4	30						
5	40						
6	50						

Работа № 85

**Измерение дозы
рентгеновского
и γ -излучений
индивидуальными
дозиметрами**

Приборы и принадлежности: комплект индивидуального дозиметрического контроля типа КИД-1, индивидуальные дозиметры ДК-02, зарядное устройство ЗД-5.

Теория метода и описание установки. При работе с радиоактивными изотопами и рентгеновскими лучами необходимо считаться с биологическим действием излучений. γ -излучение, так же как и рентгеновское излучение, обладает большой проникающей способностью и наиболее опасное. От рентгеновских лучей γ -излучение отличается только своим происхождением (рентгеновские лучи возникают при возбуждении или удалении орбитальных электронов внутренних оболочек атома или при торможении быстрых электронов катодом).

Воздействие излучения на организм в первую очередь зависит от энергии δE , поглощаемой единицей объема δV живой ткани за время облучения. Величина δE пропорциональна плотности поглотителя и зависит также от его атомного номера Z .

Существенно, что среднее значение атомного номера основных тканей человеческого тела близко к среднему Z для воздуха. Поэтому поглощение в ткани будет во столько раз больше поглощения в воздухе, во сколько раз плотность ткани ρ_m больше плотности воздуха ρ_v . Отношение

$$\frac{\rho_m}{\rho_v} \approx 770.$$

Следовательно, зная поглощение энергии радиоактивного излучения в воздухе δE_v , можно оценить поглощение в тканях организма. Целесообразно выражать δE_v в величине заряда, создаваемого ионизирующим излучением, так как количество энергии, затраченной на образование одной пары ионов в воздухе (приблизительно равное 33 эв), почти не зависит от энергии и природы ионизирующего излучения.

Ионизирующее действие рентгеновского и γ -излучения на вещество определяется *дозой излучения*. За единицу дозы излучения принимают рентген: *Рентген* — такая доза излучения, при которой в $1,293 \cdot 10^{-6}$ кг воздуха образуются ионы с суммарным зарядом в $1/3 \cdot 10^{-9}$ к каждого знака.

Таким образом,

$$1\rho = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ к/кг.}$$

Это соответствует тому, что в 10^{-6} м³ воздуха при нормальных условиях образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар одновалентных ионов и связано с поглощением около $84 \cdot 10^{-4}$ дж энергии 1 кг воздуха.

Для оценки действия рентгеновского и γ -излучения на живую ткань вводят единицы излучения: *бэр* — биологический эквивалент рентгена и *фэр* — физический эквивалент рентгена (см. единицы электромагнитного излучения).

Различные излучения по-разному действуют на организм. Поэтому универсальных связей между бэром и фэром нет.

Для человека смертельной дозой считается доза в 600 р.

Для *количественной оценки действия*, производимого любыми ионизирующими излучениями (всеми видами излучений) в любом облученном веществе, вводится понятие *поглощенной дозы*. Поглощенная доза измеряется в радах. Поглощенная доза D — энергия ионизирующего излучения δE , поглощенного в единице массы облучаемого вещества δm :

$$D = \frac{\delta E}{\delta m}; \quad (1)$$

1 рад соответствует поглощению 0,01 дж энергии излучения в 1 кг облученного вещества. Кроме поглощенной дозы вводится еще понятие мощности поглощенной дозы. *Мощностью N дозы поглощения* называется доза D , отнесенная к единице времени накопления дозы или энергия излучения δE , поглощенная в единице объема вещества δV в единицу времени t :

$$N = \frac{D}{t} = \frac{\delta E}{\delta V \cdot t}. \quad (2)$$

Доза облучения — мера излучения, основанная на способности рентгеновского или γ -излучения ионизировать единицу массы воздуха.

Мощностью дозы облучения называется отношение дозы облучения ко времени.

Измерения доз чаще всего производятся при помощи приборов с ионизационными камерами, помещенными в том месте, где требуется определить величину дозы.

Шкалы таких приборов проградуированы в рентгенах, а сами приборы носят название рентгенометров, или дозиметров.

