

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

Д.В. Чесноков  
В.В. Чесноков

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Сборник лабораторных работ

Новосибирск  
СГГА  
2007

УДК 53  
Ч-51

Рецензент  
Кандидат технических наук, доцент  
Новосибирского государственного технического университета  
*В.А. Илюшин*

**Чесноков, Д.В.**

Ч-51 Физические основы получения информации [Текст] : сб. лаборат. работ / Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 86 с.

Сборник лабораторных работ предназначен для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения в помощь при изучении курса «Физические основы получения информации». В сборнике содержатся описания 14 лабораторных работ и методов их выполнения, а также краткая теория вопросов курса, относящихся к лабораторным работам.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

УДК 53

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная  
геодезическая академия», 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Лабораторная работа № 1 Случайные погрешности при измерениях.....	5
Лабораторная работа № 2 Пьезоэлектрический эффект .....	11
Лабораторная работа № 3 Методы измерения параметров магнитного поля .....	15
Лабораторная работа № 4 Исследование спектров поглощения растворов химических веществ .....	24
Лабораторная работа № 5 Исследование металлических и полупроводниковых терморезисторов .....	29
Лабораторная работа № 6 Экспериментальное определение чувствительности тензорезисторов.....	35
Лабораторная работа № 7 Измерение рассеянных низкочастотных магнитных полей .....	39
Лабораторная работа № 8 Вихретоковые индуктивные преобразователи ..	46
Лабораторная работа № 9 Изучение эффекта Доплера для электромагнитных волн .....	50
Лабораторная работа № 10 Оптическая пирометрия .....	56
Лабораторная работа № 11 Изучение принципов работы термоанемометра .....	63
Лабораторная работа № 12 Изучение термокондуктометрических газоанализаторов .....	67
Лабораторная работа № 13 Изучение методов измерения влажности воздуха.....	74
Лабораторная работа № 14 Звуковая эхо-локация .....	79

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящем сборнике дано описание учебных лабораторных работ, разработанных в помощь при изучении дисциплины «Физические основы получения информации» студентам вузов, обучающихся по направлению 653700 – «Приборостроение».

Дисциплина предназначена для формирования у студентов понимания физических основ получения информации, возможностей применения физических эффектов в технике измерений и принципов технической реализации преобразователей информации для измерения физических величин различной природы.

Перечень лабораторных работ включает 14 наименований и рассчитан на обучение студентов в течение двух семестров. Цикл работ предусматривает на первом этапе изучение причин возникновения погрешностей при измерениях и изучение путей уменьшения их влияния путем правильного планирования измерительного эксперимента, а также изучение физических эффектов, используемых при измерениях: терморезисторного; тензорезисторного; пьезоэлектрического; магнитоиндукционного; эффекта Доплера; оптических эффектов, применяемых при пирометрии; рассеяния света частицами; фотонного шума.

На втором этапе изучаются методы измерения различных физических величин: измерение рассеянных низкочастотных магнитных полей, вихретоковое измерение толщин металлических фольг, измерение скорости газового потока, концентрации газов, оптической плотности поглощающих сред, влажности воздуха.

Тексты описаний лабораторных работ содержат теоретическое введение, описание порядка проведения измерительного эксперимента, рекомендации по вычислительной обработке результатов, предусматривают перечень вопросов для контроля знаний студентов, выполняющих работы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

### 1. Цель работы

Изучить влияние случайных ошибок на точность измерения физических величин; определить погрешности измерения физической величины, вносимые наблюдателем.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Физический маятник.
2. Секундомер.
3. Регулируемый источник напряжения.
4. Цифровой мультиметр.

### 3. Подготовка к работе

Перед началом работы изучить основы теории ошибок по лекциям и настоящему сборнику, ответить на следующие вопросы.

1. Типы погрешностей, их причины.
2. Как при многократных измерениях физической величины выглядит зависимость частоты появления наблюдаемых значений величины от измеряемого значения?
3. Что такое среднее арифметическое значение, что оно означает?
4. Как определить вероятность попадания измеряемого значения в некоторый интервал значений?
5. Что означает функция плотности вероятностей при измерениях?
6. Как по виду кривой распределения вероятностей определить ту серию измерений, которая точнее?
7. Как вычислить среднеквадратичное отклонение и что оно характеризует?
8. Как выглядит график нормального распределения вероятностей, в каких координатах его строят?
9. Свойства нормального распределения вероятностей.
10. Статистическая достоверность и ее нахождение по графику нормального распределения вероятностей.

### 4. Основы анализа ошибок при измерениях

**Измерение** – экспериментальное определение количественного значения физической величины с помощью технических средств. Измерение включает в себя **наблюдения** и **математическую обработку** полученных данных для определения **результата измерения**.

Погрешность результата наблюдения или измерения есть отклонение результата измерения  $x$  физической величины от ее истинного значения  $x_2$ . Погрешность  $d = x - x_2$  можно измерять в единицах измеряемой величины – получим **абсолютную** погрешность, или в долях от значения измеряемой величины – получим **относительную** погрешность.

Кроме этого различают погрешности (ошибки):

- **систематические**, которые возникают вследствие особенностей измерительного устройства и при повторных измерениях повторяются;

- *случайные*, которые могут меняться произвольным, случайным образом при повторных измерениях одной и той же физической величины. Случайные погрешности возникают, например, при считывании наблюдателем показаний по шкале измерительного прибора; из-за влияния окружающей среды (например, из-за изменения температуры); из-за возникновения случайных сигналов, генерируемых самим измерительным прибором, например, шумов;

- *промахи*. Такие погрешности возникают в результате небрежности при измерениях и должны исключаться из результатов наблюдения.

Подробнее рассмотрим случайные ошибки.

Если многократно измерять одну и ту же физическую величину, то полученные значения можно построить в виде графика их частотного распределения, т. е. в виде зависимости частоты появления некоторого значения измеряемой величины от самого измеренного значения величины.

Указанная зависимость может выглядеть в виде функции, изображенной на рис. 1.1.



Рис. 1.1 Частотное распределение

График зависимости обычно строят в виде гистограммы (рис. 1.2), где  $n_m$  – количество значений величины  $x$ , попавших в интервал  $\Delta x$  значений этой величины;  $N$  – общее число измерений;  $m$  – номер интервала.

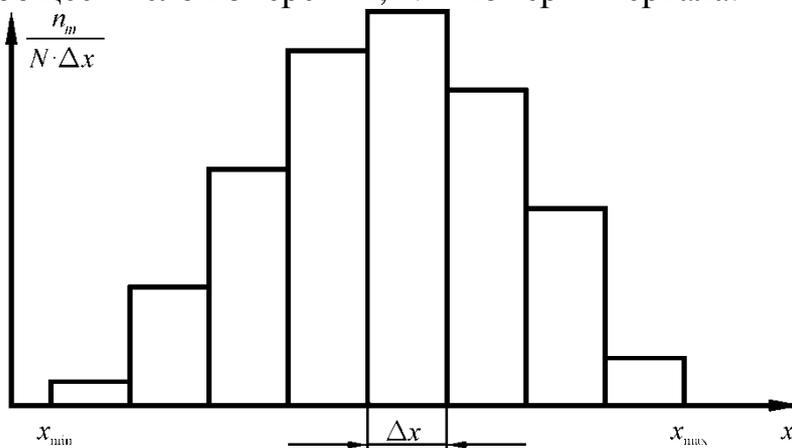


Рис. 1.2. Гистограмма для серии измерений

Ширина графика частотного распределения говорит о неточности выполненных измерений.

При обработке результатов важными являются следующие понятия.

1. **Среднее арифметическое значение**  $\bar{x}$  измеренных величин. Это сумма всех результатов измерения, деленная на количество измерений  $N$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (1.1)$$

Здесь  $i$  – номер измерения.

Среднее арифметическое является наилучшим приближением истинной величины  $x_2$ .

2. **Вероятность попадания** измеряемого значения в интервал ( $m$ ) при одном измерении и **распределение вероятностей** получения данного результата в серии измерений.

Если при построении гистограммы на рис. 1.2 увеличить число измерений до  $N \rightarrow \infty$ , то получим вероятность попадания исхода одного измерения в интервал ( $m$ ):

$$P(x_m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_m}{N \Delta x}. \quad (1.2)$$

Если  $\Delta x \rightarrow 0$ , то гистограмма переходит в гладкую кривую, аналогичную изображенной на рис. 1.2 и вероятность попадания результата одного измерения  $x$  в интервал  $dx$  равна  $p dx$ .

Функцию  $p(x)$  называют **плотностью вероятности**.

Вероятность  $P(x_m)$  попадания результата измерения в интервал  $[x_1, x_2]$  равна:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx. \quad (1.3)$$

Необходимо учитывать условие нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1,$$

которое означает, что вся площадь под кривой  $p(x)$  равна единице.

Если сравнивать результаты нескольких серий измерений одной и той же физической величины, то наиболее точное значение будет получено в той серии, в которой кривая распределения вероятностей будет самой узкой. Чем уже кривая распределения, тем меньше ошибка  $d = x - x_2$  отдельного измерения; отсюда вытекает необходимость характеризовать распределение вероятностей не только средним значением  $\bar{x}$ , но и шириной кривой распределения.

Для этой цели выбирают среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение)  $\sigma$  распределения.

3. **Среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение)**  $\sigma$  от среднего позволяет оценить точность измерений или разброс частотного распределения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}, \quad (1.4)$$

где  $d_i = x_i - \bar{x}$  – разность между полученным значением и средним арифметическим.

Величину  $\sigma^2$  называют **дисперсией** распределения.

Из уравнения (1.4) видно, что стандартное отклонение от среднего, полученное по  $N$  измерениям, в  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  раз отличается от отклонения отдельного измерения, то есть точность измерений растет с увеличением числа измерений.

Функция  $p(x)$  плотности вероятностей может иметь различный вид для различных случаев измерений. При измерении многих физических величин хорошо описывает плотность вероятностей **нормальное распределение (распределение Гаусса)**. Функция плотности вероятностей для случайной переменной  $x$  имеет вид:

$$p(x, x_0, \sigma) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} \exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma^2\right]. \quad (1.5)$$

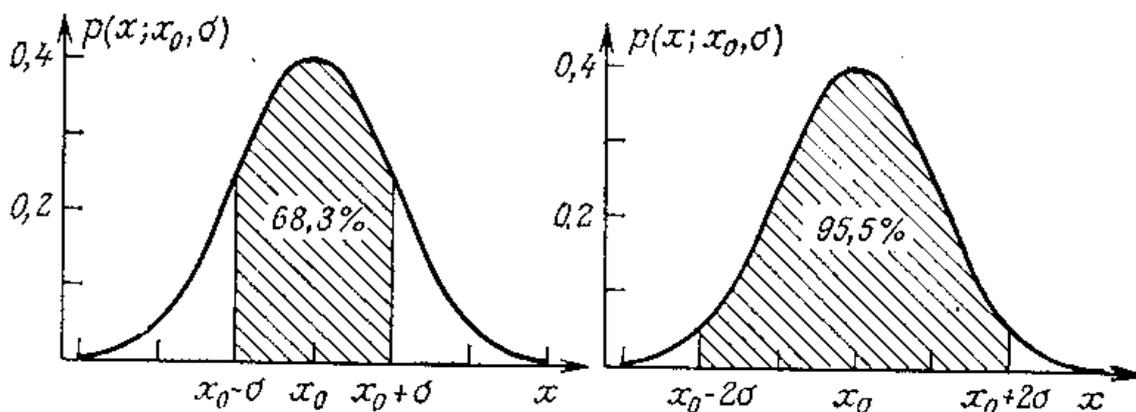
Распределение характеризуется следующими основными особенностями.

1. Распределение симметрично относительно точки  $x_0 = \bar{x}$ , т. е. одинаково часто встречаются погрешности одного значения, но разных знаков.
2. Частота появления погрешностей уменьшается с возрастанием их значения. Функция при  $x = x_0$  имеет максимум. Это означает, что значения  $x$ , лежащие около  $x_0$ , получаются при измерениях с наибольшей вероятностью.
3. Параметр  $\sigma$  характеризует степень рассеяния результатов измерения относительно значения  $x = x_0$ .

Величину вероятности  $P$ , выраженную в процентах, называют также **статистической достоверностью** результата (а также доверительной вероятностью). Для интервала измеряемых величин:

$$x = x_0 \pm \sigma \quad \text{вероятность } P = 68,3 \%;$$

$$x = x_0 \pm 2\sigma \quad \text{вероятность } P = 95,5 \%;$$



$$x = x_0 \pm 3\sigma \quad \text{вероятность } P = 99,7 \%.$$

На рис. 1.3 показаны области  $\pm\sigma$  и  $\pm 2\sigma$  для нормального распределения.

## 5. Порядок выполнения работы

1. *Схема выполнения эксперимента.* Лабораторная работа может выполняться в двух вариантах:

- 1 вариант. Измеряют период колебаний маятника с помощью точного секундомера (для большей точности измеряют время 10 колебаний маятника и принимают за период одну десятую полученной величины);

- 2 вариант. Устанавливают вращением ручки потенциометра выходное напряжение источника постоянного напряжения, измеряют его значение цифровым вольтметром.

Лабораторную работу выполняют одновременно два студента: один многократно устанавливает значение физической величины, второй записывает в протокол показания точного прибора; студенты не должны обмениваться информацией о получаемых значениях для обеспечения независимости измерений, в противном случае распределение результатов может отличаться от гауссова распределения.

2. Установить 50 раз значение измеряемой физической величины и измерить её точным прибором. Результаты записать в первый столбец табл. 1.1.

Таблица 1.1. Результаты измерений

N	$x_i$	$d_i = x_i - \bar{x}$	$d_i^2 = (x_i - \bar{x})^2$
1			
2			
...			

3. По данным табл. 1.1 вычислить среднеарифметическое значение  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}$ .

4. Построить гистограмму результатов наблюдений (как на рис. 1.2), разбив промежуток  $[x_{\min}, x_{\max}]$  на 7–8 одинаковых интервалов  $\Delta x$ . Для построения гистограммы предварительно заполнить табл. 1.2. В этой таблице:

$n_m$  – число попаданий измеренных значений  $x_i$  из табл. 1.1 в интервал  $\Delta x$ ;

$\frac{n_m}{N\Delta x}$  – относительное количество значений  $x_i$ , попавших в интервал  $\Delta x$ .

Таблица 1.2. Данные для гистограммы

Границы интервалов	$n_m$	$\frac{n_m}{N\Delta x}$

5. На одном графике с гистограммой построить функцию плотности вероятности  $p(x_m)$  по теоретической формуле (1.5), где  $x_0 = \bar{x}$  (среднее арифметическое) и  $\sigma$  рассчитаны по результатам табл. 1.1. Для упрощения расчетов функции Гаусса (1.5) в первых двух столбцах табл. 1.3 приведены значения  $u$  и вспомогательной функции Гаусса:

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right), \quad (1.6)$$

для вывода которой в формуле (1.5) принято  $\sigma = 1$ .

Значения третьего, четвертого и пятого столбцов табл. 1.3 рассчитать по формулам, приведенным в самой табл. 1.3.

Отложить на графике гистограммы по оси ординат значения функции Гаусса  $p(x)$  (пятый столбец табл. 1.3), соответствующие значениям  $\bar{x} \pm \sigma y$  на оси абсцисс (третий и четвертый столбцы табл. 1.3). Полученные точки соединить плавной линией.

Таблица 1.3. Расчет функции плотности вероятности

$y$	$p(y)$	$\bar{x} + \sigma y$	$\bar{x} - \sigma y$	$p(x) = p(y)$
0,00	0,399			
0,20	0,391			
0,40	0,368			
0,60	0,333			
0,80	0,290			
1,00	0,242			
1,20	0,194			
1,40	0,150			
1,60	0,111			
1,80	0,079			
2,00	0,054			
2,20	0,035			
2,40	0,022			

6. Сделать вывод о соответствии гистограммы функции Гаусса.

7. Записать окончательный результат измерений с доверительной вероятностью  $P = 68\%$  в виде  $x_2 = \bar{x} \pm \sigma$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

### 1. Цель работы

1. Изучить закономерности пьезоэлектрического эффекта.
2. Ознакомиться с устройством пьезопреобразователей механической энергии в электрическую.
3. Экспериментально исследовать пьезопреобразователь и измерить значение пьезоэлектрического модуля.

### 2. Состав установки

1. Механизм, передающий механическую нагрузку к преобразователю.
2. Пьезопреобразователь.
3. Мультиметр.

### 3. Подготовка к работе

Перед началом работы изучить по лекциям раздел «Пьезоэлектричество» и ответить на вопросы.

1. Что такое прямой и обратный пьезоэффекты?
2. Физическая природа пьезоэффекта.
3. Особенности материалов, обладающих пьезоэффектом.
4. Вычисление поляризованного заряда в одномерном простом случае.
5. Понятие пьезоэлектрического модуля.
6. Объяснить причину временного характера, возникающего под действием внешних сил пьезопотенциалов.
7. Расчет электрического напряжения, возникающего на обкладках.
8. Источник электрической энергии, возникающей при пьезоэффекте.

### 4. Основы теории пьезоэлектрического эффекта

*Прямой пьезоэлектрический эффект* заключается в образовании на поверхности некоторых кристаллических материалов, при приложении к ним механических усилий, электрических зарядов.

Эффект наблюдается только в ионных кристаллах, молекулы которых, в целом нейтральные, содержат ионы разных знаков и потому обладают дипольным электрическим моментом. При деформации кристалла, вызванного приложенными силами, молекулы кристалла могут смещаться и поворачиваться, что приводит к переориентации их дипольных моментов. Кристалл в целом изменяет свой дипольный момент, который равен векторной сумме дипольных моментов всех его молекул; электрические заряды на поверхности кристалла изменяются. Заряды на поверхности индуцированы зарядами диполей молекул и являются связанными. Внутри кристалла и в окружающей среде имеется множество свободных зарядов (электроны, ионы), которые через короткий промежуток времени концентрируются на заряженных поверхностях и могут нейтрализовать поверхностный индуцированный заряд.

Для подсоединения к измерительным электрическим схемам на пьезокристалл наносят две металлические обкладки, и пьезопреобразователь в электрическом смысле можно считать конденсатором, в котором в качестве

диэлектрика выступает сам пьезокристалл, работающий как генератор электрического напряжения на обкладках конденсатора.

Пьезопреобразователь преобразует работу механической силы, деформирующей кристалл, в электрическую энергию заряда конденсатора.

Величина заряда пропорциональна силе, приложенной к пьезокристаллу:

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x, \quad (2.1)$$

где  $x$  означает направление приложения силы.

Электрическое напряжение между обкладками конденсатора равно:

$$U = \frac{Q_x}{C_{np}} = \frac{d_{11} F_x}{C_{np}}, \quad (2.2)$$

где  $C_{np}$  – электрическая емкость конденсатора (преобразователя).

Действие внешней силы  $F_x$  вызывает в кристалле упругое противодействие, и почти сразу упругая и внешняя сила уравниваются друг друга, перемещения и повороты молекулярных диполей прекратятся, прекратятся и изменения индуцированных зарядов на обкладках; начнется стадия стихийной нейтрализации этих зарядов свободными зарядами. Разность потенциалов между обкладками постепенно упадет до нуля. Если внешнюю силу в этот момент убрать, молекулы упруго вернуться в свое обычное положение, и на обкладках вновь возникнет на некоторое время электрическое напряжение. Это напряжение будет иметь обратный знак в сравнении с состоянием под нагрузкой. Пьезоэффект является обратимым физическим явлением: если к кристаллу приложить внешнее электрическое напряжение, произойдет его деформация под действием возникших внутренних механических напряжений. Явление носит название **обратного пьезоэффекта**.

В качестве материалов пьезопреобразователей применяют кристаллический кварц, турмалин, пьезоэлектрические керамики, некоторые полимеры. Наибольшим значением пьезомодуля обладают пьезокерамики. Пьезопреобразователи с прямым пьезоэффектом применяют в качестве чувствительных элементов измерителей силы, механических напряжений, вибраций, ускорений.

## 5. Метод измерения пьезомодуля

Схема измерений показана на рис. 2.1.