Стенки камер дозиметров для γ -лучей изготавливаются из вещества, близкого по атомному номеру к воздуху. Толщина стенок выбирается больше длины пробега вторичных электронов. С такими дозиметрами нельзя произ-

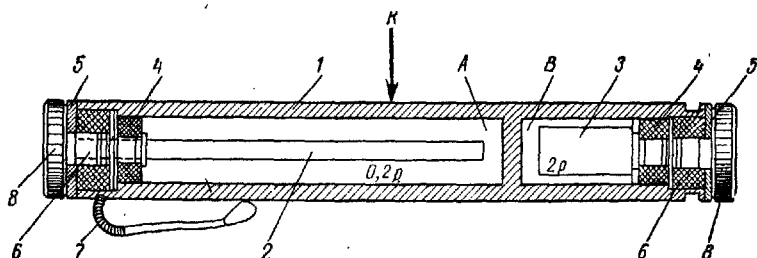


Рис. 248

водить измерения доз, создаваемых β -излучением, так как β -лучи сильно поглощаются стенками камеры.

В данной работе для измерения дозы излучений используется прибор КИД-1 и индивидуальные дозиметры ДК-02.

1. В основу работы прибора КИД-1 (рис. 248) положено измерение заряда по конденсаторной камере. Конденсаторная камера К состоит из двух камер А и В, заключенных в корпус 1 из токопроводящей пластмассы. Центральный электрод 2 камеры А (на 0,2 p) сделан из алюминия, а центральный электрод 3 камеры В (на 2,0 p) — из токопроводящей пластмассы. Центральные электроды укреплены в изоляторах 4. Корпус камер и центральные электроды являются цилиндрическими конденсаторами, емкости которых и воздушный объем камер обеспечивают измерения доз от 0,02 до 0,2 p и от 0,2 до 2 p. Электроды 2 и 3 укреплены в камерах винтом 8 и гайкой 6, изолированных прокладкой 5; 7 — держатель камеры К. Если камеру К под-

ключить к гнезду зарядного устройства прибора КИД-1, то камера зарядится до определенного потенциала. При помещении заряженной камеры K в зону облучения потенциал камеры уменьшается за счет токов ионизации. Измеряя потенциал камеры до облучения и после облучения, можно определить дозу, полученную камерой, а следовательно, и человеком, носившим камеру. Каждая двойная камера имеет вид автоматической ручки и прикрепляется держателем 7 к карману.

Измерение потенциала камеры проводится ламповым вольтметром, который находится в приборе КИД-1.

Конструктивно индивидуальный дозиметр типа КИД-1 собран в алюминиевом кожухе с наклонной передней панелью.

На передней панели находятся:

- 1) электроизмерительный прибор, шкала которого отградуирована в рентгенах;
- 2) регулятор установки шкалы;
- 3) тумблер «заряд — измерение»;
- 4) шлиц регулировки зарядного напряжения, выведенный с правой боковой стороны;
- 5) регулятор установки нуля;
- 6) зарядное и измерительное гнезда с прикрывающими их колпачками;
- 7) сетевая колодка, расположенная на левой боковой стороне, и тумблер включения сети;
- 8) две сигнальные лампочки, указывающие измеряемый поддиапазон.

Элементы управления и индикации снабжены соответствующими надписями.

Комплект из 20 штук «двойных» конденсаторных камер помещается в отдельном футляре.

II. В отличие от двойных конденсаторных камер, входящих в комплект КИД-1, *индивидуальные карманные дозиметры ДК-02* имеют одну камеру, рассчитанную на диапазон измерений от 0 до 200 м, и снабжены миниатюрным струнным электрометром. Струнный электрометр предназначен для измерения потенциала на электродах камеры. Конструкция его схематически изображена на рис. 249. Тонкая проводящая нить K диаметром в несколько микрон помещается в натянутом состоянии между электродами A , называемыми ножами. Нижний конец нити закреплен при помощи кварцевой дужки. Батареи подают на ножи рав-

ные по величине, но противоположные по знаку потенциалы относительно Земли $\pm U$. Если сообщить нити электрический заряд, то под действием электрического поля нить выйдет из положения равновесия и будет отклоняться до тех пор, пока сила электростатического взаимодействия не будет уравновешена упругой силой натяжения нити. Таким образом, величина отклонения нити будет определяться величиной заряда, а направление отклонения — его знаком. Для удобства отсчета электрометр снабжается микроскопом с окулярной шкалой B .

Для зарядки дозиметров ДК-02 применяются различные устройства. Последнее время стали применяться зарядные устройства, вырабатывающие статические заряды механическим способом — трением. Такие устройства просты, надежны и долговечны.

В данной работе применяется зарядное устройство ЗД-5, преобразующее напряжение двух сухих элементов, имеющих э. д. с. по 1,6 в, в постоянное напряжение, равное 250 в.

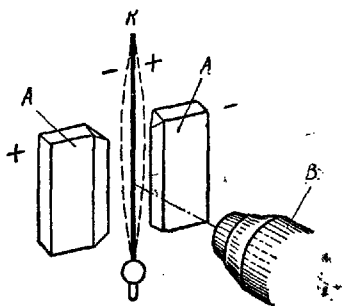


Рис. 249

Измерение прибором КИД-1. 1. Зарядка дозиметра с двойной камерой. Для того чтобы зарядить «двойную» камеру, делают следующее:

1. Включают прибор КИД-1 в сеть. При этом загорится лампочка, указывающая поддиапазон 2р.

2. Ставят тумблер «Заряд — измерение» в положение «Измерение».

3. Прогревают прибор в течение 10 мин.

4. Регулятором «Установка шкалы» устанавливают стрелку измерительного прибора на левую крайнюю риску шкалы.

5. Ставят тумблер в положение «Заряд». Стрелка должна отклониться на всю шкалу и остановиться на нуле в пределах черного поля.

6. Снимают колпачок, прикрывающий гнездо «Заряд». Тумблер «Заряд — измерение» ставят в положение «Заряд» и устанавливают стрелку измерительного прибора на нуль регулятором «Зарядн. напр.».

7. Открывают крышку футляра с камерами и отвинчивают винты камер 1 и 2 (см. рис. 248). Заряжают камеры, вставляя по очереди в гнездо «Заряд».

8. Гнездо «Заряд» прикрывают колпачком.

II. Измерение дозы прибором КИД-1. 1. Снимают колпачок, прикрывающий гнездо «Измерение». Тумблер «Заряд — измерение» включают в положение «Измерение».

Регулятором «Установки шкалы» устанавливают стрелку измерительного прибора на крайнюю левую риску.

2. Отвинчивают винты камер 3 и 4 и измеряют полученную дозу, вставляя камеры в гнездо «Измерение». Дозу отсчитывают непосредственно по шкале с учетом светового указателя «Диапазон». После измерения выключают прибор и закрывают колпачком гнездо «Измерение». Результаты измерения записывают.

Измерение дозы дозиметром ДК-02. 1. Подсоединяют выводы элементов 1,6-ПМЦ-4-8 согласно маркировке, указанной на колодке зарядного устройства ЗД-5.

2. Отвинчивают защитный колпачок.

3. Ручку потенциометра поворачивают влево до отказа.

4. Заряжают дозиметр ДК-02 по собственному электрометру. Для чего вставляют дозиметр ДК-02, имеющий № 21, и, поворачивая ручку потенциометра вправо, заряжают его так, чтобы нить электрометра устанавливалась на нуль.

5. То же проделывают с дозиметром № 22.

6. Определяют дозы, полученные дозиметрами № 23 и № 24. Результаты записывают.

ТАБЛИЦА ДЛЯ СПРАВОК

Моменты инерции относительно осей,
проходящих через центр тяжести

Тело	Ось	Момент инерции
Тонкое кольцо или полый тонкостенный цилиндр	ось цилиндра	mr^2
Диск или цилиндр	ось цилиндра	$\frac{1}{2} mr^2$
Шар	любой диаметр	$\frac{2}{5} mr^2$
Тонкий стержень	перпендикулярная к стержню	$\frac{1}{12} ml^2$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Введение в практикум

Измерение физических величин и классификация погрешностей	5
Определение погрешностей при прямых измерениях	6
Определение погрешностей при косвенных измерениях	9
Графическая обработка результатов измерений	12
Выполнение работы и оформление отчета	13
Система единиц	14
Некоторые единицы электромагнитного излучения	15
Фотометрические единицы	21
Некоторые единицы радиоактивного и рентгеновского излучения	23