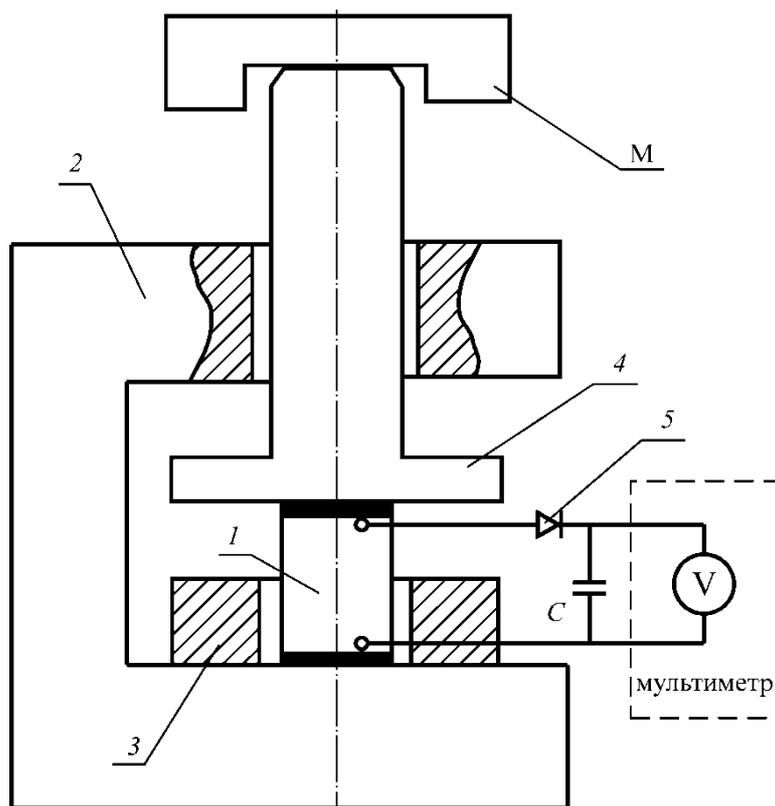


Рис. 2.1. Схема установки по исследованию пьезоэффекта

Керамический пьезопреобразователь 1 с обкладками, показанными толстыми линиями, размещается на основании 2 в отверстии охранного кольца 3. Механическая нагрузка (вес груза  $M$ ) передается на преобразователь с помощью штока 4. К выводам преобразователя параллельно ему подсоединен конденсатор  $C$ ; напряжение  $U$  на конденсаторе измеряется мультиметром. Диод 5 предназначен для предотвращения стока заряда конденсатора  $C$  назад к преобразователю при самонейтрализации заряда.

При помещении на шток груза  $M$  на преобразователь действует сила  $F$ :

$$F = M \cdot g,$$

которая вызывает образование на обкладках преобразователя заряда  $Q$ :

$$Q = d_{ij} F = d_{ij} Mg, \quad (2.3)$$

где  $d_{ij}$  – пьезоэлектрический модуль преобразователя.

Этот заряд распределяется между емкостью преобразователя  $C_{np}$  и конденсатором  $C$ ; так как  $C_{np} \ll C$ , заряд, в основном, пройдет через диод, сосредоточится в конденсаторе и зарядит его до напряжения  $U$ :

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d_{ij} Mg}{C}. \quad (2.4)$$

Конденсатор необходим для того, чтобы увеличить постоянную времени самопроизвольного изменения напряжения  $U$  вследствие протекания токов разряда через входную цепь мультиметра и из-за эффекта самонейтрализации заряда обкладок преобразователя.

Преобразуя (2.4), находим значение пьезоэлектрического модуля преобразователя:

$$d_{ij} = \frac{UC}{Mg}. \quad (2.5)$$

Величина емкости  $C$  конденсатора подбирается индивидуально, под характеристики преобразователя, и составляет  $(10^{-7}-10^{-6})$  Ф.

### 6. Порядок выполнения работы

1. Подсоединить мультиметр к выходным гнездам устройства.
2. Провести измерение напряжения  $U$  при трех различных значениях груза  $M$ . Измерения проводить не при установке груза  $M$ , а при его снятии со штока. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Результаты эксперимента и расчетов

№	$M$ , кг	$U$ , В	$d_{ij}$ , Кл/Н
1			
2			
3			

3. Вычертить график зависимости значения  $d_{ij}$  от величины силы  $F = M g$ , сделать вывод о степени линейности зависимости  $d_{ij} = f(F)$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### 1. Цель работы

Изучить методы исследования магнитного поля с использованием баллистического гальванометра и с помощью датчиков Холла; измерить обоими методами распределение магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Постоянный магнит.  
2. Измерительная катушка и стрелочный индикаторный прибор – баллистический гальванометр.

3. Датчик Холла.

4. Мультиметр.

### 3. Подготовка к работе

Перед началом работы изучить теорию методов измерения магнитного поля по лекциям и настоящему сборнику, ответить на следующие вопросы.

1. Устройство механизма гальванометра.

2. Принцип измерения индукции магнитного поля с помощью баллистического гальванометра.

3. Принцип работы датчика Холла.

4. Методы получения магнитного поля.

5. Индукция и магнитный поток, силовые линии магнитного поля.

6. Вывод уравнения величины заряда  $q$ , протекающего по измерительной катушке баллистического гальванометра, при изменении магнитной индукции в ней.

7. Как проводится калибровка баллистического гальванометра?

8. Как проводится калибровка датчика Холла?

### 4. Краткая теория методов исследования постоянного магнитного поля

#### *Характеристика магнитных полей*

Магнитное взаимодействие удаленных тел осуществляется посредством магнитного поля. Магнитные силы – проявление электрических действий, вызванных движущимися электрическими зарядами, являются удобной абстракцией, применяемой при расчетах силовых воздействий движущихся зарядов друг на друга. В природе не существует никаких особых магнитных зарядов, которые могли бы быть источниками магнитных полей.

Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды, т. е. электрический ток, а также магнитные моменты квантовых частиц – атомов, электронов, других частиц; кроме того, переменные электрические поля создают переменные магнитные поля.

Картину распределения магнитного поля в пространстве можно представить с помощью воображаемых силовых линий (линий магнитной индукции). Если в магнитное поле внести намагниченную стрелку, она самоустановится по направлению линии. Линии индукции – замкнутые линии без начала и конца, то есть магнитное поле является *соленоидальным*.

Величину магнитного поля в каждой точке пространства определяет индукция  $\vec{B}$  магнитного поля в этой точке. Это векторная величина, численное значение которой пропорционально густоте силовых линий в измеряемой области.

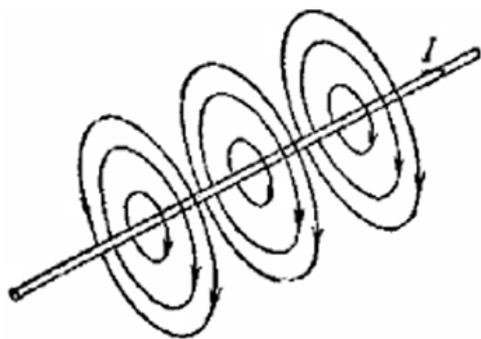


Рис. 3.1. Линии магнитной индукции поля прямого тока

Электрический ток, проходя по прямому проводу, создает в пространстве вблизи провода магнитное поле, индукция которого уменьшается с удалением от провода обратно пропорционально расстоянию. Силовые линии имеют форму концентрических окружностей с центром на оси провода (рис. 3.1.).

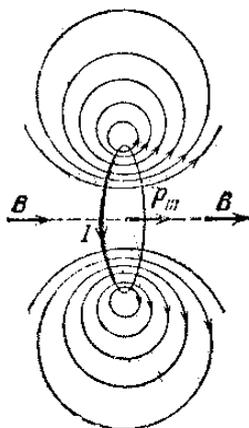


Рис. 3.2. Магнитное поле кругового тока

Проводник, свернутый в кольцо, создает магнитное поле. На рис. 3.2 показано распределение силовых линий в плоскости сечения, проходящей через ось симметрии кольца. Полная картина силовых линий является, конечно, объемной, осесимметричной.

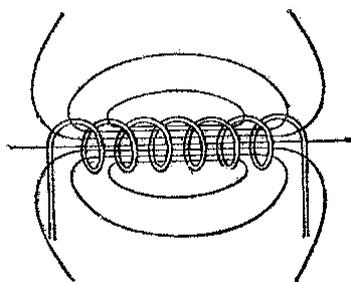


Рис. 3.3. Поле соленоида

Магнитное поле короткого соленоида показано в плоскости сечения, проходящей через ось соленоида (рис. 3.3). При увеличении длины соленоида до бесконечной, внешнее магнитное поле соленоида уменьшится до нуля, и силовые линии вне соленоида также исчезнут. Распределение магнитного поля внутри соленоида и по диаметру, и по его длине окажется строго равномерным.

На рис. 3.4 показана картина магнитного поля прямого постоянного магнита.

Линии замыкаются в окружающем магнит пространстве.

Сравнение рис. 3.3 и 3.4 показывает схожесть картин магнитного поля, создаваемого соленоидом и постоянным прямым магнитом.

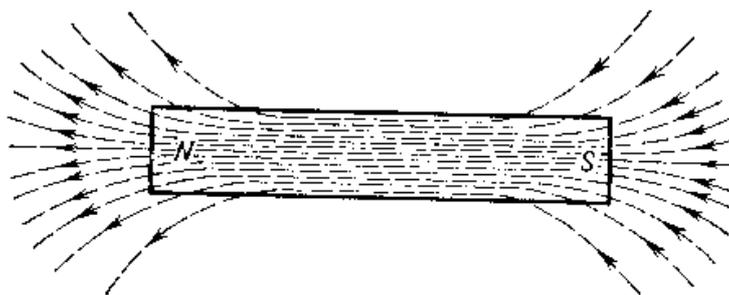
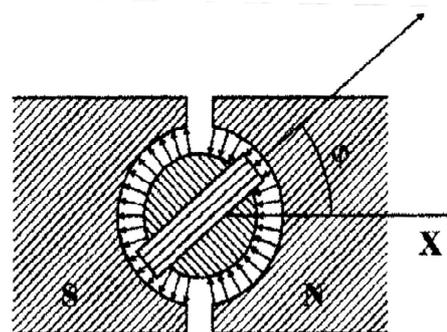


Рис. 3.4. Картина силовых линий постоянного прямого магнита

### **Измерения с помощью баллистического гальванометра**

Баллистическим гальванометром называют электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, отличающийся высокой чувствительностью к току и большим периодом колебаний подвижной системы (рамки). Схематически механизм гальванометра показан на рис. 3.5.

Здесь S и N – полюсные наконечники магнита, стрелками обозначены силовые линии магнитного поля в кольцевом воздушном зазоре. Цилиндрическое тело в середине устройства – ферромагнитное.



инцип действия гальванометра

Гальванометр работает в баллистическом режиме, если время, в течение которого через него протекает токовый импульс, во много раз меньше периода собственных колебаний подвижной рамки гальванометра. В таком режиме максимальное отклонение рамки под действием измеряемого тока от положения равновесия пропорционально не величине тока  $i$ , а величине заряда  $q$ , прошедшего через рамку:

$$\alpha_0 = \frac{q}{A} = \frac{1}{A} \cdot \int_0^{\infty} I \cdot dt, \quad (3.1)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент, называемый баллистической постоянной гальванометра.

После толчка рамки токовым импульсом подвижный механизм гальванометра (рамка и указатель) движется по инерции, постепенно замедляя движение под действием возвращающего момента пружины, а также под действием самовозбуждающегося в рамке тока, вызванного движением рамки в магнитном поле. Этот ток создает механический момент сил, направленный навстречу вращательному движению рамки.

При измерении индукции магнитного поля, к рамке гальванометра подсоединяют проводниками измерительную катушку, помещаемую в область пространства, где необходимо измерить величину индукции; катушка содержит  $N$  витков при площади поперечного сечения  $S$ .

Таким образом, рамка и катушка образуют замкнутую электрическую цепь, ток в каждой точке которой одинаков. Пусть в момент времени  $t_1$  индукция была  $B_1$ , а в момент времени  $t_2$  индукция стала  $B_2$ . Изменение магнитного потока  $\Delta\Phi$  через измерительную катушку определяется выражением:

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1) \cdot S = \Delta B \cdot S. \quad (3.2)$$

Изменение потокосцепления измерительной катушки:

$$\Delta\varphi = \Delta\Phi N = \Delta BSN. \quad (3.3)$$

Найдем величину заряда  $q$ , который протечет при этом через рамку гальванометра.

В течение времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  в измерительной катушке будет наводиться ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt}, \quad (3.4)$$

где  $d\varphi$  – изменение потокосцепления измерительной катушки.

В цепи измерительной катушки и рамки гальванометра под действием ЭДС потечет ток, сила которого  $I$  определяется уравнением:

$$\varepsilon = RI + L\frac{dI}{dt}, \quad (3.5)$$

где  $L$  – суммарная индуктивность катушки и рамки;

$R$  – активное сопротивление этой цепи.

С учетом (3.4) уравнение (3.5) принимает вид:

$$-\frac{d\varphi}{dt} = RI + L\frac{dI}{dt}. \quad (3.6)$$

Проинтегрируем его по времени в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$\Delta\varphi = -\int_{t_1}^{t_2} d\varphi = -R\int_{t_1}^{t_2} Idt + LI\Big|_{t_1}^{t_2}. \quad (3.7)$$

Но  $I = 0$  при  $t = t_1$  и при  $t = t_2$ , поэтому последний член правой части уравнения (3.7) равен нулю:

$$\Delta\varphi = R\int_{t_1}^{t_2} Idt = Rq, \quad (3.8)$$

откуда

$$q = \frac{\Delta\varphi}{R} = \frac{\Delta BSN}{R}. \quad (3.9)$$

В настоящей лабораторной работе заряд  $q$  возникает при быстром вытаскивании измерительной катушки из области, где индукция магнитного поля равна  $B_0$ , в область, где магнитного поля нет, поэтому  $\Delta B = B_0$ . Поэтому:

$$q = B_0SN/R. \quad (3.10)$$

Таким образом, заряд  $q$ , протекающий через рамку гальванометра при вытаскивании катушки из магнитного поля, пропорционален индукции магнитного поля  $B_0$ . Учитывая (3.1), получим угол поворота рамки:

$$\alpha_0 = \frac{q}{A} = \frac{B_0 SN}{A \cdot R}. \quad (3.11)$$

Величина баллистической постоянной  $A$  определяется экспериментально. Через гальванометр необходимо разрядить калибровочный конденсатор с емкостью  $C$ , заряженный напряжением  $U$ . Заряд  $q_{\text{калибр}}$  такого конденсатора равен:

$$q_{\text{калибр}} = C \cdot U. \quad (3.12)$$

Рамка гальванометра повернется в соответствии с (3.11) при этом на угол:

$$\alpha_{\text{калибр}} = \frac{q_{\text{калибр}}}{A} = \frac{C \cdot U}{A}. \quad (3.13)$$

Баллистическая постоянная  $A$  равна:

$$A = \frac{C \cdot U}{\alpha_{\text{калибр}}}. \quad (3.14)$$

Используя (3.11), получим:

$$B_0 = \frac{\alpha_0 AR}{SN}. \quad (3.15)$$

Здесь  $B_0$  – индукция измеряемого магнитного поля;  $\alpha_0$  – максимальное отклонение указателя гальванометра при вытаскивании катушки;  $N$  – число витков измерительной катушки;  $S$  – площадь, ограниченная витком катушки.

На рис. 3.6 показана схема измерения индукции магнитного поля с помощью баллистического гальванометра и измерения баллистической постоянной.

Для определения баллистической постоянной  $A$  переключатель  $\Pi$  необходимо перевести из положения 1 в положение 2 и мгновенно вернуть его в положение 1, отследив максимальное отклонение  $\alpha_{\text{калибр}}$  указателя гальванометра. Это условие необходимо для того, чтобы цепь рамки гальванометра при движении его механизма по инерции после первоначального толчка током разряда конденсатором  $C$  была замкнута, иначе не возникнет ток самоиндукции при движении рамки в магнитном поле гальванометра. Измерение индукции проводят в положении 1 переключателя  $\Pi$ .

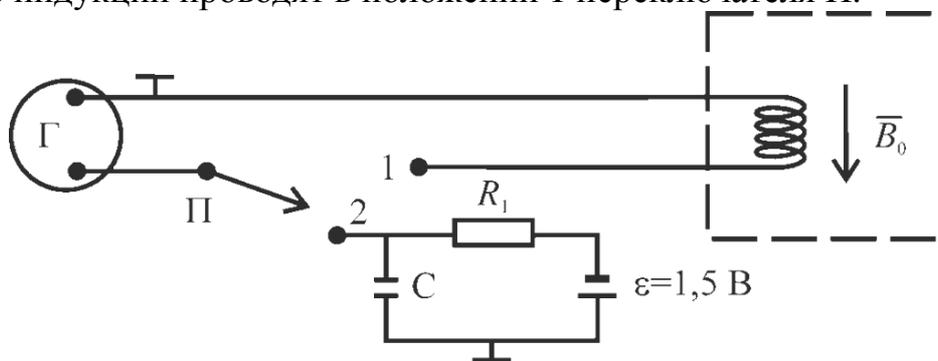


Рис. 3.6. Схема измерения индукции поля и калибровки гальванометра

### **Измерение индукции магнитного поля с помощью датчиков Холла**

Для измерения индукции магнитного поля применяют полупроводниковые датчики Холла. Эффект Холла состоит в следующем. Если кусок

полупроводника в виде прямоугольной пластины помещен в магнитное поле с индукцией  $B$  так, чтобы силовые линии пересекали пластину, и пропустить через полупроводник ток плотности  $j$ , то между противоположными сторонами пластины возникнет разность потенциалов  $U_x$ . Эта поперечная (относительно  $j$  и  $B$ ) разность потенциалов пропорциональна плотности токов  $j$ , магнитной индукции  $B$  и расстоянию  $d$  между соответствующими гранями пластины:

$$U_x = R_x djB, \quad (3.16)$$

где  $R_x$  – постоянная, зависящая от свойств полупроводника. Ее называют постоянной Холла для данного полупроводника.

Таким образом, если такую пластину поместить в область пространства, где существует магнитное поле неизвестной величины, то при постоянной плотности  $j$  тока через пластину, зная ее размеры и постоянную Холла  $R_x$ , можно, измерив холловскую разность потенциалов, на основании соотношения (3.16) определить величину индукции магнитного поля  $B$ .

Чаще всего плотность тока и размеры пластины не известны, поэтому требуется калибровка датчика Холла путем измерения  $U_x$  датчика, помещенного в известное магнитное поле  $B$ . Представим (3.16) в виде:

$$U_x = K_x B, \quad (3.17)$$

где  $K_x$  – коэффициент пропорциональности, назовем его коэффициентом датчика.

При калибровке необходимо определить значение этого коэффициента.

Применение датчиков Холла не требует для измерения индукции магнитного поля изменения его величины или перемещения датчика. Это является преимуществом холловского метода по сравнению с баллистическим. С помощью датчиков Холла измеряются поля с индукцией, начиная с малых значений, порядка  $10^{-6}$  Тл и выше при точности  $1 \div 2$  %. Достоинством датчиков Холла являются их малые размеры, а также малая инерционность, т. е. независимость от частоты изменений магнитного поля, что позволяет с их помощью измерять переменные поля, частота которых достигает  $10^{10}$  Гц.

В настоящей работе датчик Холла помещен внутри полого немагнитного стержня, в его конце; сам стержень закреплен в круглой ручке, снабженной выключателем «Вкл» и гнездом для подключения мультиметра (рис. 3.7).

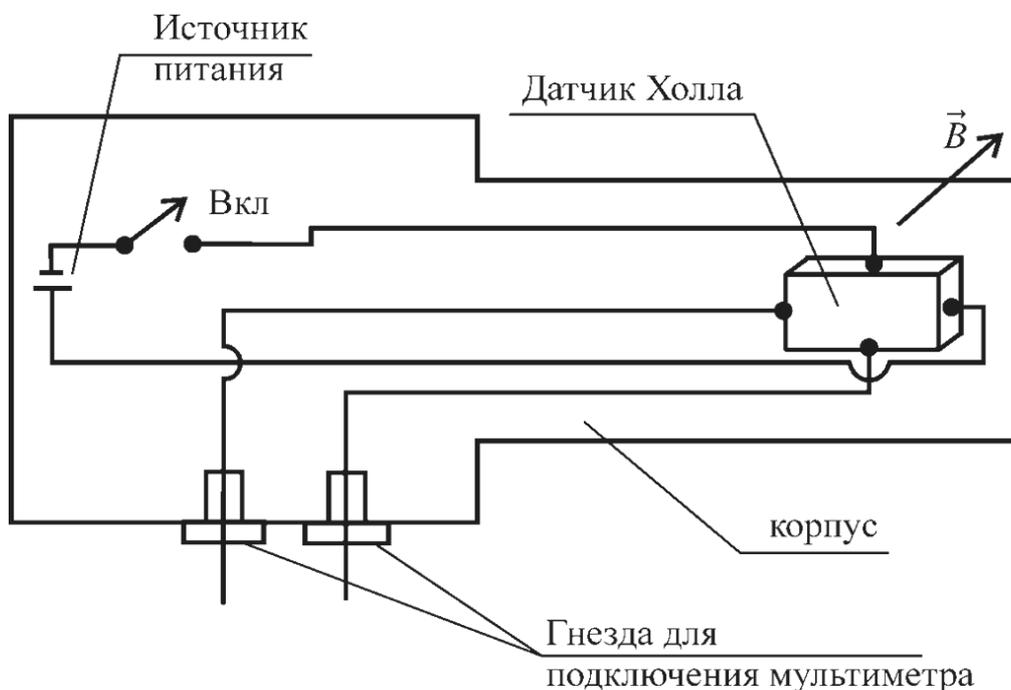


Рис. 3.7. Схема измерительного преобразователя на датчике Холла

Для точного измерения индукции  $B$  магнитного поля датчиком Холла важна ориентация пластинки датчика относительно направления вектора  $\vec{B}$  в том месте пространства, где размещен датчик. Плоскость пластинки должна быть перпендикулярна вектору  $\vec{B}$  и направлению магнитных силовых линий в этом месте. При правильном расположении датчика его показания будут наибольшими среди всех возможных угловых положений пластинки. Ориентация пластинки указана линией на торце трубки с датчиком.