Часть I

Физические основы механики. Механические колебания. Акустика

Работа № 1. Измерение линейных и угловых величин	27
Работа № 2. Точное взвешивание	39
Поступательное и вращательное движение твердого тела	45
Работа № 3. Определение ускорения силы тяжести при свободном падении тела	51
Работа № 4. Изучение движения тел по наклонной плоскости	53
Работа № 5. Изучение законов вращательного движения	55
Работа № 6. Определение момента инерции махового колеса и силы трения в опоре	59
Законы сохранения. Столкновения твердых тел.	61
Работа № 7. Измерение потенциальной и кинетической энергии падающего шарика	65
Работа № 8. Проверка закона сохранения момента количества движения (момента импульса)	68
Работа № 9. Изучение законов столкновения упругих шаров	72

Силы упругости	75
Работа № 10. Определение модуля упругости методом изги- ба	78
Механические колебания	80
Работа № 11. Определение ускорения силы тяжести при помощи маятника	88
Работа № 12. Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний	91
Работа № 13. Изучение собственных колебаний пружинного маятника	93
Работа № 14. Снятие резонансной кривой колебаний пру- жинного маятника	97
Работа № 15. Определение логарифмического декремента затухания кристаллического тела — кварце- вого резонатора	100
Акустика	102
Работа № 16. Определение скорости звука и логарифмиче- ского декремента затухания методом резонанса	104
Работа № 17. Определение скорости звука в воздухе мето- дом сложения взаимно перпендикулярных колебаний	109

Часть II

Молекулярная физика и термодинамика

Состояние идеального газа. Кинетическая теория газа	116
Работа № 18. Определение универсальной газовой постоян- ной методом откачки	120
Работа № 19. Определение числа Авогадро методом наблю- дения распределения частиц в поле силы тя- жести	122
Работа № 20. Определение средней длины свободного про- бега и эффективного диаметра молекул воз- духа	125
Явления переноса (в газах, жидкостях и твердых телах)	127
Работа № 21. Определение коэффициента теплопроводности металлов калориметрическим методом	131
Работа № 22. Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом температурного гра- диента	133
Работа № 23. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом падающего шарика (метод Стокса)	136
Физические основы термодинамики	139
Работа № 24. Определение отношения удельных тепло- емкостей газа методом адиабатического рас- ширения	145
Работа № 25. Определение приращения энтропии при плав- лении олова	148
Жидкости и твердые тела	149
I. Поверхностное натяжение жидкостей	149
Работа № 26. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца	153

Работа № 27.	Определение коэффициента поверхностного натяжения методом поднятия жидкости в капиллярах	155
Работа № 28.	Определение зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры и от поверхностно-активных веществ торзными весами	158
II.	Тепловое расширение и теплоемкость твердых тел	160
Работа № 29.	Определение среднего коэффициента линейного расширения металлов микроскопом	164
Работа № 30.	Определение среднего коэффициента линейного расширения металлов методом Д. И. Менделеева	167
Работа № 31.	Определение теплоемкости металлов методом охлаждения	168
Работа № 32.	Изучение зависимости изменения собственной частоты колебаний кристаллического тела от температуры	172

Часть III

Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны

Работа № 33.	Знакомство с электроизмерительными приборами	179
Электростатика		193
Работа № 34.	Исследование электростатического поля	196
Работа № 35.	Снятие кривой зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности электрического поля	199
Работа № 36.	Снятие кривой зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры	202
Постоянный электрический ток		203
Работа № 37.	Определение электродвижущей силы гальванических элементов методом компенсации	206
Измерение сопротивлений металлов и емкостей проводников методом мостиковой схемы		209
Работа № 38.	Измерение сопротивлений металлов	211
Работа № 39.	Изучение зависимости сопротивлений металлов от температуры	213
Работа № 40.	Измерение емкости конденсаторов	214
Измерение сопротивлений и емкостей баллистическим гальванометром		219
Работа № 41.	Измерение сопротивлений	223
Работа № 42.	Измерение емкостей	225
Термоэлектронная эмиссия и контактные явления		229
Работа № 43.	Изучение работы электронной лампы	231
Работа № 44.	Градуирование термоэлемента	233
Работа № 45.	Определение термоэлектродвижущей силы термоэлемента	236
Полупроводники		238
Работа № 46.	Изучение зависимости сопротивления полупроводника и термистора от температуры и	