## 5. Порядок выполнения работы

### *Задание 1. Определение индукции поля постоянного магнита*

1. Расположить постоянный магнит на подставке в соответствии с рис. 3.8.
2. В положении переключателя гальванометра «корректировка» установить стрелку гальванометра в начале шкалы, затем перевести этот переключатель в положение «измерение».

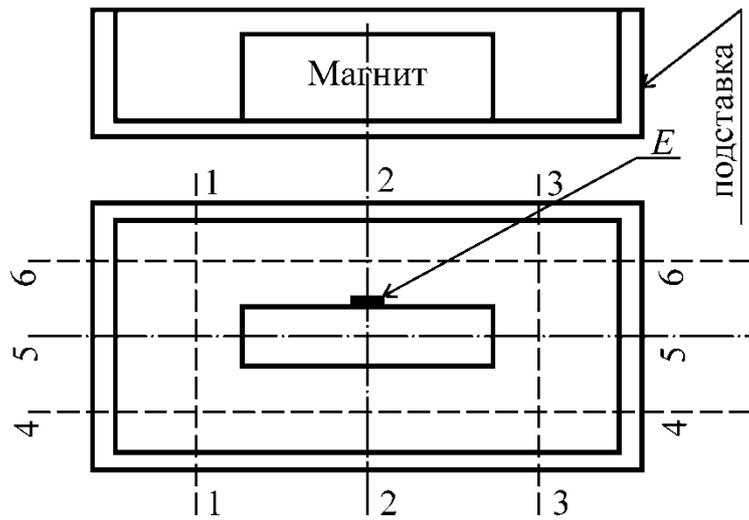


Рис. 3.8. Схема проведения измерений распределения магнитного поля постоянного магнита

3. Провести калибровку баллистического гальванометра. Переключатель П необходимо перевести из положения 1 в положение 2 и мгновенно вернуть в положение 1. Измерить, руководствуясь рис. 3.6 и описанием к нему в тексте, угол  $\alpha_{\text{калибр}}$  поворота рамки при разряде через гальванометр конденсатора С. Рассчитать баллистическую постоянную А по уравнению (3.14), считая  $U = \varepsilon = 1,5 \text{ В}$ ;  $C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ .

4. Поместить измерительную катушку баллистического гальванометра в область Е вплотную к поверхности магнита так, чтобы плоскости катушки и поверхности магнита были параллельны. Повторить, как в п. 2, установку стрелки в начало шкалы. Перевести переключатель гальванометра в положение «измерения», при этом переключатель П должен быть в положении 1. Выдернуть катушку из магнитного поля и зафиксировать разность  $\Delta\alpha$  начального и конечного положений стрелки гальванометра.

Вычислить по формуле (3.15) значение индукции  $B_0$  в области Е, считая  $\alpha_0 = \Delta\alpha$ ,  $S = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $N = 400$ ,  $R = 26 \text{ Ом}$ .

#### *Задание 2. Калибровка датчика Холла*

5. Поместить в область Е датчик Холла так, чтобы его пластинка (см. рис. 3.7) была параллельна поверхности магнита. Подключить к гнездам на корпусе датчика мультиметр. Установить переключатель шкал мультиметра в положение «200 mV», при этом показания индикатора мультиметра будут в милливольтгах. Холловское напряжение равно разности напряжений, показываемых мультиметром при помещении датчика в магнитное поле и вне магнитного поля:  $U_x = U' - U_0$ . Провести измерения холловской разности потенциалов  $U_x$ , нажав включатель «Вкл» на корпусе датчика. Вычислить по формуле

$$K_x = U_x / B_0 = (U' - U_0) / B_0$$

значение коэффициента датчика.

Здесь  $B_0$  – индукция магнитного поля в области Е, измеренная с помощью баллистического гальванометра.

Занести результаты, полученные при выполнении п. 3, 4. и 5 в табл. 3.1. Каждое измерения проводить 3 раза, вычислив затем средние значения всех величин.

Таблица 3.1. Константы калибровок

№	$\alpha_{\text{калибр}}$ , деления	A, Кл	$\Delta\alpha$ , деления	$B_0$ , Тл	$U_x$ , В	$K_x$ , В/Тл
1						
2						
3						
Среднее значение						

**Задание 3.** Нахождение распределения магнитного поля постоянного магнита

6. Провести с помощью датчика Холла измерение распределения индукции В магнитного поля по направлениям 1–1, 2–2, 3–3 или, по заданию преподавателя, по 4–4, 5–5, 6–6 (см. рис. 3.8), получив по каждому направлению 5–6 точек. Расстояния между точками – 1 см. В каждой точке, поворачивая датчик, находить максимальное значение показания.

Занести результаты измерений в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значения индукции В, Тл

Направление	Координата x, см							
1–1								
2–2								
3–3								

7. Используя данные табл. 3.2, построить графики зависимости величины магнитного поля от координаты x по каждому направлению.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

### 1. Цель работы

Ознакомиться с теорией распространения и поглощения света в диэлектрической среде; изучить принципы методов измерения спектров поглощения растворов; определить длину волны максимума поглощения исследуемого вещества.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Фотоколориметр КФО.
2. Две кюветы: контрольная и кювета для исследуемого раствора.
3. Раствор в закрытом сосуде.
4. Сосуд с водой.
5. Салфетки для протирки кювет.

### 3. Подготовка к работе

1. Ознакомиться по лекциям с теорией распространения и поглощения света в диэлектрической среде.
2. Изучить принципы методов измерения спектров поглощения растворов.
3. По описанию к прибору КФО и по данному сборнику изучить устройство прибора и принцип его работы.
4. Подготовить ответы на следующие вопросы:
  - охарактеризовать спектр поглощения газов;
  - охарактеризовать спектр поглощения жидкости;
  - объяснить на основании электромагнитной теории происхождение линий поглощения;
  - объяснить на основании квантовой теории вид спектра поглощения;
  - как экспериментально определить оптическую плотность среды?
  - показать ход светового пучка в фотоколориметре;
  - описать структурную схему фотоколориметра.

### 4. Теоретическое введение

#### *Взаимодействие света с диэлектрической средой*

В соответствии с электромагнитной теорией, проходящий в среде свет раскачивает своим электрическим переменным полем внешние («оптические») электроны в атомах среды. Отдавая им свою энергию, свет поглощается, однако колеблющиеся электроны сами становятся источником вторичных световых волн. Эти волны и образуют прошедший среду световой поток.

Если сместить электрон в атоме из положения равновесия, то он испытает действие квазиупругой возвращающей силы –  $br$ . Поэтому атом с электроном можно представить *гармоническим осциллятором* с собственной круговой частотой колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b}{m}}, \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса электрона;  $b$  – константа, зависящая от типа атома.

На электрон со стороны поля волны действует смещающая сила:

$$eE = eE_0 \cos \omega t, \quad (4.2)$$

где  $E_0$  – амплитуда поля;

$\omega$  – частота волны, возбуждающая вынужденные колебания электронов в атоме с частотой вынуждающей силы  $\omega$ ;

$e$  – заряд электрона.

Выражение для амплитуды вынужденных колебаний электрона (по аналогии с вынужденными механическими колебаниями упругой системы) можно записать в виде:

$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (4.3)$$

По мере приближения частоты  $\omega$  световой волны к собственной частоте  $\omega_0$  колебаний электрона в атоме, амплитуда колебаний увеличивается. При равенстве  $\omega = \omega_0$  наступает резонанс, и амплитуда, в соответствии с (4.3), должна стать бесконечной.

Этого не происходит вследствие потерь энергии колебаний электрона на взаимодействие с окружающей средой. Потери увеличиваются по мере сближения частот  $\omega$  и  $\omega_0$ .

Поглощение света в диэлектриках, таким образом, имеет место только на таких частотах световой волны, которые близки к собственным частотам колебаний электронов в атомах, т. е. имеет резонансный характер. Свет, имеющий другие частоты, проходит среду беспрепятственно.

В газах атомы располагаются друг от друга на больших расстояниях, и поглощение происходит только на узких участках спектра падающего света – линиях спектра. В жидкостях сказывается взаимодействие между близко расположенными соседними атомами, поэтому линии превращаются в широкие полосы, спектр поглощения становится полосатым.

При использовании квантового подхода для объяснения процессов поглощения и излучения атомов и молекул принимается, что поглощение фотона частицей вещества сопровождается переходом частицы с низкого энергетического уровня на более высокий с разницей уровней  $\Delta E$ :

$$\Delta E = h\nu, \quad (4.4)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  . – постоянная Планка;

$h\nu$  – энергия фотона;

$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$  – частота света.

Различным видам движения: электронов вокруг ядер, колебательного движения атомов в молекулах, вращательного движения молекулы – соответствуют определенные значения энергии. Эти энергии квантуются, т. е. переходы от одного значения энергии к другому совершаются скачком. Спектру энергий возможных переходов соответствует спектр энергий поглощаемых фотонов, т. е. спектр частот  $\nu$  поглощения, определяемых из выражения (4.4).

Согласно закона Бугера, интенсивность света  $I_\lambda$ , проходящего поглощающую среду, уменьшается по мере увеличения пройденного расстояния

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\gamma_\lambda \cdot \delta), \quad (4.5)$$

где  $I_{0\lambda}$  – интенсивность волны, вступающей в вещество;

$\delta$  – толщина прошедшего светом слоя;

$\gamma_\lambda$  – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны и природы вещества.

Отношение интенсивностей прошедшего вещества и падающего потоков света на некоторой длине волны  $\lambda$  называется спектральным коэффициентом пропускания  $\tau_\lambda$ :

$$\tau_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} = \exp(-\gamma_\lambda \cdot \delta). \quad (4.6)$$

Десятичный логарифм выражения (4.6), взятый с обратным знаком, называется оптической плотностью  $D$ :

$$D = -\lg \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} = \gamma_\lambda \cdot \delta \lg e = \frac{1}{2,3} \gamma_\lambda \cdot \delta, \quad (4.7)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма.

Коэффициент поглощения среды пропорционален концентрации  $c$  поглощающего вещества в ней:

$$\gamma_\lambda = k_\lambda \cdot c, \quad (4.8)$$

где  $k_\lambda$  – коэффициент пропорциональности.

Окончательный вид выражения для оптической плотности имеет вид:

$$D = \frac{1}{2,3} k_\lambda \cdot c \cdot \delta. \quad (4.9)$$

Изучая способность вещества поглощать свет на разных длинах волн, можно определить вид вещества. Такой метод изучения называется абсорбционной спектрофотометрией. На практике измеряют зависимость оптической плотности слоя вещества от длины волны света, затем пересчетом определяют, пользуясь выражением (4.9), зависимость коэффициента  $k_\lambda$  от длины волны.

Максимумы на полученном графике характеризуют частоты собственных колебаний в атомах и молекулах, значения частот позволяют вычислить энергии квантовых переходов в атомах и молекулах и, в конечном итоге, определить тип вещества.

### ***Устройство колориметра и работа с ним***

Излучатель и коллиматор формируют параллельный пучок света. Излучатель – лампа накаливания – создает излучение в широком диапазоне длин волн, поэтому после коллиматора свет проходит через светофильтр, который выделяет из спектра нужный участок (рис. 4.1).

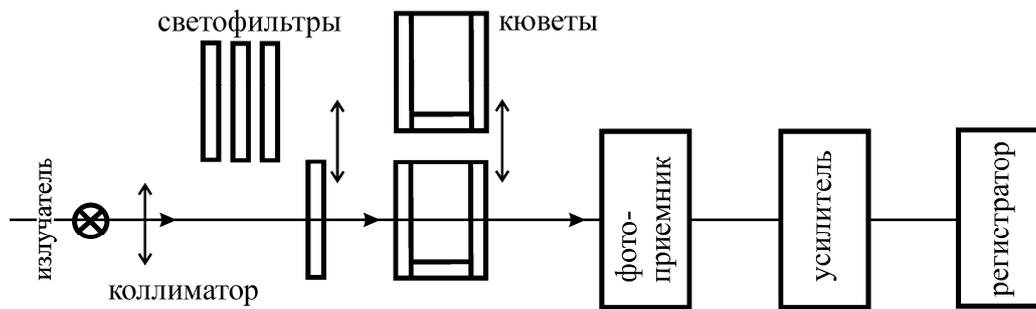


Рис. 4.1. Структурная схема колориметра

Далее по ходу светового пучка устанавливают прозрачную кювету с анализируемым раствором, или кювету сравнения, в которой находится только растворитель; эти кюветы по очереди могут занимать место на пути пучка.

Интенсивность прошедшего кювету пучка регистрирует фотоприемник, электрический сигнал, с выхода которого усиливается и измеряется стрелочным прибором.

Вначале на пути пучка устанавливают кювету с чистым растворителем; переключатель светофильтров поворачивают в положение с нужной длиной волны. Закрывают крышку кюветного отделения и регулируют усиление до тех пор, пока стрелка измерительного прибора не установится на делении 100 шкалы прибора.

Затем переключателем кювет (не открывая крышку) ставят на пути пучка кювету с исследуемой жидкостью. Показания стрелочного прибора дают значение отношения  $I_{\lambda}/I_{\lambda_0}$  в процентах. Оптическую плотность можно рассчитать по (4.7), из этого же уравнения можно найти спектральный коэффициент поглощения  $\gamma_{\lambda}$ . Значение толщины  $\delta$  прошедшего светом слоя определяется конструкцией кюветы.

Для измерения всего спектра поглощения определяют коэффициент поглощения для всех длин волн набора переключаемых светофильтров.

## 5. Порядок выполнения работы

1. Включить прибор в сеть 220 В.
2. Подготовить кюветы к работе, для чего тщательно протереть вначале влажной, а затем сухой полотняной салфеткой внутренние и внешние стенки кюветы. После протирки нельзя касаться стенок кюветы пальцами ниже уровня жидкости.
3. Залить в измерительную кювету примерно на 70 % ее емкости раствор, в контрольную – растворитель. На поверхностях, через которые проходит при измерениях свет, не должно быть пузырьков воздуха.
4. Открыть крышку кюветного отделения, установить кюветы так, чтобы световой пучок проходил по середине кюветы. Правильность расположения проверить поочередной их установкой на пути пучка переключателем кювет. Закрывать крышку.
5. Установить соответствующим переключателем на пути светового пучка контрольную кювету; переключателем фильтров установить нужный фильтр;

регулировкой усиления добиться, чтобы стрелка измерительного прибора совпадала с делением 100 шкалы прибора.

6. Установить на пути светового пучка переключателем измерительную кювету. Показания стрелочного прибора дадут отношение  $I_\lambda / I_{\lambda_0}$  в процентах.

Записать длину волны и результат измерения в табл. 4.1.

7. Повторить пп. 5 и 6 для всех длин волн набора светофильтров, занести результаты измерений в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Результаты измерений и вычислений

$\lambda$ , нм	$I_\lambda / I_{\lambda_0}$ , %	$I_\lambda / I_{\lambda_0}$ , относ. единицы	$D$	$\gamma_\lambda \cdot \delta$

8. Рассчитать оптическую плотность  $D$  для всех длин волн по формуле (4.7) и значение  $\gamma_\lambda \cdot \delta$  по формуле:

$$\gamma_\lambda \cdot \delta = 2,3D.$$

Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

9. Построить зависимость  $\gamma_\lambda \cdot \delta = f(\lambda)$  в виде графика. Указать на графике длину волны максимума поглощения света веществом.

10. Вычислить энергию квантового перехода, соответствующего максимуму поглощения, по формуле (4.4). Выразить эту энергию в эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

#### 1. Цель работы

1. Изучить физические причины изменений сопротивления терморезистора от температуры.

2. Исследовать зависимости сопротивления терморезисторов от температуры.

#### 2. Приборы и принадлежности

Лабораторная установка исследования температурных зависимостей терморезисторов.

#### 3. Подготовка к работе

По лекциям ознакомиться с основами теории электропроводности металлов и полупроводников и металлических и полупроводниковых терморезисторов, ответить на следующие вопросы.

1. Дать физическое объяснение понятия «плотность тока».

2. Объяснить причины возникновения электрического сопротивления.

3. Объяснить причины и характер дрейфового движения носителей тока.

4. Назвать причины зависимости электрического сопротивления металла от температуры.

5. Назвать причины зависимости электрического сопротивления полупроводника от температуры.

6. Изобразить вид функциональной зависимости величины сопротивления металлов от температуры (формула) и объяснить физические причины характера такой зависимости.

7. Изобразить вид функциональной зависимости величины сопротивления полупроводников от температуры (формула) и объяснить физические причины характера этой зависимости.

#### 4. Теоретическое введение

Терморезисторы – измерительные преобразователи, использующие зависимость своей электропроводности от температуры.

Электропроводность – это способность вещества проводить электрические токи, возникающие под действием электрического поля в веществе. В металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны; в случае полупроводников, к числу носителей тока могут добавляться особые квазичастицы – «дырки».

Физической причиной, приводящей к уменьшению способности вещества проводить электрические токи, т. е. к возникновению электрического сопротивления, является столкновение носителей тока, ускоренных электрическим полем, с атомами вещества.

Атомы вещества образуют периодическую решетку, и электроны способны проходить сквозь такую среду, не испытывая сопротивления, если решетка идеальная, с постоянным неизменным периодом. Однако в нагретом веществе

атомы участвуют в тепловом движении, колеблясь относительно своего идеального положения. Это и приводит к столкновениям электронов с атомами.

При столкновении носитель тока отдает свою кинетическую энергию атому, тормозится, затем вновь разгоняется полем и т. д. Движение носителей тока поэтому является не ускоренным, как при движении в вакууме, а является дрейфовым, т. е. с постоянной средней скоростью.

Так как электрический ток – это поток зарядов, его плотность выражается формулой:

$$j = e \cdot n \cdot v_{др}, \quad (5.1)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$n$  – концентрация носителей тока;

$v_{др}$  – скорость дрейфового движения носителей тока.

В соответствии с законом Ома, проводимость вещества равна:

$$\gamma = \frac{j}{E} = \frac{e \cdot n \cdot v_{др}}{E}, \quad (5.2)$$

где  $E$  – напряженность поля, ускоряющего носители тока в веществе, обусловленная приложенным к образцу напряжением.

Дрейфовая скорость носителей тока в веществе пропорциональна полю  $E$  и обратно пропорциональна температуре  $T$  среды. Последнее объясняется тем обстоятельством, что с ростом температуры усиливаются колебания атомов вещества, увеличивается вероятность их столкновений с носителями тока, что затрудняет ускорение носителей полем  $E$ . Можно записать:

$$v_{др} \sim \frac{E}{T}. \quad (5.3)$$

С учетом (5.3), уравнение (5.2) можно заменить качественным соотношением:

$$\gamma \sim \frac{n}{T}. \quad (5.4)$$

Мы видим, что электропроводность вещества определяется концентрацией носителей тока и температурой вещества.

В металлах носителями тока являются свободные электроны и их концентрация  $n$  практически не зависит от температуры. Поэтому для металлов проводимость обратно пропорциональна температуре:

$$\gamma_{Me} \sim \frac{1}{T}. \quad (5.5)$$

В случае полупроводников, при обычных условиях окружающей среды (при комнатной температуре) концентрация носителей очень мала, поэтому полупроводники имеют очень малую проводимость. Но при увеличении температуры все большее число электронов и дырок за счет теплового движения приобретают энергию, достаточную для перехода через запрещенную зону энергетической диаграммы, становятся свободными носителями тока. В случае полупроводников концентрация  $n$  носителей тока очень резко, экспоненциально зависит от температуры:

$$n \sim 2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (5.6)$$

где  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  
 $k$  – постоянная Больцмана.

Зависимость проводимости полупроводника от температуры аналогичная:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (5.7)$$

где  $\gamma_0$  – константа.

Таким образом, проводимость полупроводника с ростом температуры увеличивается.

В электротехнике для характеристики среды часто вместо электропроводности используют физическую величину «удельное электрическое сопротивление  $\rho$ »:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (5.8)$$

Для характеристики элементов схем используют понятие «электрическое сопротивление».

В случае металлических терморезисторов, их сопротивление растет с ростом температуры:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha T^{\circ}C, \quad (5.9)$$

где  $R_0$  – сопротивление при  $0^{\circ}C$ ;

$\Delta R$  – изменение сопротивления при нагревании;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

В случае полупроводников их электрическое сопротивление экспоненциально уменьшается с ростом температуры. Однако расчет сопротивления полупроводниковых терморезисторов имеет некоторые особенности, вызванные тем, что в качестве материала этих элементов используют спеченные смеси тугоплавких полупроводниковых оксидов металлов ( $MgO$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $NiO$  и др). У разных оксидов ширина  $\Delta E$  запрещенной зоны разная, а у терморезистора она оказывается разной при разных температурах.

Зависимость сопротивления полупроводникового терморезистора от температуры следующая:

$$R_T = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (5.10)$$

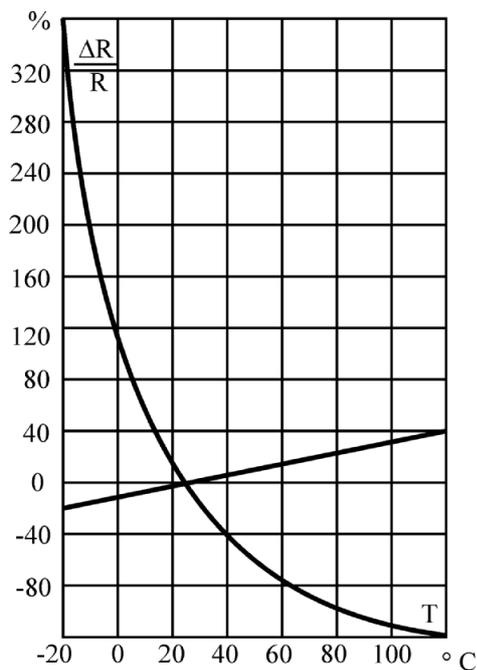


Рис. 5.1. Температурные изменения относительного сопротивления терморезисторов:  
 кривая 1 – медный терморезистор;  
 кривая 2 – полупроводниковый

где  $B$  – постоянный коэффициент, зависящий от состава вещества терморезистора;

$R_0$  – его сопротивление при температуре  $T_0$ .

Температурные зависимости относительного изменения  $\Delta R/R_0$  металлических и полупроводниковых терморезисторов показаны на рис. 5.1.

Для определения коэффициента  $B$  при помощи выражения (5.10) необходимо экспериментально определить значения сопротивлений терморезисторов  $R_{П1}$  и  $R_{П2}$  при температурах  $T_1$  и  $T_2$  и вычислить значения коэффициента по формуле:

$$B = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_{П1}}{R_{П2}}, \quad (5.11)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры.

## 5. Описание метода измерений температурных зависимостей сопротивления

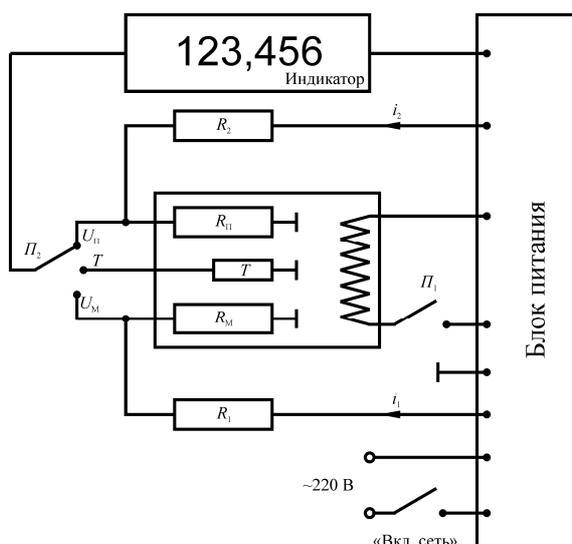


Рис. 5.2. Схема установки для исследования терморезистора

Для измерения температуры с помощью терморезисторов необходимо знать значения коэффициента  $\alpha$  для металлического резистора и коэффициента  $B$  для полупроводникового.

Упрощенная схема измерительной установки, предназначенной для их измерения, показана на рис. 5.2.

Терморезисторы металлический  $R_M$  и полупроводниковый  $R_{П1}$  помещены в электропечь.

Электропечь нагревается после включения тумблера  $П-1$ . Температура печи определяется датчиком  $T$ , размещенным внутри печи; значение

температуры индицируется на цифровом табло индикатора в градусах Цельсия при среднем положении тумблера П-2. При левом или правом положении ручки тумблера П-2 индикатор измеряет падение напряжения  $U$  в милливольтгах на резисторах  $R_M$  или на  $R_{II}$  при прохождении по ним токов  $i_1$  и  $i_2$  от блока питания. При измерении напряжения  $U_{II}$  на полупроводниковом терморезисторе ток  $i_2 = 6 \cdot 10^{-5}$  А и является постоянным. Сопротивление этого терморезистора вычислим по закону Ома:

$$R_{np} = \frac{U_{np}}{i_2}. \quad (5.12)$$

При измерении напряжения  $U_M$  на металлическом резисторе ток  $i_1$  изменяется, но постоянным является напряжение  $E = 0,195$  В источника питания, и сопротивление металлического резистора вычисляется по формуле:

$$R_M = R_1 / \left( \frac{E}{U_M} - 1 \right), \quad (5.13)$$

где  $R_1 = 240$  Ом.

Для вычисления коэффициентов  $\alpha$  и  $B$  необходимо измерить значение сопротивлений терморезисторов при нескольких температурах.

#### 6. Порядок выполнения работы

1. Подсоединить лабораторную установку к сети 220 В.
2. Тумблером Вкл «сеть» подать напряжение сети на блок питания.
3. Тумблером П-1 включить электропечь.

4. Провести измерения падений напряжения  $U_M$  на  $R_M$  и  $U_{II}$  на  $R_{II}$ , производя подключения к индикатору этих элементов тумблером Тр-2 через каждые  $5 \div 10^\circ$  подъема температуры печи. После окончания измерений выключить печь и блок питания.

5. Произвести расчеты сопротивлений металлических и полупроводниковых резисторов при каждой температуре измерений по формулам:

$$R_M = \frac{R_1}{\frac{E}{U_M} - 1}, \quad R_{II} = \frac{U_{II}}{i_2},$$

а также значений  $\Delta R / R_0$  для каждой из температурных точек.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

6. Построить графики:

$$\Delta R / R_M = f(T^\circ C); \quad \Delta R / R_{II} = f(T^\circ C).$$

7. Вычислить по формулам (5.9) и (5.11) коэффициенты  $\alpha$  и  $B$ . При вычислениях коэффициента  $B$  необходимо применять абсолютные значения температур.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

### 1. Цель работы

Ознакомиться с теоретическими основами, устройством и принципом действия тензорезисторов; определить коэффициент тензочувствительности тензорезисторов.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Консольно закрепленная балка с наклеенными тензорезисторами.
2. Подставка, на которой закреплена балка и смонтирована мостовая измерительная схема.
3. Источник питания.
4. Мультиметр.
5. Грузики.

### 3. Подготовка к работе

По лекциям и настоящему сборнику изучить следующие темы.

1. Тензорезистивный эффект в металлах и полупроводниках.
2. Конструкция и технические характеристики тензодатчиков, их использование.

### 4. Вопросы для допуска к работе

1. Какие физические эффекты лежат в основе работы металлического тензорезистора?
2. Как изменяется удельное сопротивление металлов при приложении механической нагрузки?
3. Перечислить температурные погрешности тензорезисторов.
4. Продольная и поперечная чувствительности тензорезистора.
5. Объяснить принцип расчета деформации балки.
6. Какие напряжения возникают на верхней и нижней сторонах балки и на средней линии?
7. Как механические напряжения, испытываемые балкой, передаются тензорезистору?
8. Как повлияет на результат измерения напряжения балки изменения температуры помещения?

### 5. Теоретическое введение

Тензорезисторы – измерительные преобразователи, предназначенные для измерения механических напряжений на поверхностях деталей и конструкций, возникающих под действием механических нагрузок. Под действием измеряемой (входной) физической величины – механического напряжения – меняется их электрическое сопротивление, измеряемое измерительной внешней схемой. Эффект изменения электрического сопротивления твердых тел под действием упругого сжатия или растяжения называется **тензорезистивным эффектом**.

Тензорезисторы могут быть как металлическими, так и полупроводниковыми.

При упругой деформации металлов, например, *сжатии*, изменяется амплитуда тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки вследствие уменьшения расстояния между атомами, *уменьшится и электрическое сопротивление* металла, так как уменьшится взаимодействие электронов – носителей заряда в электрическом токе – с кристаллической решеткой металла.

В случае полупроводников при *сжатии* увеличивается концентрация свободных зарядов, способных участвовать в электрическом токе, что вызвано уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводников и также *уменьшается электрическое сопротивление* образца.

Величина тензорезистивного эффекта полупроводников на два порядка выше, чем у металлов.

Относительное изменение  $\varepsilon_R$  электрического сопротивления тензорезистора при его упругой деформации определяется формулой:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}, \quad (6.1)$$

где  $\Delta R$  – изменение сопротивления;

$R$  – сопротивление тензорезистора до приложенной нагрузки;

$\Delta \rho / \rho$  – относительное изменение удельного электрического сопротивления;

$\Delta l / l = \varepsilon_l$  – относительное удлинение образца;

$\Delta S / S$  – относительные изменения поперечного сечения тензорезистора.

Преобразуем формулу (6.1) к виду:

$$\varepsilon_R = k_T \cdot \varepsilon_l, \quad (6.2)$$

где

$$k_T = \pi_M \cdot E_{Ю} + 1 + 2\mu \quad (6.3)$$

– коэффициент тензочувствительности.

В последнем выражении  $\pi_M$  – тензорезистивный коэффициент металла;  $E_{Ю}$  – модуль упругости металла;  $\mu$  – коэффициент Пуассона ( $\approx 0,3 \div 0,4$ ). Первый член суммы уравнения (6.3) определяется изменением удельного сопротивления, оставшаяся часть – изменением геометрии тела – его длины и поперечного сечения. Для многих металлов  $k_T \approx 2$ , причем доля, обусловленная изменением геометрии образца, составляет  $\sim 80\%$ .

Выражение (6.2) справедливо и для полупроводниковых резисторов, но для них величина  $k_T$  может достигать 100.

## 6. Описание метода измерения характеристик терморезистора

В настоящей лабораторной работе тензодатчики наклеены на две поверхности балочки – верхнюю и нижнюю, закрепленной одним концом консольно и изгибаемой грузиком, подвешиваемым на другом конце, как показано на рис. 6.1. При тщательной приклейке деформации поверхности балочки передаются материалу тензорезистора без ослаблений.

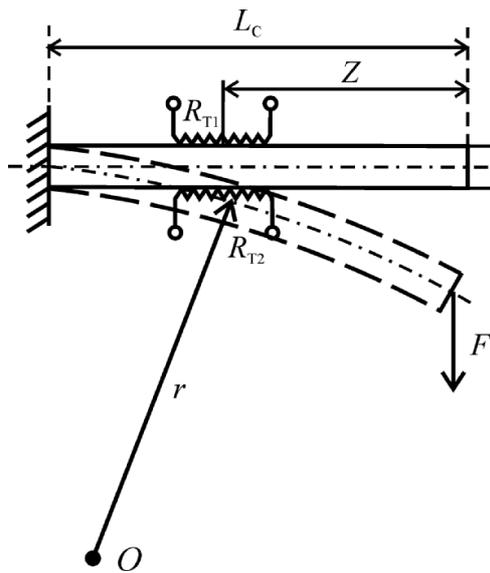


Рис. 6.1. Схема измерений тензоэффекта

Тензорезисторы  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  прикреплены на расстоянии  $Z$  от места приложения изгибающей силы  $F$ . Сечение балочки прямоугольное: высота сечения –  $b$ , ширина –  $a$ . Радиус изгиба балочки в месте расположения тензорезисторов равен  $r$ . Механические напряжения на верхней стороне балочки – растягивающие, на нижней – сжимающие. Их значения численно равны между собой и определяются выражением:

$$\sigma = \frac{6ZF}{ab^2}. \quad (6.4)$$

На средней линии напряжения при изгибе не возникают.

Относительную деформацию поверхности балки с наклеенным тензорезистором можно определить по

закону Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_{Ю}}. \quad (6.5)$$

Подставим в последнее выражение значение  $\sigma$  (6.4), получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{6ZF}{ab^2 E_{Ю}}. \quad (6.6)$$

Для экспериментального определения величины  $\varepsilon_R = \Delta R / R_T$  тензорезистора используется мостовая электрическая схема (рис. 6.2).

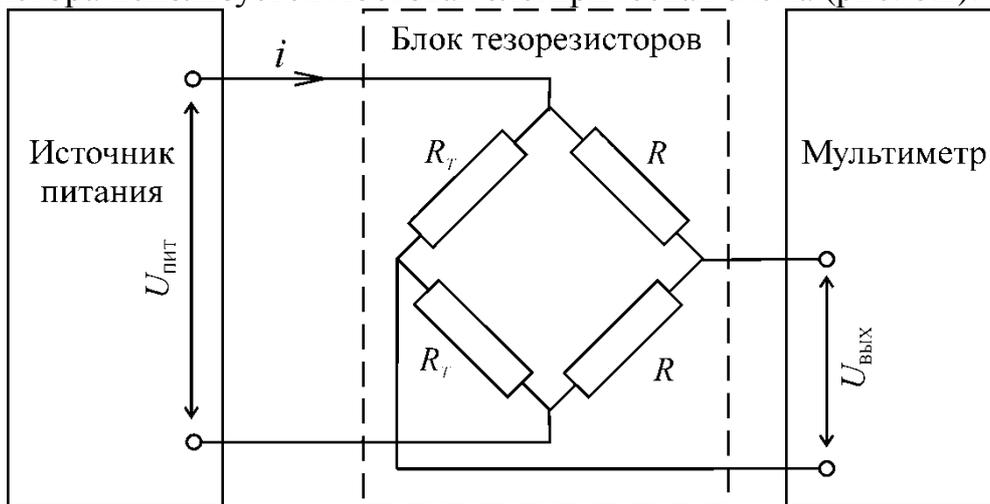


Рис. 6.2. Измерительная мостовая схема

Здесь  $R_T$  (тензорезисторы) и  $R$  (постоянные резисторы) включены в качестве плеч мостовой схемы. К одной диагонали моста подводится напряжение питания  $U_{пит}$ , со второй диагонали снимается выходное

напряжение  $U_{\text{вых}}$ , которое измеряется мультиметром. Для указанной мостовой схемы справедливо выражение:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_R \cdot U_{\text{пит}}, \quad \varepsilon_R = 2U_{\text{вых}} / U_{\text{пит}} \quad (6.7)$$

## 7. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерения по рис. 6.2. Подсоединить источник питания к сети 220 В.
2. Включить источник питания.
3. Измерить  $U_{\text{вых}}$  для 3–5 различных грузиков.
4. Измерить значения  $Z$ ,  $a$ ,  $b$  (рис. 6.1).
5. Рассчитать для каждого грузика по формуле (6.6) значение  $\varepsilon_1$  и значение  $\varepsilon_R$  по формуле (6.7), записать в табл. 6.1.
6. Рассчитать коэффициент тензочувствительности  $K_T$  по формуле (6.3).
7. Измеренные значения и рассчитанные величины занести в табл. 6.1.

Исходные данные для расчетов:  $U_{\text{пит}} = 2 \text{ В}$ ;  $E_{\text{Ю}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .

Таблица 6.1. Результаты измерений и расчетов

№	$m$ , кг	$F$ , Н	$U_{\text{вых}}$ , В	$\varepsilon_R$	$\varepsilon_1$	$k_T = \varepsilon_R / \varepsilon_1$
1						
2						
3						
4						
5						

Найти среднееарифметическое значение  $K_T$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИЗМЕРЕНИЕ РАССЕЯННЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

#### 1. Цель работы

Изучить устройство и функционирование измерительного преобразователя индукционного типа, предназначенного для измерения слабых низкочастотных магнитных полей; исследовать распределение и измерить магнитное поле вблизи проводников с низкочастотным переменным током.

#### 2. Состав лабораторной установки

1. Измерительный преобразователь.
2. Стенд для изучения переменных магнитных полей.

#### 3. Подготовка к выполнению работы

Изучить по лекциям раздел «Использование электромагнитных явлений для измерения физических величин», включая теорию индукционных преобразователей; изучить теоретическую часть настоящего сборника, ответить на вопросы.

1. Особенности магнитного поля, характеризующие его параметры (вектор магнитной индукции в вакууме и в веществе, магнитный поток, напряженность магнитного поля).

2. Характеристика магнитного поля, создаваемого проводниками с током.

3. Закон полного тока для магнитного поля.

4. Закон электромагнитной индукции.

5. Принцип работы индукционных преобразователей.

6. Зависимость переменного тока в катушке индукционного преобразователя от индукции измеряемого переменного магнитного поля и его частоты.

7. Распределение индукции магнитного поля проводника с током; экранирование поля проводника.

8. Охарактеризовать исследуемые на измерительном стенде объекты.

9. Устройство измерительного преобразователя переменного магнитного поля и объяснение его работы.

10. Особенности калибровки чувствительности измерительного преобразователя.

#### 4. Теоретическая часть

##### *Индукционное измерение полей*

В настоящей работе для измерения низкочастотных магнитных полей, существующих всегда в пространстве вблизи проводников с переменным током (например, вблизи сетевой проводки в квартирах), используется индукционный преобразователь.

Чувствительной частью индукционного преобразователя является измерительная катушка, содержащая несколько тысяч витков тонкого провода. Под действием измеряемого внешнего переменного магнитного поля в катушке, в соответствии с законом Фарадея – Ленца, наводится ЭДС; к концам катушки подсоединяется устройство для усиления и индикации этой ЭДС, пропорциональной внешнему электромагнитному полю.

Формула закона Фарадея – Ленца следующая:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (7.1)$$

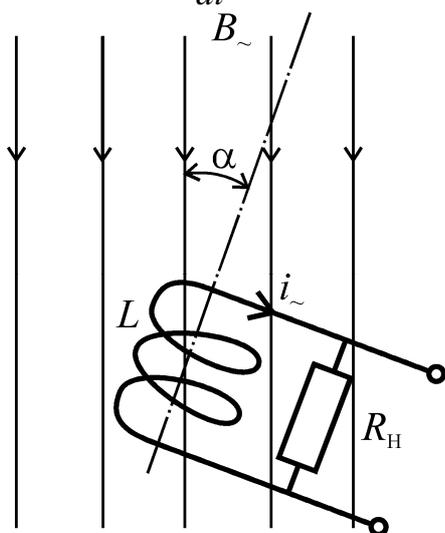


Рис. 7.1. Измерение индукции переменного магнитного поля индукционным преобразователем

где  $\varepsilon$  – электродвижущая сила, возникающая в витке из проволоки или в катушке, когда в области, охватываемой катушкой, возникнет переменный магнитный поток;

$\psi$  – потокосцепление всех витков катушки с измеряемым магнитным полем.

На рис. 7.1 показано расположение катушки в переменном измеряемом магнитном поле с индукцией  $B_0 = B_0 \cos \omega t$ , где  $\omega$  – круговая частота поля. Ось катушки образует с направлением поля угол  $\alpha$ , поэтому:

$$\psi = B_0 \cdot S \cdot \cos \alpha = B_0 \cdot S \cdot \cos \alpha \cos \omega t, \quad (7.2)$$

где  $S$  – суммарная площадь, охватываемая всеми витками катушки.

В катушке возникнет ЭДС:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B_0 S \cos \alpha \cos \omega t) = B_0 S \omega \cos \alpha \sin \omega t. \quad (7.3)$$

В измерительной цепи катушки проходит переменный ток  $i_{\sim}$ :

$$i_{\sim} = \varepsilon / Z, \quad (7.4)$$

где  $Z = R_H + \omega L$  – полное сопротивление измерительной цепи, являющегося суммой омического  $R_H$  и индуктивного  $\omega L$  сопротивлений цепи. Здесь  $L$  – индуктивность катушки.

Подставим все известные величины в (7.4), получим:

$$i_0 = \frac{\varepsilon}{R_H + \omega L} = \frac{B_0 S \cdot \omega \cdot \cos \alpha}{R_H + \omega L} \cdot \sin \omega t = i_0 \sin \omega t, \quad (7.5)$$

Амплитуда  $i_0$  переменного тока в цепи, как видно из (7.5), равна:

$$i_0 = \frac{B_0 S \omega \cos \alpha}{R_H + \omega L}, \quad (7.6)$$

Мы видим, что амплитуда тока, являющегося выходным сигналом измерительного преобразователя, зависит от частоты измеряемого магнитного поля. Эту зависимость можно исключить, если для знаменателя принять условие:

$$R_H \ll \omega L. \quad (7.7)$$

Тогда после сокращений вместо (7.6) получим:

$$i_0 = \frac{B_0 S}{L} \cos \alpha. \quad (7.8)$$

Из (7.8) видно, что, если поворачивать измерительную катушку при измерениях, изменяя угол  $\alpha$ , то можно найти направление силовых линий магнитного поля в точке расположения катушки – при совпадении направления оси катушки с силовой линией  $\alpha = 0$ , и амплитуда тока максимальна. При таком положении катушки амплитуда тока является мерой амплитуды индукции измеряемого поля.

Измерительная катушка позволяет, таким образом, как измерять значение, так и определять направление индукции магнитного поля.

Для увеличения чувствительности преобразователя к направлению силовых линий поля, часто катушку снабжают сердечником из магнитомягкого материала с большой величиной магнитной проницаемости  $\mu$ , играющего роль «магнитной антенны». В качестве материала выбирают феррит, который являясь диэлектриком, лишен потерь на токи Фуко при перемагничиваниях сердечника в быстропеременных магнитных полях.

### **Характеристика рассеянных магнитных полей**

Измерительный индукционный преобразователь может быть применен для измерения магнитных полей, окружающих проводники с переменным током. Такие магнитные поля можно назвать полями рассеяния.

Бесконечно длинный прямолинейный проводник с током  $i$  создает вблизи себя в немагнитной среде магнитное поле, индукция  $B$  которого равна:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}, \quad (7.9)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  А/м – магнитная постоянная;  $r$  – расстояние от проводника до точки  $A$  измерения поля.

Вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к силовой линии поля, которая, в случае прямолинейности проводника, имеет форму окружности с центром в проводнике (рис 7.2).

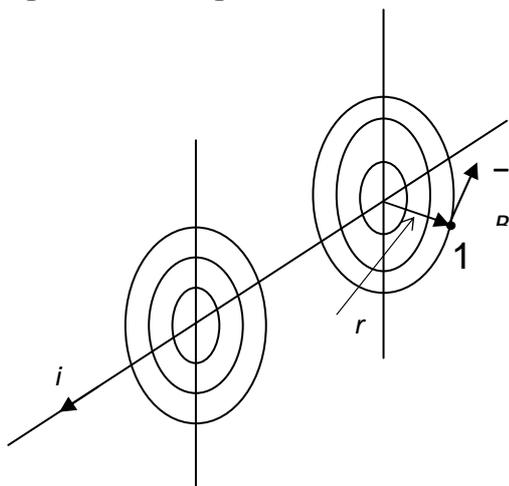


Рис. 7.2. Магнитное поле проводника с током

Для измерения индукции в точку  $A$  необходимо поместить измерительную катушку так, чтобы ее сердечник своей осью симметрии был направлен по касательной к силовой линии поля. В этом случае ток, индуцированный переменным магнитным полем в катушке, будет наибольшим среди всех возможных положений катушки и покажет значение индукции  $B$  в точке  $A$ . Если катушку поворачивать в плоскости, перпендикулярной проводнику, то можно найти такое ее положение, что ток в ней будет минимально-возможным, при этом ось катушки укажет на проводник с током.

Иногда, для уменьшения воздействия магнитных полей проводников с током на другие приборы, прибегают к экранированию приборов.

Рассмотрим возможность исключения таких магнитных полей путем размещения самого проводника с током  $i$  в ферромагнитном экране-трубе (рис. 7.3). Проведем в пространстве снаружи трубы воображаемый кольцевой контур по форме магнитной силовой линии, т. е. окружности с центром на оси провода.

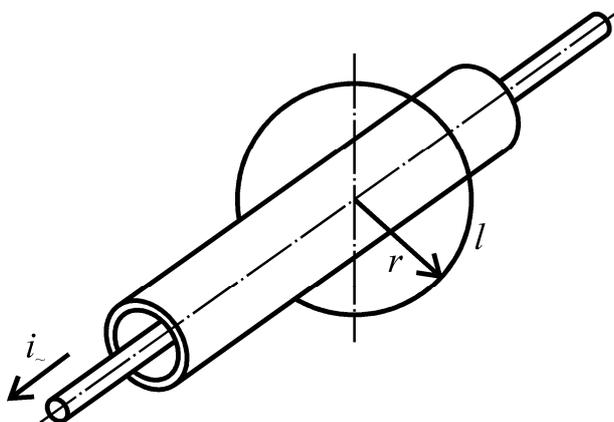


Рис. 7.3. К выяснению возможности экранирования магнитного поля проводников с током

Циркуляция вектора магнитной индукции по этому контуру равна полному току, охватываемому этим контуром, умноженному на магнитную постоянную:

$$\oint B_l \cdot dl = 2\pi r B, \quad (7.10)$$

где  $B_l = B$  – проекция вектора  $\vec{B}$  на линию контура.

По теореме о циркуляции вектора магнитной индукции, известной из курса физики, циркуляция по контуру, окружающему ток, равна:

$$B_l \oint dl = \mu_0 \sum i. \quad (7.11)$$

Сравнивая (7.10) и (7.11) и,

учитывая, что  $\sum i = i$ , получим:

$$B_l = B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

– обычную формулу для индукции магнитного поля тока.

Это значит, что наличие железной трубы, надетой на проводник с током, не изменяет магнитного поля тока в окружающем трубу пространстве, не экранирует внешнее пространство от магнитного поля тока.

### 5. Стенд для измерения рассеянных полей

В настоящей лабораторной работе измеряется переменное магнитное поле трех объектов (рис. 7.4):

*A* – проводник с током в железной трубе (переключатель  $\Pi_p$  в положении 1);

*B* – одиночный проводник с током (переключатель  $\Pi_p$  в положении 1);

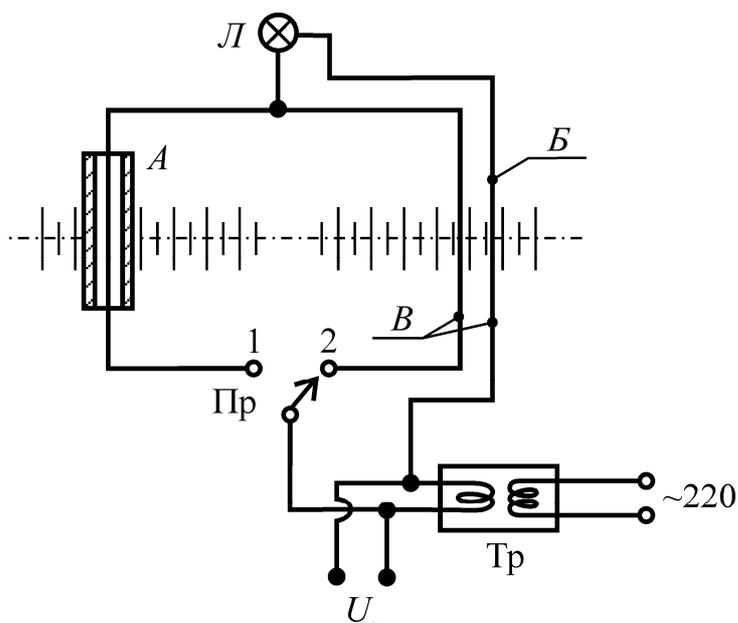


Рис. 7.4. Схема стенда измерений магнитного поля токов

$B$  – два параллельных проводника с противоположными направлениями токов, размещенные без зазора (переключатель  $\text{Pr}$  в положении 2).

Источником токов является понижающий трансформатор  $\text{T}_p$ , потребитель электрической энергии – лампа накаливания  $L$ . С помощью переключателя  $\text{Pr}$  переменный ток поочередно пропускается через исследуемые объекты.

Напряжение  $U_{\sim}$  со второй обмотки трансформатора  $\text{T}_p$  используется для калибровки чувствительности измерительного преобразователя.

### 6. Измерительный преобразователь

Блок-схема преобразователя показана на рис. 7.5.

В немагнитном корпусе помещены: измерительная и калибровочная катушки, закрепленные на общем ферритовом стержне, играющем роль магнитной антенны для рассеянных магнитных полей; усилитель; в качестве индикатора применен мультиметр. Измерительная катушка своими выводными концами подсоединена ко входу усилителя. Усиленный сигнал  $U_{\text{сигн}}$  измеряется мультиметром. Калибровочная катушка присоединена к клеммам  $U_{\sim}$ , на которые при калибровке подается переменное напряжение от измерительного стенда. Усилитель имеет батарейное питание, включаемое переключателем «Вкл.» и имеет два режима работы. При нажатии кнопки на боковой стороне корпуса преобразователя его коэффициент усиления увеличивается примерно в 10 раз по сравнению с состоянием, когда кнопка не нажата.

Для калибровки чувствительности измерительного преобразователя к магнитным полям, в магнитной антенне перед измерениями необходимо создать магнитное переменное поле известной величины  $B_{\text{кал}}$  и измерить величину выходного сигнала  $U_{\text{кал}}$  преобразователя. Отношение этих величин является чувствительностью  $S$  измерительного преобразователя:

$$S = \frac{U_{\text{кал}}}{B_{\text{кал}}} \text{ В/Тл.} \quad (7.12)$$

Калибровочное магнитное поле в воздухе, создаваемое калибровочной катушкой, намотанной поверх измерительной (рис. 7.5), с током  $i_{\text{калибр.}}$ , можно рассчитать по формуле индукции в короткой катушке:

$$B_{\text{кал}} = i_{\text{калибр.}} \cdot \frac{N}{2\pi r_0} \cdot \mu_0, \quad (7.13)$$

где  $N$  – число витков в калибровочной катушке;  $r_0$  – ее радиус.

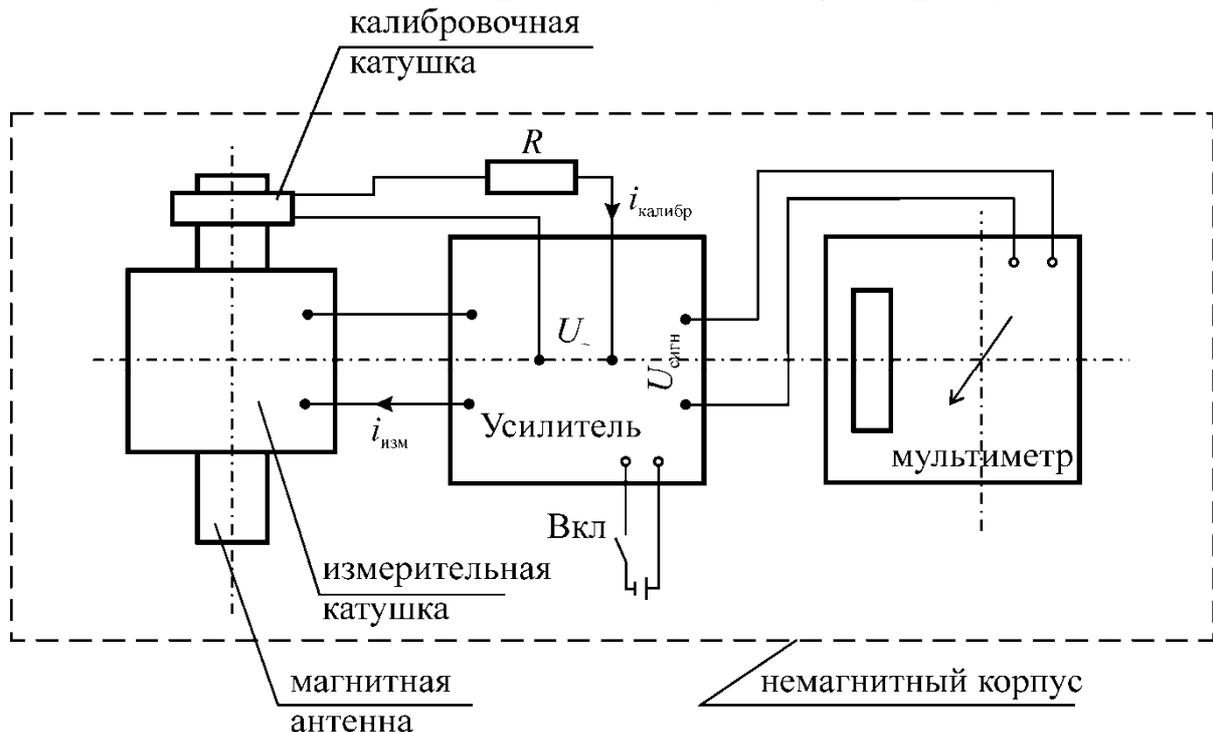


Рис. 7.5. Блок-схема измерительного преобразователя переменного магнитного поля

В формулах (7.11) и (7.13) под  $B_{\text{кал}}$  понимается индукция магнитного поля в воздушной среде без учета магнитной проницаемости вещества антенны.

Напряжение питания  $U_-$  (рис. 7.5) калибровочной катушки необходимо подать на время калибровки с клемм  $U_-$  стенда измерений (см. рис. 7.4).

При измерениях рассеянного магнитного поля напряжение  $U_-$  калибровки отключить, поместить магнитную антенну измерительного преобразователя в нужную точку пространства и, поворачивая антенну, найти ее положение, при котором напряжение сигнала  $U_{\text{сигн}}$  на выходе преобразователя максимально. Индукция  $B$  магнитного поля в этой точке пространства вычисляется по формуле:

$$B = \frac{U_{\text{сигн.}}}{S}. \quad (7.14)$$

Помещая измерительный преобразователь на разных удалениях от проводника с током, можно исследовать распределение магнитного поля проводника.

## 7. Порядок выполнения лабораторной работы

### Калибровка чувствительности измерительного преобразователя

1. Расположить преобразователь вдали от источников переменного поля. Включить преобразователь тумблером *Вкл.* Тумблер  $U-H$ , не показанный на схеме, должен быть в положении  $U$ . Установить переключатель рода работы мультиметра в положение DCV 2 000 mV (2 000 mV). Убедиться, что показания мультиметра не превышают  $0,5 \div 1,0$  mV.
2. Соединить клеммы  $U_-$  измерительного преобразователя с такими же клеммами измерительного стенда парой проводов.
3. Включить измерительный стенд в сеть 220 В. Должна загореться лампочка на стенде.
4. Показания  $U_{\text{кал}}$  мультиметра записать.
5. Вычислить по формуле (7.13) калибровочное значение индукции  $B_{\text{кал}}$ , считая  $N = 5$ ,  $r_0 = 2 \cdot 10^{-2}$  м.,  $i_{\text{калибр.}} = 20 \cdot 10^{-3}$  А.
6. Вычислить по формуле (7.11) чувствительность  $S$  преобразователя.

### Исследование рассеянных магнитных полей

1. Отсоединить используемые при калибровке провода от клемм  $U_-$ .
2. Переключателем стенда включить ток через объект  $A$ .
3. Устанавливая датчик преобразователя (катушку с магнитной антенной) на разных расстояниях от объекта  $A$  (рис. 7.4), записать в табл. 7.1 значения расстояния  $r$  и соответствующие значения сигнала  $U_c$  (показания мультиметра).
4. Добиваться поворотами датчика, чтобы значения сигнала были наибольшими при данном расстоянии  $r$ . В диапазоне расстояний 5–50 см. провести измерения в 5–6 точках.

Таблица 7.1. Результаты измерений и расчетов

№	$S$ , В/Тл	$r$ , м	$U_{\text{сигн}}$ , В	$B$ , Тл	$i$ , А
1					
2					
3					

5. Рассчитать по формуле (7.14) значения индукции  $B$  в каждой точке и также занести в табл. 7.1.
6. Повторить замеры для объектов  $B$  и  $B$  на стенде, устанавливая переключатель  $П_p$  на стенде в соответствующее положение. Данные занести в аналогичные таблицы для объектов  $B$  и  $B$ .
7. Построить графики зависимостей  $B = f(r)$  (зависимости индукции магнитного поля проводников с током от расстояния до проводника)
8. Вычислить для объекта  $B$  величину тока в проводнике по данным для каждого расстояния  $r$ , руководствуясь формулой (7.9).
9. Сделать выводы о влиянии железного экрана и наличия двух противоположно направленных токов в соседних проводниках на величину и распределения рассеянных магнитных полей этих токов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ВИХРЕТОКОВЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 1. Цель работы

Изучить физические основы измерительных вихретоковых преобразователей, освоить метод бесконтактного контроля толщины тонких проводящих слоев с помощью таких преобразователей.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Высокочастотный генератор с возбуждающей катушкой.
2. Приемная катушка с детектором.
3. Образцы тонкопленочных металлических покрытий.

### 3. Подготовка к работе

По лекциям и настоящему сборнику изучить вопросы физических основ электромагнитных измерений физических величин.

1. Взаимодействие электромагнитного поля с проводящими материалами.
2. Глубина проникновения электромагнитного поля в ферромагнитные и немагнитные металлы.
3. Условия возникновения токов Фуко.
4. Возбуждение и измерения электромагнитных полей в вихретоковых преобразователях.
5. Измерение толщины тонких проводящих пленок с помощью вихретоковых преобразователей.
6. Влияние проводящих объектов на параметры возбуждающей электромагнитное поле катушки.

### 4. Краткая теория вихретоковых преобразователей

В преобразователях используется эффект возникновения в металлах, находящихся под воздействием электромагнитного поля, вихревых переменных электрических токов. В результате поле, проходя через слой металла, ослабляется; кроме того изменяется индуктивность и добротность катушек, возбуждающих поле, при их приближении к поверхности металла.

Основным элементом датчика такого типа является возбуждающая катушка, питаемая от специального генератора током высокой частоты. Ток в катушке вызывает в окружающем пространстве переменное магнитное поле, силовые линии которого изображены на рис. 8.1.

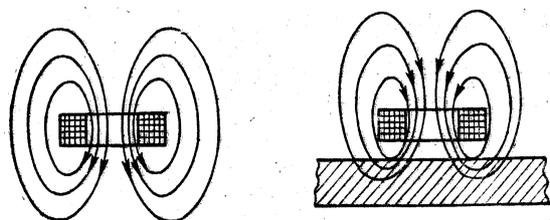


Рис. 8.1. Искажение картины переменного магнитного поля катушки вблизи проводника

Переменное магнитное поле, в свою очередь, создает в пространстве переменное вихревое электрическое поле, линии напряженности которого можно условно представить в виде кольцевых линий, окружающих каждую силовую линию магнитного поля. В момент включения электромагнитное поле проникает внутрь проводящего объекта, и свободные электроны проводника (электроны электронного

газа) ускоряются электрическим полем, двигаясь против направления поля. В проводнике возникают быстропеременные электрические токи – токи Фуко. Эти токи создают в окружающем пространстве, в том числе и вне проводящего объекта собственное магнитное поле, индукция которого по правилу Ленца направлена навстречу первичному магнитному полю катушки. Токи как бы стремятся компенсировать причину, вызывающую их появление. Таким образом, наведенное в проводнике магнитное поле уменьшает результирующий магнитный поток возбуждающей катушки. Магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый током катушки, равен:

$$\Phi = L \cdot i, \quad (8.1)$$

здесь  $L$  – индуктивность катушки;

$i$  – ток в катушке.

Из уравнения (1) можно понять, что уменьшение магнитного потока  $\Phi$  эквивалентно уменьшению индуктивности  $L$  катушки. Иначе говоря, близость катушки к проводящей поверхности уменьшает индуктивность катушки, а наличие свободных электронов в проводящей среде уменьшает проникновение электромагнитного поля катушки в среду. Наведенные в проводящей среде электрические токи испытывают действие сопротивления, и по закону Джоуля-Ленца, в среде выделяется тепловая энергия:

$$W = \gamma \cdot E^2, \quad (8.2)$$

где  $W$  – плотность тепловыделения в среде;

$\gamma$  – удельная проводимость среды;

$E$  – напряженность электрического поля в среде.

Наличие в среде электрического сопротивления наведенному току приводит к потерям высокочастотной электромагнитной энергии катушки, нагреванию проводящей среды и увеличению проникновения поля катушки в среду.

Предполагается, что вся совокупность токов Фуко локализована в поверхностном слое проводящей среды, толщина которого примерно в три раза больше толщины  $\delta$  скин-слоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \quad (8.3)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота поля;

$\mu$  и  $\gamma$  – магнитная проницаемость и удельная электропроводность среды;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

На расстоянии от поверхности, равном толщине скин-слоя, электромагнитное поле ослабевает в  $e$  раз ( $e \approx 2,7$ ). Проходя в среде расстояние  $x$ , электромагнитное поле волны ослабляется по экспоненциальному закону (рис. 8.2б). Относительное изменение амплитуды волны в среде выражается формулой:

$$A/A_0 = e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (8.4)$$

где  $A_0$  – амплитуда падающей на среду волны;

$A$  – амплитуда волны, прошедшей расстояние  $x$ .

Ослабление электромагнитной волны в среде можно использовать для измерения толщины тонких слоев металла (рис. 8.2а). Измерив величину ЭДС, наведенную прошедшей волной в катушке, установленной по другую сторону измеряемого слоя металла толщиной  $d$ , можно судить об амплитуде прошедшей волны.

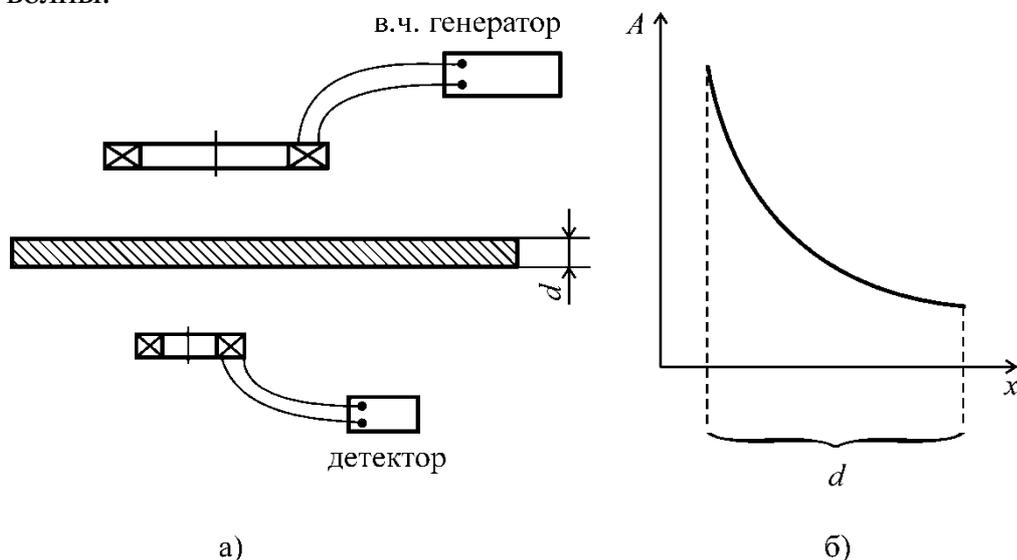


Рис. 8.2. Схема измерения толщины слоя металла

Измерив отношение  $A / A_0$  и зная круговую частоту  $\omega$  волны и параметры  $\mu$  и  $\gamma$  вещества, по уравнению (8.4) можно рассчитать толщину  $d$ . Прологарифмируем (8.4) и получим:

$$d = \delta \ln \frac{A}{A_0}. \quad (8.5)$$

## 5. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку в соответствии со схемой (рис. 8.3).

В зависимости от величины сигнала установить мультиметр в положение переключателя рода работы «200 мВ» или «2 000 мВ». (Пластины предоставляет преподаватель.)