	определение энергии активации полупроводника, необходимой для возникновения собственной проводимости	246
Работа № 47.	Снятие вольт-амперной характеристики селенового и германиевого выпрямителей	249
Работа № 48.	Определение к. п. д. твердого выпрямителя и исследование кривых подводимого и выпрямленного напряжений осциллографом.	252
Электромагнетизм	256
Работа № 49.	Знакомство с работой электронного осциллографа	259
Работа № 50.	Определение удельного заряда электрона при помощи электронно-лучевой трубки	273
Работа № 51.	Измерение постоянной Холла и концентрации носителей тока в германии	277
Работа № 52.	Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли	284
Магнитное поле в веществе		287
Работа № 53.	Снятие петли гистерезиса	291
Электромагнитные колебания и волны		294
Работа № 54.	Определение диэлектрической постоянной жидкости методом двухпроводной линии	294

Часть IV

Оптика

Элементы геометрической оптики		304
Работа № 55.	Определение главного фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз	308
Работа № 56.	Наблюдение сферической и хроматической аберраций линз	311
Работа № 57.	Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа	313
Работа № 58.	Определение показателя преломления и концентрации раствора сахара при помощи рефрактометра	317
Интерференция света		323
Работа № 59.	Определение длины волны монохроматического света с помощью интерференции от двух щелей	327
Работа № 60.	Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона	329
Работа № 61.	Определение качества обрабатываемой поверхности интерферометром Линника	333
Дифракция света		337
Работа № 62.	Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки	342
Работа № 63.	Определение длины волны и частоты ультразвука оптическим методом	344
Поляризация света		348
Работа № 64.	Изучение поляризации света при отражении от диэлектрика. Проверка закона Малюса	353
Работа № 65.	Определение концентрации раствора сахара поляриметром	355

Работа № 66. Изучение внутренних напряжений в твердых телах оптическим методом	359
Поглощение и отражение света	361
Работа № 67. Измерение коэффициентов поглощения света прозрачных тел	361
Работа № 68. Измерение коэффициентов отражения света	37.
Тепловое излучение	37
Работа № 69. Определение постоянной в законе Стефана — Больцмана при помощи оптического пирометра	37
Работа № 70. Качественная проверка законов излучения Кирхгофа и закона смещения Вина	38
Фотоэлектрический эффект	38
Работа № 71. Снятие вольт-амперной характеристики газонаполненного фотоэлемента	38
Работа № 72. Снятие удельной интегральной чувствительности и вольт-амперной характеристики фотоэлемента с внутренним фотоэффектом — фотосопротивления	39
Работа № 73. Определение интегральной чувствительности фотоэлемента с запирающим слоем — вентильного	39
Работа № 74. Исследование работы кремниевого фотоэлемента — солнечной батареи	39

Часть V

Физика атома и атомного ядра

Физика атома (теория Бора)	41
Работа № 75. Определение потенциалов возбуждения (опыт Франка и Герца)	41
Работа № 76. Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга	41
Исследование линейчатых спектров испускания	42
Работа № 77. Градуирование спектроскопа	42
Работа № 78. Градуирование стилоскопа	43
Радиоактивное излучение	43
Работа № 79. Снятие счетной характеристики счетчика по космическому излучению	43
Работа № 80. Определение активности изотопа относительным методом	45
Работа № 81. Определение линейного коэффициента поглощения γ -лучей	45
Работа № 82. Определение коэффициента поглощения γ - и β -лучей	45
Работа № 83. Определение содержания калия в солях радиометрическим методом	45
Работа № 84. Регистрация γ -излучения спинтילляционным счетчиком	45
Дозиметрия радиоактивных излучений	
Работа № 85. Измерение дозы рентгеновского и γ -излучений индивидуальными дозиметрами	48
Таблица для справок	49