2. Удалить из промежутка между катушками пластину 5 с пленкой металла, нажать кнопку 3 и измерить с помощью мультиметра амплитуду  $A_0$  излучаемой возбуждающей катушкой электромагнитной волны. Отпустить кнопку.

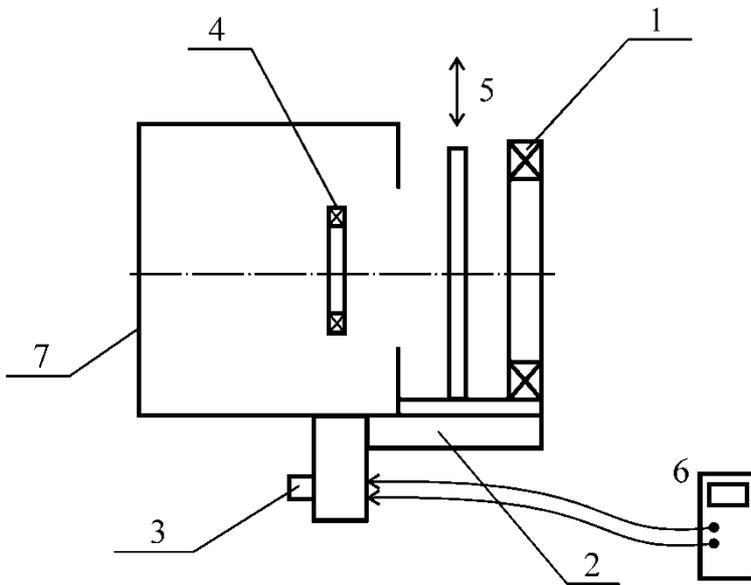


Рис. 8.3. Схема установки:

1 – возбуждающая катушка; 2 – высокочастотный генератор; 3 – кнопка включения генератора; 4 – приемная катушка; 5 – пластинка с измеряемой пленкой металла; 6 – мультиметр; 7 – экранирующий корпус

3. Вставить пластину в промежуток, провести с помощью мультиметра измерение амплитуды  $A$  прошедшей сквозь пластину волны.

4. Повторить замеры с другими пластинами, имеющими слой металла другой толщины.

5. Занести полученные результаты в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Измеренные и рассчитанные величины

№	$A_0$ , мВ	$A$ , мВ	$\ln \frac{A}{A_0}$	$\delta$ , м	$d$ , м

Провести расчеты толщины скин-слоя  $\delta$  по формуле (8.3) и толщины  $d$  металлических слоев на всех пластинах по формуле (8.5), занести результаты в табл. 8.1.

При расчетах использовать следующие данные:

частота генератора  $f = 125$  кГц;

для меди  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 6,45 \cdot 10^7$  1/(Ом·м);

для алюминия  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 4 \cdot 10^7$  1/(Ом·м).

6. Построить график зависимости  $A = f(d)$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

#### 1. Цель работы

Изучить основы теории эффекта Доплера для электромагнитных волн и его применения при дистанционном измерении скоростей тел; изучить лабораторный прибор для измерения скорости тел.

#### 2. Приборы и принадлежности

1. Генератор сантиметровых волн на диоде Ганна.
2. Маятник с отражателем.
3. Блок питания генератора.
4. Осциллограф.

#### 3. Подготовка к работе

1. По лекциям и теоретическому разделу описания настоящей лабораторной работы:

- изучить краткую теорию эффекта Доплера для электромагнитных волн;
- изучить краткую теорию работы генераторов сантиметровых электромагнитных волн – диодов Ганна.

2. Изучить устройство и принцип работы лабораторного прибора по дистанционному измерению скорости движущихся тел.

#### 4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Доплера?
2. Дать физическое объяснение эффекта изменения частоты при относительном перемещении излучателя и приемника.
3. Объяснить устройство и функционирование генератора сантиметровых электромагнитных волн.
4. Принцип возбуждения колебаний в диоде Ганна.
5. Объяснить работу лабораторной установки измерения скорости перемещения тел.

6. Как с помощью осциллографа измерить частоту переменного сигнала?

#### 5. Теоретический раздел

##### *Эффект Доплера*

Эффект Доплера заключается в изменении частоты волн, воспринимаемых приемником волн, при относительном движении источника и приемника волн.

Если приемник и излучатель волн неподвижны друг относительно друга, то приемник воспринимает приходящие от источника волны без искажения, их частота точно соответствует частоте излучаемых волн.

Рассмотрим причины изменения частоты принимаемых волн, возникающего при движении или приемника, или излучателя, или при их относительном одновременном движении.

Пусть приемник движется по направлению к излучателю. Тогда на его вход колебания волн будут поступать чаще, чем если бы приемник был неподвижен. Если излучатель движется к приемнику, то он движется вслед за испускаемыми волнами, успевает за время периода колебания переместиться на часть расстояния, проходимого волной за период колебания; длина волны,

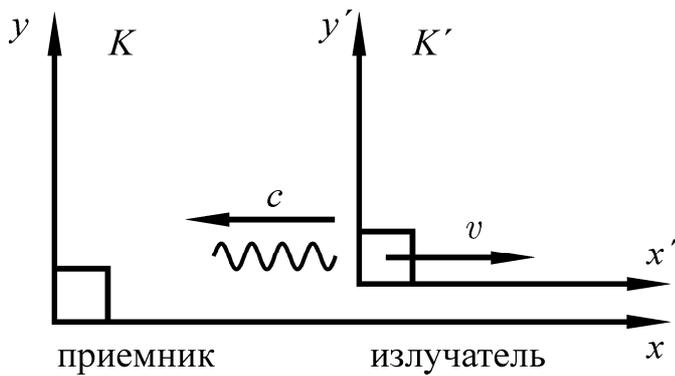


Рис. 9.1. К объяснению эффекта Доплера

электромагнитную волну, уравнение которой в системе  $K'$  имеет вид:

$$E' = A' \cos \left[ \omega' \left( t' + \frac{x'}{c} \right) + \alpha' \right], \quad (9.1)$$

где  $\omega'$  – круговая частота волны, наблюдаемой в системе, связанной с источником, то есть частота источника;

$c$  – фазовая скорость распространения электромагнитной волны (скорость света).

Согласно принципу относительности, законы природы имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах. Поэтому в системе  $K$  та же волна описывается похожим уравнением:

$$E = A \cos \left[ \omega \left( t + \frac{x}{c} \right) + \alpha \right], \quad (9.2)$$

где  $\omega$  – частота, регистрируемая в системе  $K$ , то есть частота, воспринимаемая приемником;  $c$  – скорость света, которая во всех инерциальных системах отсчета одинакова.

Будем рассматривать случай, когда скорость  $v$  движения излучателя мала в сравнении со скоростью света:

$$v \ll c.$$

При этом условии время течет в обеих системах одинаково:

$$t = t',$$

а координату  $x'$  можно найти, зная скорость  $v$  движения системы  $K'$ :

$$x' = x - vt.$$

Подставим эти величины в (9.1), получим:

$$E' = A' \cos \left[ \omega' \left( t + \frac{x - vt}{c} \right) + \alpha' \right]. \quad (9.3)$$

После преобразований получим:

$$E' = A' \cos \left[ \omega' \cdot \left( 1 - \frac{v}{c} \right) \left( t + \frac{x}{c} \right) + \alpha' \right]. \quad (9.4)$$

Уравнения (9.2) и (9.4) описывают одну и ту же волну, поэтому справедливы соотношения:

испускаемой источником, оказывается меньше, чем если бы он был неподвижен.

На рис. 9.1 излучатель находится в начале координат инерциальной системы  $K'$ , которая движется от приемника со скоростью  $v$ , а приемник находится в начале координат инерциальной системы  $K$ .

Источник испускает в сторону приемника

$$\omega = \omega' \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (9.5)$$

Учитывая, что  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega' = 2\pi f'$ , запишем:

$$f = f' \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (9.6)$$

Разница частот  $\Delta f$  излучателя и воспринимаемый приемником доплеровский сдвиг частот:

$$\Delta f = f - f'.$$

Используя (9.6), получим:

$$\Delta f = -f \cdot \frac{v}{c},$$

здесь  $f$  и  $f'$  – частоты, принимаемые приемником и излучаемые источником,  $v$  – скорость относительного перемещения источника и приемника по линии, их соединяющей, знак (–) означает удаление приемника и источника друг от друга.

В нашей лабораторной работе источник и приемник волн находятся в одной системе координат, неподвижны; измеряется скорость  $v$  движущегося тела по электромагнитным волнам, отраженным от него; поэтому доплеровский сдвиг частот  $\Delta f$  в уравнении (9.6) удваивается:

$$\Omega = 2\Delta f = \left|2f \cdot \frac{v}{c}\right|. \quad (9.7)$$

Частота  $\Omega$  является доплеровской частотой для случая неподвижных излучателя и приемника и перемещаемого объекта и измеряется с помощью приемника излучения, который сравнивает испускаемую и принимаемую волны, выделяет колебания доплеровской частоты и формирует электрический сигнал в форме электрического колебания с частотой  $\Omega$ ; частота  $\Omega$  измеряется с помощью осциллографа.

### ***Работа генератора сантиметровых радиоволн***

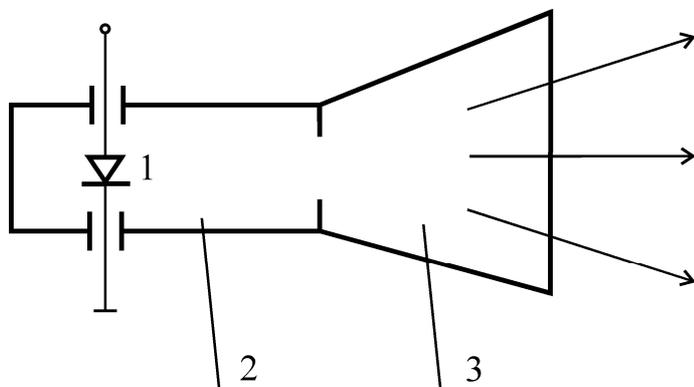


Рис. 9.2. Схематическое устройство генератора сантиметровых волн на основе диода Ганна

Генератор сантиметровых волн, примененный в лабораторной работе в качестве излучателя, использует в качестве излучающего элемента двухэлектродный полупроводниковый прибор – диод Ганна 1, помещенный в объемный резонатор 2 электромагнитных колебаний (рис. 9.2).

При подаче на диод 1 постоянного напряжения, в нем самопроизвольно возникают

пульсации электрического тока, под действием которых в резонаторе 2 возникают электромагнитные колебания на той частоте, на которую настроен резонатор. В окружающее пространство электромагнитные волны излучаются с помощью рупорной антенны 3 в виде направленного пучка излучения.

Диод Ганна – это двухэлектродный полупроводниковый прибор без р-п-перехода. Основным элементом диода – диск толщиной в несколько микрон и диаметром до 100 мкм, вырезанный из монокристалла арсенида галлия ( $GaAs$ ). На противоположные стороны диска наносят металлические контакты для соединения с внешней электрической цепью.

Диод Ганна имеет внутреннее отрицательное дифференциальное сопротивление, что позволяет ему при подаче постоянного питающего напряжения возбуждать в резонаторе электромагнитные колебания. Частота колебаний определяется размерами резонатора: его длина близка к половине длины волны излучения.

### Схематическое описание лабораторной установки

Для исследования эффекта Доплера в данной работе собирается следующая схема прибора (рис. 9.3).

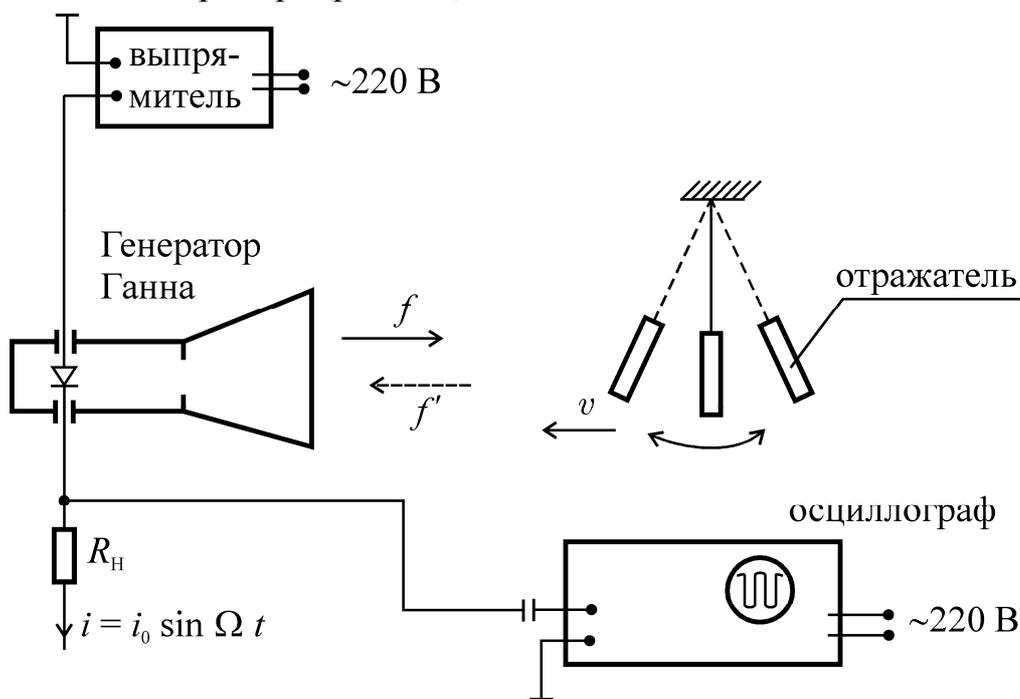


Рис. 9.3. Схема лабораторного прибора для исследования эффекта Доплера для электромагнитных волн

Электромагнитные волны с частотой  $f$ , излучаемые рупорной антенной, попадают на металлический отражатель, закрепленный в маятниковом устройстве и совершающий колебательные перемещения по направлению к рупору и от него с некоторой линейной скоростью  $v$ . Отраженные волны с частотой  $f'$  частично возвращаются в рупор и попадают в объемный резонатор, наводя на электродах диода Ганна свое, дополнительное переменное

напряжение с частотой отраженных волн. В цепи питания диода возникает переменный ток с частотой  $\Omega$ :

$$\Omega = f' - f. \quad (9.8)$$

На резисторе  $R_n$  возникает переменное электрическое напряжение с частотой  $\Omega$ , величина которого измеряется осциллографом. Значение частоты и является мерой скорости движения отражателя.

Для измерения частоты переменного сигнала с помощью осциллографа необходимо определить по картине на экране осциллографа длительность периода  $T$  изучаемого колебания и вычислить частоту по формуле:

$$\Omega = 1/T, \quad (9.9)$$

затем вычислить скорость  $v$  отражателя по уравнению (9.7).

В ходе лабораторной работы скорость  $v$  отражателя также определяется по характеру движения маятника, на котором он закреплен, и эти два значения скорости сравниваются.

### 6. Порядок выполнения работы

1. Собрать на лабораторном столе установку по рис. 9.3. Включить в сеть 220 В осциллограф и подготовить его к работе: провести настройку по указаниям преподавателя. Включить в сеть 220 В выпрямитель. Убедиться, что при качаниях металлического отражателя на экране осциллографа возникает картина колебаний.

2. Сообщить металлическому отражателю колебания с амплитудой  $A_1 = 5$  см и  $A_2 = 10$  см. Измерить по экрану осциллографа периоды  $T_1$  и  $T_2$  колебаний переменного сигнала. Занести результаты измерений в табл. 9.1.

3. Измерить с помощью секундомера и занести в табл. 9.1 периоды колебаний  $T_M$  маятника с отражателем при амплитудах  $A_1$  и  $A_2$ .

Таблица 9.1. Измеренные и вычисленные результаты

№	$A$ , м	$T$ , с	$\Omega$ , Гц	$v$ , м/с	$T_M$ , с	$v_{M0}$ , м/с
1						
2						

4. Вычислить по формуле (9.7) скорость  $v$  отражателя для обеих амплитуд  $A$ , считая  $f = 10^{10}$  Гц = 10 ГГц, занести результаты в табл. 9.1.

5. Определить линейную скорость перемещения отражателя, исходя из законов его механического движения. Приблизительно можно считать движение отражателя при прохождении маятником нижней точки колебаний прямолинейным, закон его отклонения от равновесного положения примем колебательным гармоническим:

$$x = A \cos \omega_M t,$$

где  $\omega_M$  – круговая частота колебаний маятника;

$x$  – отклонение отражателя от положения равновесия.

Скорость отражателя определим дифференцированием последнего уравнения:

$$v_M = \frac{dx}{dt} = -A\omega_M \sin \omega t.$$

Амплитуда скорости  $v_{MO}$  равна:

$$v_{MO} = A\omega_M = \frac{2\pi A}{T_M}, \quad (9.10)$$

где  $T_M$  – период колебаний маятника.

Вычислить по уравнению (9.10) значения скорости отражателя, результаты занести в табл. 9.1.

6. Сравнить значения скорости отражателя, полученные обоими методами.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

### 1. Цель работы

1. Изучить принципы оптической пирометрии.
2. Изучить устройство яркостного оптического пирометра.
3. Экспериментально исследовать зависимость действительной и яркостной температур нити накала осветительной лампы от подводимой электрической мощности и определить коэффициент черноты нити накала.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Оптический пирометр ОППИР-017.
2. Лампа накаливания.
3. Блок питания лампы и пирометра.
4. Схема измерения тока и напряжения питания лампы.

### 3. Подготовка к работе

По лекциям изучить следующие вопросы курса и ответить на контрольные вопросы.

1. Назначение, принципы действия и виды оптических пирометров: радиационных, яркостных.
2. Устройство пирометра с исчезающей нитью. Несоответствие яркостной температуры реальных тел их истинной температуре.

### Контрольные вопросы

1. Охарактеризовать спектр теплового излучения абсолютно черного тела; график зависимости излучательности от частоты для двух температур тела.
2. Охарактеризовать спектр теплового излучения реального тела.
3. Дать понятие интегральной излучательности.
4. Дать понятие спектральной излучательности.
5. Описать принцип действия яркостного пирометра с исчезающей нитью.
6. Описать принцип действия радиационного пирометра.
7. Почему яркостная и действительная температуры реального тела не равны между собой?
8. Что такое яркостная температура тела?

### 4. Теоретическое введение

Оптическая пирометрия – это методы дистанционного измерения температуры тел, основанные на использовании законов теплового излучения.

Нагретое тело преобразует часть своей внутренней тепловой энергии в лучистую энергию, энергию электромагнитного излучения.

В соответствии с законом Стефана – Больцмана, с каждой единицы поверхности абсолютно-черного тела в единицу времени излучается энергия:

$$R_T^\circ = \sigma T^4, \quad (10.1)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  – постоянная величина, коэффициент Стефана – Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура тела.

Величина  $R_T^\circ$  называется интегральной излучательностью абсолютно черного тела.

Тепловое излучение реальных тел отличается тем, что их интегральная излучательность составляет долю  $\varepsilon_T$  излучательности абсолютно черного тела ( $\varepsilon_T \leq 1$ ), и закон Стефана – Больцмана для реального тела имеет вид:

$$R_T = \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (10.2)$$

где  $\varepsilon_T$  – коэффициент черноты.

Другая особенность реальных тел – их коэффициент черноты зависит от длины волны излучения. Реальные тела, таким образом, нельзя называть серыми, так как серые тела – такие, коэффициент черноты которых  $\varepsilon_T$  не зависит от длины волны, на всех длинах волн имеет одно значение, меньшее единицы.

Интенсивность излучения абсолютно-черного тела, имеющего некоторую температуру  $T$ , на разных длинах волн разная. Аналитическое выражение функции распределения излучения абсолютно-черного тела по длинам волн получил Планк.

Функция имеет вид:

$$R_{\lambda T}^\circ = \frac{2\pi c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (10.3)$$

где  $R_{\lambda T}^\circ$  – спектральная излучательность абсолютно-черного тела;

$c$  – скорость света;

$h$  – постоянная Планка;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$k$  – постоянная Больцмана.

Спектральная излучательность – это энергия, излучаемая телом с единицы поверхности тела в единицу времени в единичной полосе частот.

Для определения интегральной излучательности тела в полосе  $\Delta\lambda$  длин волн спектра используют приближенное выражение:

$$R_{\Delta\lambda}^\circ = R_{\lambda T}^\circ \cdot \Delta\lambda. \quad (10.4)$$

Для реального тела спектральная излучательность равна:

$$R_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} \cdot R_{\lambda T}^\circ, \quad (10.5)$$

где  $\varepsilon_{\lambda T}$  – коэффициент черноты (спектральная излучательная способность) реального тела.

На рис. 10.1 показано изменение спектральной излучательности  $R_{\lambda T}$  от длины волны для черного тела (10.1), серого

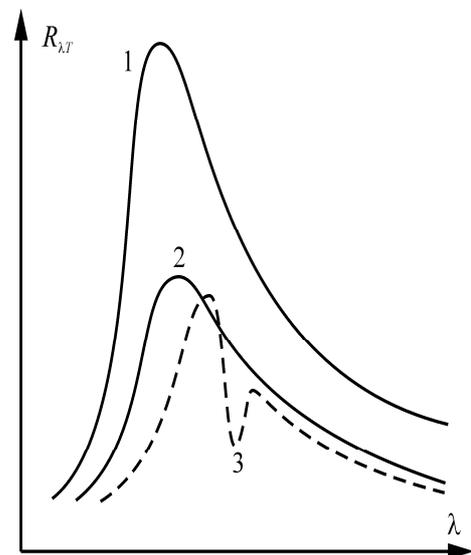


Рис. 10.1. Зависимость спектральной излучательности разных тел, имеющих одинаковую температуру, от длины волны излучения

тела (10.2) и реального тела (10.3).

Из рис. 10.1 видно, что функция излучательности абсолютно черного и серого тел подобны; функция излучательности реального тела имеет другой, иногда не монотонный характер. Реальные тела могут иметь разный вид функции излучательности.

Существует несколько видов оптических пирометров, отличающихся используемой характеристикой теплового излучения.

В **радиационных пирометрах** измеряется мощность, излучаемая нагретым телом в некотором телесном угле и воспринимаемая приемником, преобразующим энергию излучения в электрический сигнал. Существующие приемники чувствительны к излучению в довольно узкой спектральной полосе; излучение тела вне этой полосы не воспринимается приемником, что приводит к ошибкам в измерении температуры.

В **яркостных пирометрах** сравнивается яркость излучения тела в узком спектральном диапазоне с яркостью излучения в этом же диапазоне эталонного тела, температура которого известна.

**Яркость** – сила света, излучаемая в данном направлении единицей поверхности тела в заданном спектральном диапазоне.

На рис. 10.2 показана оптическая схема установки измерения температуры объекта (нити осветительной лампы накаливания) с помощью яркостного пирометра.

Оптическая система пирометра включает объектив 2, окуляр 5, нейтральный светофильтр 3, узкополосный (красный) светофильтр 6. В плоскости изображения объектива расположена пирометрическая лампа 4, играющая роль эталонного тела, температура которого задается током накала, регулируемым реостатом. Напряжение накала лампы измеряется стрелочным прибором, шкала которого проградуирована в градусах температуры.

При измерении температуры объекта 1 его изображение объективом строится в плоскости нити накала пирометрической лампы.

Наблюдатель видит через окуляр нить пирометрической лампы, совмещенную в пространстве с изображением объекта, что позволяет легко сравнивать яркости объекта и нити лампы. При равенстве яркостей оба изображения в местах наложения сливаются. Красный светофильтр вырезает из всего спектра узкую полосу вблизи длины волны  $\lambda = 0,66$  мкм, нейтральный светофильтр необходим для ослабления света объекта при его очень высокой

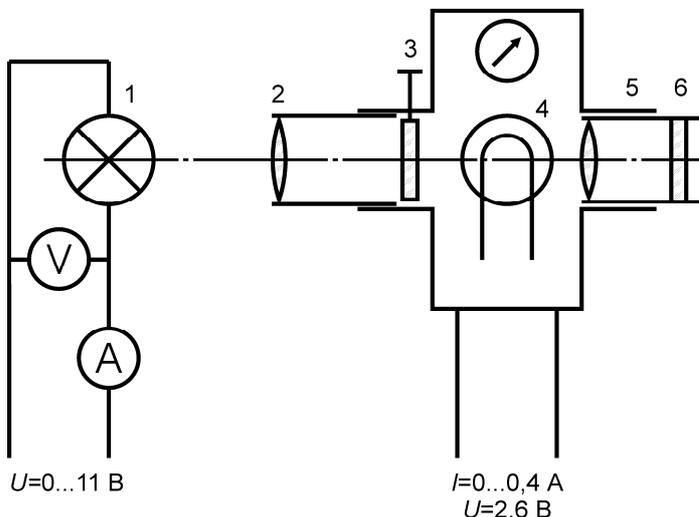


Рис. 10.2. Оптическая схема измерения температуры с помощью яркостного пирометра с исчезающей нитью

температуре; при введении этого светофильтра используют другую шкалу показывающего прибора.

Измеренная температура объекта называется **яркостной**, она всегда меньше действительной. Причина в том, что реальный объект всегда имеет степень черноты меньше единицы, излучает меньшую, чем абсолютно черное тело, мощность. Яркостная температура объекта – это такая температура абсолютно черного тела, до которой его необходимо нагреть, чтобы его яркость в нужном спектральном диапазоне была равна фактической яркости реального тела.

От яркостной температуры расчетным путем можно перейти к действительной, если известен коэффициент черноты объекта (спектральная излучательная способность) в нужном спектральном диапазоне.

Для нахождения отличия температур абсолютно черного и реального тел, имеющих одинаковую яркость на определенной длине волны, т. е. одинаковую спектральную энергетическую светимость, эти светимости приравнивают. Значения светимостей можно найти из уравнения Планка (10.3) с учетом соотношения (10.5).

Без вывода приведем формулу для расчета действительной температуры тела  $T$ , если известна яркостная температура  $T_{яр}$  :

$$T = \frac{T_{яр}}{1 - \frac{\lambda}{c_2} \cdot T_{яр} \ln \varepsilon_{\lambda T}}. \quad (10.6)$$

Если необходимо при известных яркостной и действительной температурах найти спектральную излучательную способность  $\varepsilon_{\lambda T}$ , уравнение (10.6) преобразуют:

$$\varepsilon_{\lambda T} = \exp \left[ \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{яр}} \right) \right], \quad (10.7)$$

где  $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$  м · град – постоянный коэффициент.

В настоящей работе действительную температуру объекта, которым является нить накала осветительной электрической лампочки, находят по известной зависимости электрического сопротивления материала нити (вольфрама) от температуры, приведенной на рис. 10.4. Сопротивление нити  $R_H$  вычисляют по закону Ома:

$$R_H = \frac{U}{I}, \quad (10.8)$$

где  $U$  и  $I$  – напряжение, подаваемое для питания лампочки, и ток, идущий через нее. В графике на рис. 10.4 используется зависимость относительного изменения сопротивления  $\gamma$  от температуры  $T$ :

$$\gamma(T) = \frac{R_T}{R_{293K}}, \quad (10.9)$$

где  $R_T$  – сопротивление нити при измеряемой температуре;  $R_{293K}$  – сопротивление нити при комнатной температуре.

## 5. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему установки согласно рис. 10.2.
2. Измерить или получить у преподавателя величину сопротивления нити накала лампы при комнатной температуре  $R_{293\text{K}}$ .
3. Убедившись, что регуляторы напряжения источников питания лампы накаливания и оптического пирометра установлены на нуле, включить источники в электрическую сеть.
4. Убедившись, что кольцо реостата пирометра повернуто до упора против часовой стрелки, установить напряжение питания пирометра на величину 2–2,5 В (но не более 2,6 В, во избежание повреждения нити накаливания пирометрической лампы!).
5. Плавно вращая кольцо реостата пирометра по часовой стрелке, убедиться в исправности пирометрической лампы (об этом свидетельствует свечение ее нити накала при прямом наблюдении в окуляр). Установить кольцо реостата в прежнее положение.
6. Меняя напряжение питания исследуемого источника света через 0,5 В и наблюдая его свечение через окуляр оптического пирометра, измерить яркостную температуру, для чего при каждом напряжении питания лампы вращать кольцо реостата пирометра и добиваться совпадения яркостей нити исследуемого источника света и нити пирометрической лампы (по исчезновению границ в местах пересечения нитей). Одновременно измерять напряжение и ток, подаваемые на исследуемую лампу; результаты измерений занести в табл. 10.1. Провести не менее 5 замеров.

Таблица 10.1. Результаты измерений и расчетов

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R_T = \frac{U}{I}, \text{Ом}$	$\gamma(T) = \frac{R_T}{R_{293\text{K}}}$	$T, \text{К}$	$T_{\text{яр}}, \text{К}$	$\varepsilon_{\lambda T}$
1	2	3	4	5	6	7

7. Рассчитать сопротивление нити накала и относительное изменение ее сопротивления. Заполнить графы 3 и 4 таблицы.
8. По калибровочному графику, приведенному на рис. 10.3, найти значение истинной температуры и занести в графу 5 таблицы.
9. По формуле (10.7) рассчитать коэффициент черноты  $\varepsilon_{\lambda T}$  и занести в графу 7 таблицы.
10. Построить график зависимости  $\varepsilon_{\lambda T}$  от температуры на шаблоне (рис. 10.4), содержащем действительную кривую зависимости для вольфрама.
11. Сформулировать выводы по итогам выполнения лабораторной работы: является ли вольфрамовая нить накала серым телом?

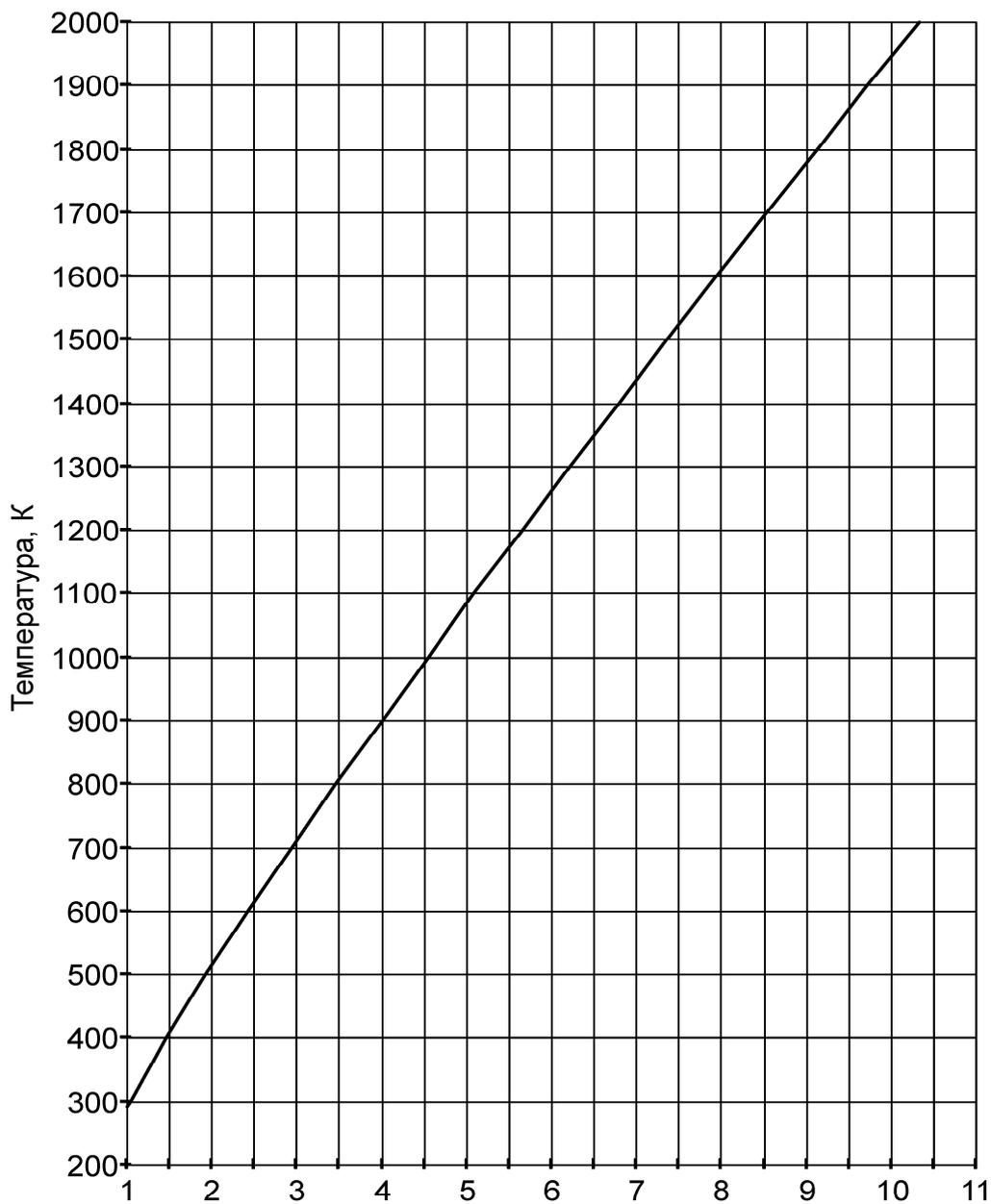


Рис.

10.3.  
График

Относительное изменение сопротивления, отн.ед.  
зависимости относительного сопротивления вольфрама от температуры

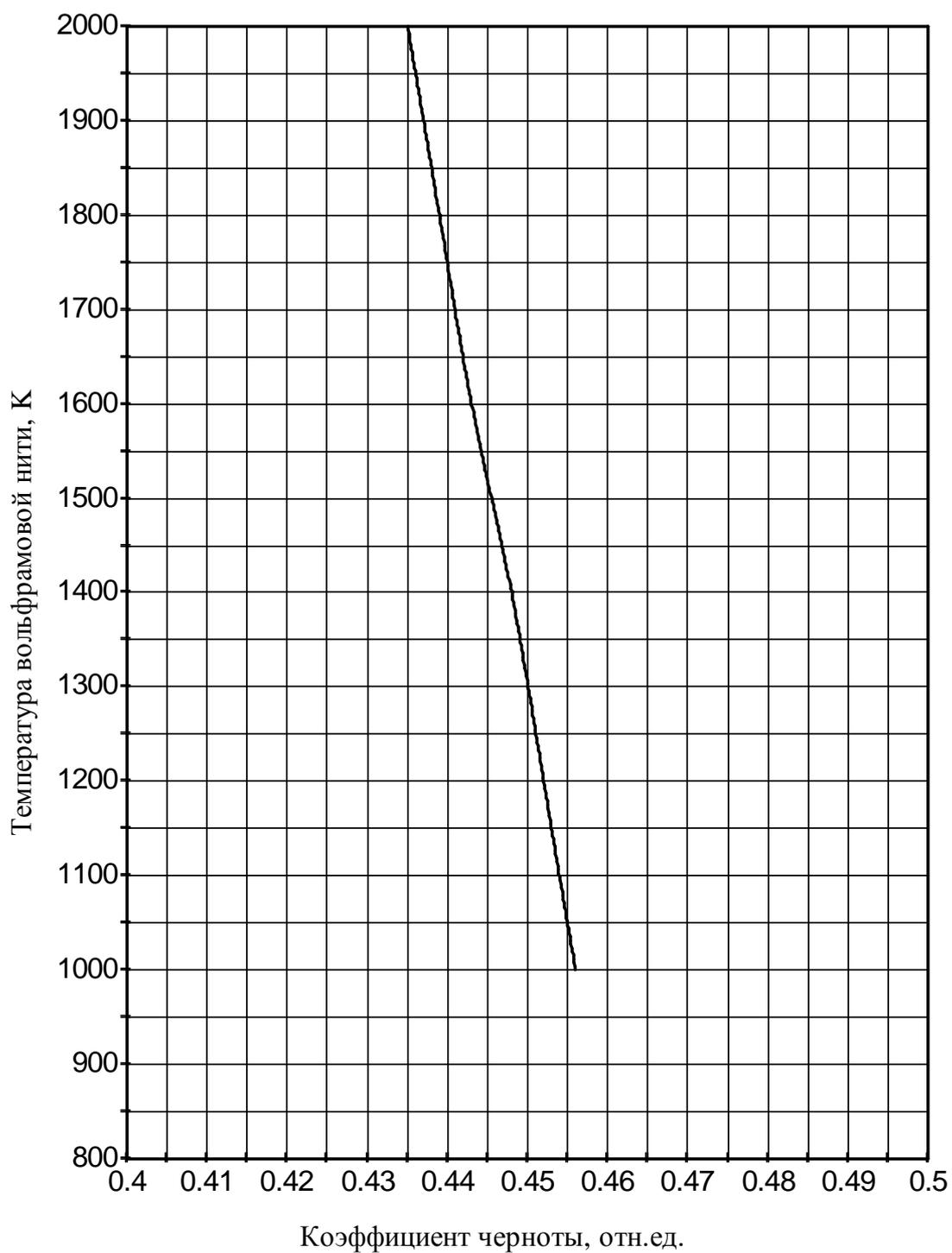


Рис. 10.4. График зависимости коэффициента черноты вольфрама от температуры

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА

### 1. Цель работы

Ознакомиться с устройством макета термоанемометра, принципами его работы; провести измерения скорости газовых потоков.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Блок управления.
2. Вентилятор (закреплен на блоке управления).
3. Проволочное термосопротивление (закреплено на блоке управления).

### 3. Подготовка к выполнению работы

По лекциям ознакомиться со следующими вопросами курса.

1. Физические основы теплового преобразователя. Виды теплообмена.
2. Конвективный теплоперенос в газе.
3. Терморезисторные преобразователи.
4. Работа мостовой измерительной схемы.

### 4. Теоретическое введение

**Термоанемометры** – приборы для измерения скорости потока газа, использующие в качестве измерительного преобразователя помещенное в поток термосопротивление.

На рис. 11.1 показано устройство измерительного преобразователя термоанемометра. Тонкая проволока 1 из вольфрама припаяна к двум медным стержням 2, которые укреплены на изолирующем основании 3. Стержни подключены к внешней измерительной схеме проводниками 4.

С помощью измерительной схемы через проволоку 1 термосопротивления пропускают электрический ток  $i$  и нагревают проволоку до температуры несколько сот градусов. При этом ее сопротивление увеличивается. При помещении преобразователя в газовый поток, скорость которого необходимо измерить, за счет увеличивающихся потерь тепла проволока охлаждается, ее сопротивление уменьшается.

Величина изменения сопротивления проволоки может служить мерой скорости потока.

В случае газовой среды тепло переносится в газе за счет тепловой конвекции или за счет теплопроводности газа, если для конвекционных потоков нет условий.

Конвективный теплообмен характеризуется тем, что тепловая энергия между телами переносится потоком перемещающихся материальных частиц среды – молекул жидкости или газа. Среда, перемещаясь, омывает горячее тело, ее частицы сталкиваются с этим телом, отбирают его тепловую энергию, удаляются, передают энергию другому телу.

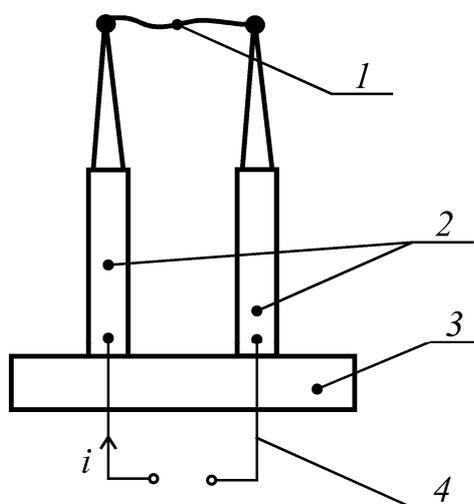


Рис. 11.1. Преобразователь термоанемометра

Потери тепла поверхностью твердого тела за счет конвекции граничащего с ним газа можно определить с помощью формулы Ньютона:

$$Q_{\text{конв}} = \zeta \cdot S \cdot (t_n - t_c), \quad (11.1)$$

где  $S = l \cdot \pi d$  – поверхность проволоки (рис. 11.2);

$t_n$  – температура проволоки;

$t_c$  – температура газовой среды;

$\zeta$  – коэффициент теплоотдачи Вт/(м<sup>2</sup>К);

$Q_{\text{конв}}$  – тепловая мощность, отбираемой потоком от проволоки, Вт.

В случае малых скоростей газа и при диаметре проволоки менее 30 мкм справедливо выражение для коэффициента теплоотдачи тонкой проволоки конвекцией:

$$\zeta = \frac{0,81 \cdot \lambda_c \cdot d^{-0,6}}{\nu^{0,4}} \cdot \nu^{0,4}, \quad (11.2)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности газа;

$\nu$  – кинематическая вязкость газа;

$d$  – диаметр проволоки;

$\nu$  – скорость газа.

Если отношение длины проволоки к ее диаметру достигает 1 000 и выше, как в нашем приборе, можно пренебречь потерями тепла посредством теплопроводности концевых участков проволоки, припаянных к держателям. Потери тепла лучеиспусканием проволоки также малы, так как мала ее температура. В этом случае практически вся подводимая к проволоке электрическая мощность  $Q$  уносится потоком газа:

$$Q = U \cdot i, \quad (11.3)$$

где  $U$  – падение напряжения на проволоке,  $i$  – ток в проволоке.

Учитывая (11.1) и (11.3), запишем:

$$\zeta \cdot S \cdot (t_n - t_c) = U \cdot i. \quad (11.4)$$

Выразим из этого уравнения коэффициент теплоотдачи:

$$\zeta = \frac{U \cdot i}{S(t_n - t_c)}. \quad (11.5)$$

Температуру  $t_n$  проволоки находим, используя зависимость сопротивления проволоки от ее температуры (рис. 11.4). Сопротивление находим по закону Ома:  $R_T = U / i$ .

Вычислив  $\zeta$ , можно из уравнения (11.2) найти скорость газового потока  $\nu$ :

$$\nu^{0,4} = \frac{\zeta \cdot \nu^{0,4}}{0,81 \cdot \lambda_c \cdot d^{-0,6}}. \quad (11.6)$$

Схема термоанемометра (рис. 11.3) является мостовой схемой. При изменении скорости газового потока из-за изменения степени охлаждения

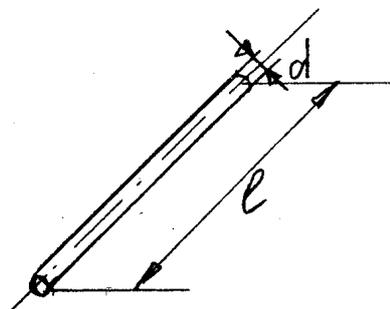


Рис. 11.2. К расчету тепловых потерь на нагретой проволоке

должно изменяться сопротивление  $R_T$  проволоки измерительного преобразователя, которое является одним из резисторов моста.

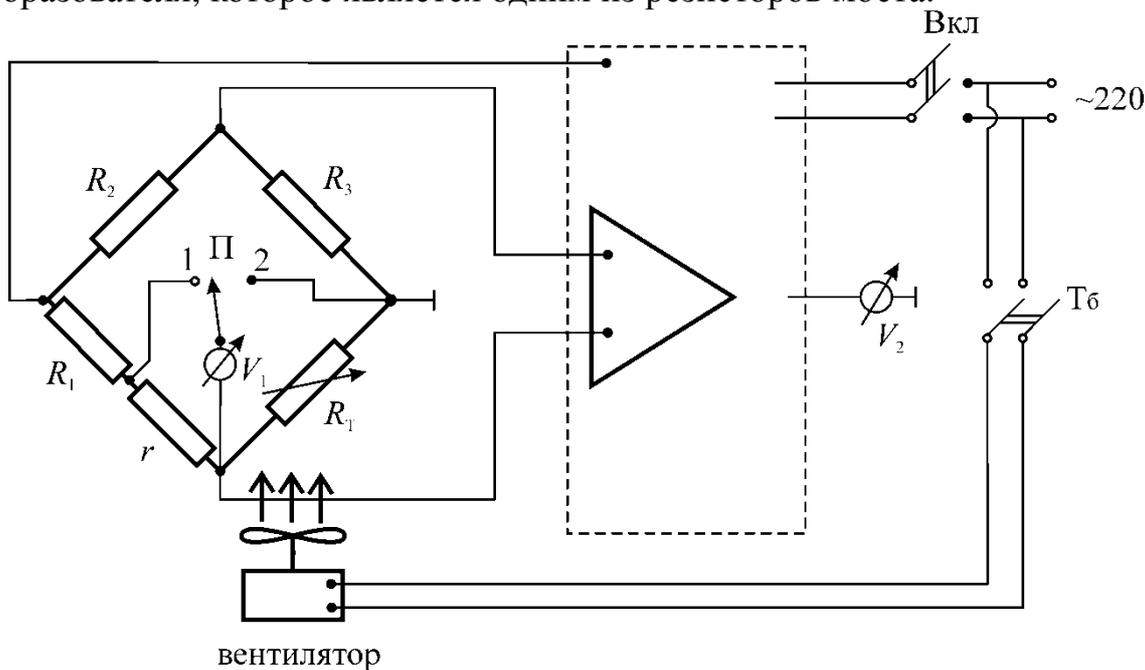


Рис. 11.3. Схема термоанемометра

Измерительный прибор  $V_1$  позволяет в положении 1 переключателя  $\Pi$  измерять ток  $i$  через терморезистор, а в положении 2 переключателя – падение напряжения на терморезисторе.

Мостовая часть схемы включает резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_T$ . Резисторы подобраны так, что при неподвижной газовой среде, когда температура резистора  $R_T$  наибольшая, значения резисторов равны между собой (мост сбалансирован):

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_T.$$

При этом напряжение на измерительной диагонали моста равно нулю.

Усилитель подключен к измерительной диагонали моста; напряжение на ней возникает при уменьшении сопротивления  $R_T$  терморезистора (когда он обдувается газовым потоком) вследствие разбалансирования моста. Это напряжение усиливается и измеряется прибором  $V_2$ , который является индикатором скорости потока.

### 5. Порядок выполнения работы

1. Подсоединить прибор к сети 220 В.
2. Включить сетевое напряжение тумблером «Вкл». Включить вентилятор на малую скорость вращения.
3. Измерить напряжение  $U$  и ток  $i$  с помощью прибора  $V_1$ , переключая второй тумблер  $\Pi$  в положения 2 и 1. Записать результаты измерения в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Измеренные и вычисленные значения величин

№	$U$ , В	$i$ , А	$R_T$ , Ом	$R_T/R_x$	$t_n$ , °С	$\zeta$ ,	$v$ , м/с
---	---------	---------	------------	-----------	------------	-----------	-----------

						Вт/(м <sup>2</sup> К)	
1							
2							

4. Вычислить сопротивление терморезистора по закону Ома:

$$R_T = U / I,$$

занести значения в табл. 11.1.

5. Вычислить отношение «горячего» сопротивления терморезистора к холодному  $R_T/R_x$  и по графику на рис. 10.3 найти значение температуры нити  $t_n$  преобразователя ( $R_x = 20$  Ом).

6. Вычислить по формуле (11.5) коэффициент теплоотдачи  $\zeta$  проволоки преобразователя ( $d = 10 \cdot 10^{-6}$  м,  $l = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $t_c = 20$  °С).

7. Вычислить по формуле (11.6) скорость потока воздуха. Для воздуха  $\nu = 35,82 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_c = 37,2 \cdot 10^{-3}$  Дж/(м·с·град). Занести результаты в табл. 11.1.

8. Повторить п. 3–7, включив вентилятор на большую скорость. Результаты занести в табл. 11.1.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

#### 1. Цель работы

Изучить принципы работы термокондуктометрических анализаторов состава газовых смесей и устройство лабораторного газоанализатора.

Измерить чувствительность газоанализатора при определении содержания в атмосфере углекислого газа.

#### 2. Приборы и принадлежности

Лабораторная установка с термокондуктометрическим преобразователем

#### 3. Подготовка к работе

1. По лекциям изучить:

а) теорию передачи тепла путем теплопроводности;

б) методы определения газового состава;

в) теорию работы термокондуктометрических преобразователей (катарометров).

2. По настоящему сборнику ознакомиться с принципами работы лабораторного газоанализатора.

3. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Молекулярный механизм передачи тепла путем теплопроводности.

2. Закон Фурье.

3. Передача тепла через плоский слой вещества.

4. Физические эффекты, используемые в различных газоанализаторах

5. Принцип работы термокондуктометрического преобразователя.

6. Какой вид теплопередачи используется в катарометрах?

7. Какими факторами определяется чувствительность анализатора?

8. Как зависит коэффициент теплопроводности смеси газов от состава смеси?

#### 5. Общие сведения

Газоанализаторы предназначены для измерения состава смесей известных газов.

Принцип действия термокондуктометрических газоанализаторов (катарометров) основан на процессе теплопереноса в газах за счет *теплопроводности* под действием градиента температур.

Распространение теплоты путем теплопроводности подчиняется закону Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}, (12.1)$$

где  $q$  – тепловой поток, т. е. количество тепловой энергии, переданной в единицу времени через единицу поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;

$dT/dx$  – градиент температуры по направлению  $x$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К).

В соответствии с законом Фурье, количество тепловой энергии  $Q$ , проходящей через плоский слой вещества между поверхностями 1 и 2, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$ , равна:

$$Q = \frac{\Delta T \cdot t}{R_T}, \quad (12.2)$$

где  $t$  – время протекания тепла;  $R_T$  – тепловое сопротивление слоя.

Если слой вещества (газа, жидкости, твердого тела) плоский, его тепловое сопротивление равно:

$$R_T = \frac{\delta}{S \cdot \lambda}, \quad (12.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводность вещества;

$\delta$  – толщина слоя;

$S$  – площадь переносящего тепло участка слоя.

Различные вещества отличаются по своей теплопроводности, и это их свойство применяется для определения вещества. Так, теплопроводность углекислого газа  $CO_2$  равна  $14,2 \cdot 10^{-5}$  Вт/(см·К), азота –  $24,3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(см·К).

Тепловая энергия тела определяется суммарной кинетической энергией теплового движения его молекул.

Передача тепловой энергии теплопроводностью происходит в любых веществах при столкновении между собой молекул, имеющих различную кинетическую энергию.

В газах тепло может распространяться также за счет **конвекции**. При такой теплопередаче среда перемещается и переносит молекулы среды (и тепловую энергию) между телами.

Для большинства газов тепловое сопротивление их смесей зависит от состава линейно, поэтому для коэффициента теплопроводности смеси  $\lambda$  справедливо выражение:

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\lambda_i}, \quad (12.4)$$

где  $i$  – номер компонента смеси;

$c_i$  и  $\lambda_i$  – объемная концентрация и коэффициент теплопроводности компонента.

Поэтому метод определения состава смеси газов заключается в сравнении теплопроводности анализируемой смеси с теплопроводностью эталонного газа (газа сравнения). Анализатор конструктивно выполняют так, чтобы теплопередача путем конвекции газа была исключена.

Измерение теплового сопротивления анализируемой газовой смеси осуществляется по электрическому сопротивлению терморезистора, нагреваемого электрическим током и помещенного в камеру с холодными стенками, содержащую анализируемый газ; тепловая энергия терморезистора передается через слой анализируемого газа к холодным стенкам, и температура резистора и его электрическое сопротивление зависят от теплового

сопротивления слоя газа, то есть от теплопроводности газа. Используя (12.2), для разницы температур терморезистора  $T_r$  и стенок камеры  $T_{cm}$  запишем:

$$T_r - T_{cm} = \frac{Q}{t} \cdot R_T = P \cdot R_T, \quad (12.5)$$

где  $P = \frac{Q}{t}$  – тепловая мощность, теряемая терморезистором.

В установившемся режиме эта мощность равна электрической мощности терморезистора, вычисляемой по закону Джоуля – Ленца:

$$P = i^2 \cdot r, \quad (12.6)$$

где  $i$  и  $r$  – электрический ток в терморезисторе и его электрическое сопротивление.

Изменение электрического сопротивления проводника при изменении его температуры  $\Delta T$  равно:

$$\Delta r = r_0 \alpha \Delta T. \quad (12.7)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$r_0$  – сопротивление проводника при температуре  $T = 0^\circ \text{C}$ .

Из (12.7) и (12.5) можно увидеть, что по изменению сопротивления терморезистора при подаче в анализатор анализируемого газа можно судить об изменении температуры резистора и тепловом сопротивлении слоя газа в камере.

В случае анализа бинарной смеси газов для температуры резистора запишем, используя (12.5), (12.3) и (12.4) следующее уравнение:

$$T_r - T_{cm} = P R_T = P \cdot \frac{\delta}{S} \cdot \frac{1}{\lambda} = P \cdot \frac{\delta}{S} \cdot \left( \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} \right), \quad (12.8)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – объемные доли первой и второй компонент смеси;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводности компонент.

При измерениях сравнивают температуру резистора  $T_r = P \frac{\delta}{S} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$ ,

погруженного в эталонный газ 1 с температурой резистора  $T_r = P \frac{\delta}{S} \left( \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} \right)$ ,

погруженного в смесь газов. Разница этих температур  $\Delta T$  равна:

$$\Delta T = T_r - T_{r_1} = \frac{P \delta}{S} \left( \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right).$$

Учитывая, что  $c_1 = 1 - c_2$ , получим:

$$\Delta T = P \frac{\delta}{S} \cdot c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right). \quad (12.9)$$

При выводе было учтено, что при малых изменениях температуры электрическая мощность  $P$ , выделяющаяся в терморезисторе, остается постоянной.

Из уравнения (12.9) следует, что изменение температуры терморезистора при изменении состава смеси пропорционально концентрации  $c_2$  меняющейся компоненты смеси. Видно также, что чувствительность измерительного устройства определяется разницей коэффициентов теплопроводностей компонент смеси: чем выше эта разница, тем больше изменение температуры.

### **Описание лабораторного газоанализатора**

Основной частью газоанализатора является измерительный преобразователь (рис. 12.1), представляющий собой металлический блок 1, в полости которого вставлены стеклянные терморезисторы 2 и 3 с металлическими нагревающимися проволочками 4.

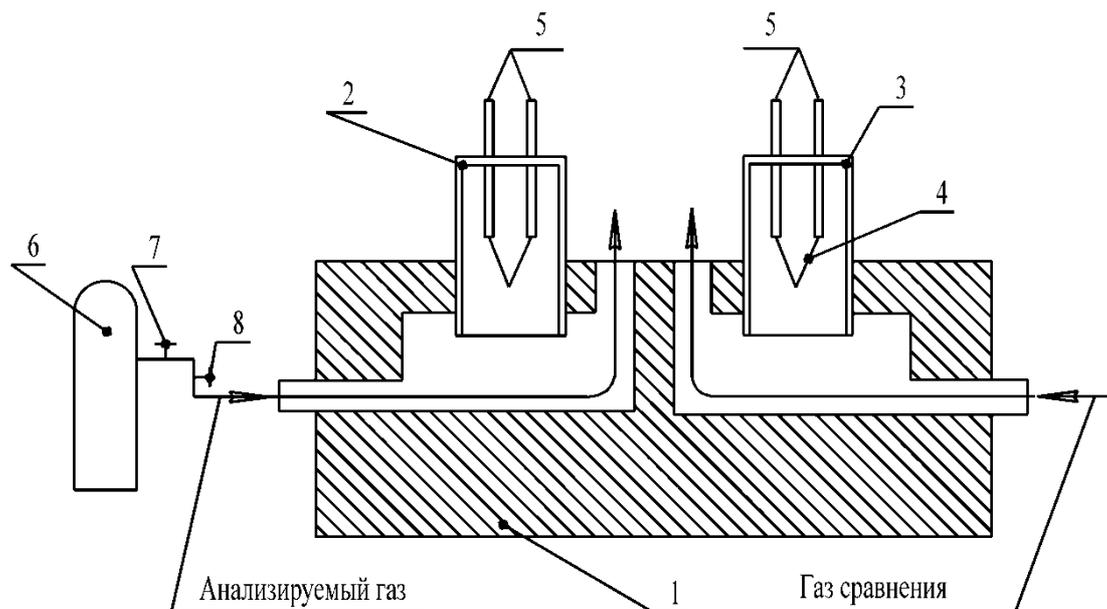


Рис. 12.1. Устройство измерительного преобразователя

Анализируемый газ  $CO_2$  поступает из колбы 6 сатуратора при открывании крана 7 в пластиковую трубку, затем при открывании зажима 8 в полость блока 1 и, заполнив полость и корпус 2 терморезистора, выходит в атмосферу.

Газом сравнения является атмосферный воздух, заполняющий правую полость блока 1 и корпус терморезистора 3.

С помощью выводов 5 терморезисторы подключаются к схеме измерения температуры резисторов (рис. 12.2), которая является мостовой схемой.

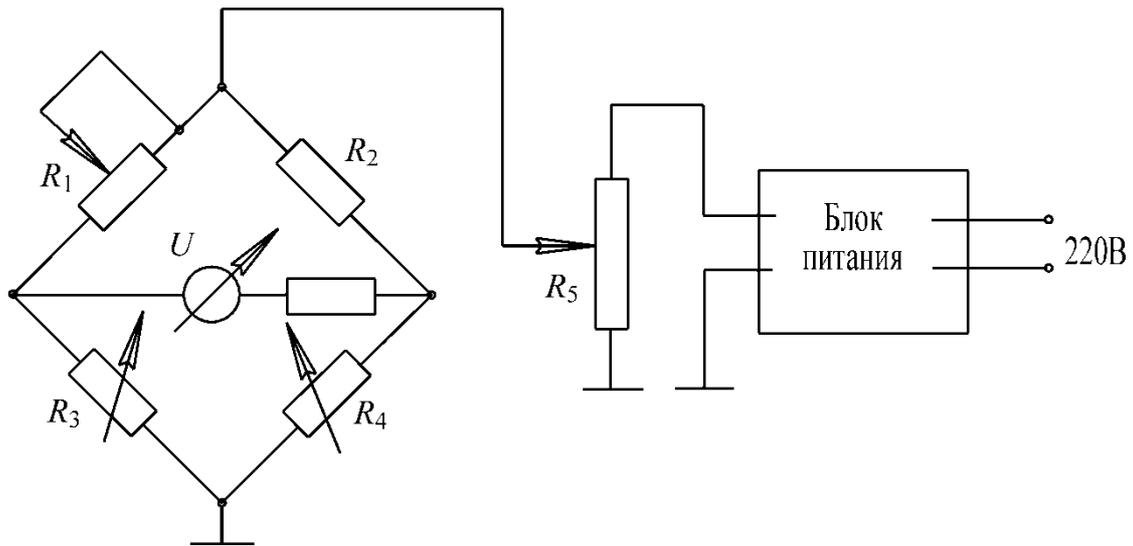


Рис. 12.2. Измерительная схема

Измерительный мост образован резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ ; к вертикальной диагонали моста подается напряжение  $U_0$  (относительно общей точки), регулируемое потенциометром  $R_5$ . Источником напряжения является блок питания, вырабатывающий постоянное напряжение  $U = 12$  В. В горизонтальную диагональ моста включен стрелочный измерительный прибор, измеряющий напряжение  $\Delta U$  разбалансировки моста. Резисторы  $R_3$  и  $R_4$  являются терморезисторами; напряжение моста  $U_0$  подбирается так, чтобы сопротивление терморезисторов, вследствие их нагревания проходящим током, было бы примерно в 2 раза больше сопротивления в отсутствие тока, при этом температура нитей терморезисторов  $\approx 500$  °С. Использование двух терморезисторов, включенных в разные плечи моста, позволяет добиться независимости результатов измерений от температуры окружающей среды.

Перед измерениями обе полости блока 1 заполнены воздухом, и регулировкой резистора  $R_1$  мост уравнивают, добиваясь нулевого значения напряжения разбаланса  $\Delta U = 0$ .

Затем, открывая зажим 8 на трубке, заполняют левую полость преобразователя газом  $CO_2$ , фиксируя максимальное показание  $\Delta U_{max}$  (в делениях) стрелочного прибора. Величину  $\Delta U_{max}$  можно изменять регулировочным резистором  $R_5$ .

При напуске углекислого газа, имеющего меньшую теплопроводность, чем воздух, теплоотвод от терморезистора  $R_3$  в камере с углекислым газом уменьшится, его температура возрастет; возрастет и сопротивление на величину  $\Delta r$  (формула (12.7)). Потенциал точки соединения резисторов  $R_1$  и  $R_3$  изменится, возникнет напряжение  $\Delta U$  разбаланса измерительного моста, равное:

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \alpha \Delta T, \quad (12.10)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления терморезисторов.

Учитывая (12.9), запишем:

$$\Delta U = \frac{U_0 \alpha}{4} \cdot P \cdot c_2 \cdot \frac{\delta}{S} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = K \cdot c_2, \quad (12.11)$$

где  $K = \frac{1}{4} U_0 \alpha P \cdot \frac{\delta}{S} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$  – постоянный коэффициент прибора, не изменяющийся при напусках исследуемого газа.

При заполнении измерительной полости только исследуемым газом, его объемная доля  $c_2 = 1$ . Поэтому максимальное показание стрелочного прибора:

$$\Delta U_{max} = K. \quad (12.12)$$

Если прекратить поступление газа из сатуратора, то постепенно его концентрация  $c_2$  в измерительном объеме уменьшается за счет диффузионного улетучивания газа через отверстия полости в атмосферу, увеличивается доля воздуха. В данной лабораторной работе можно проследить за ходом диффузии газов, измеряя зависимость  $c_2 = f(t)$  концентрации углекислого газа от времени.

Значение  $c_2$  вычисляется по формуле:

$$c_2 = \frac{\Delta U}{K} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{max}}. \quad (12.13)$$

Здесь  $c_2$  – в объемных долях. Для перевода значения концентрации в объемные проценты используют формулу:

$$c_2 (\%) = c_2 \cdot 100 \%$$

Основные параметры, характеризующие газоанализатор:

- чувствительность  $S = \frac{\Delta U}{\Delta m}$ , где  $\Delta U$  – изменение выходной величины газоанализатора;  $\Delta m$  – изменение входной величины;

- разрешающая способность  $M$  – минимальная разница концентраций газа, измеряемая прибором, т. е. разница концентраций, соответствующая изменению показаний стрелочного измерительного прибора на минимальную величину (на одно деление).

## 6. Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную установку в сеть 220 В.
2. Включить блок питания выключателем на его корпусе.
3. Уравновесить мост при необходимости плавной регулировкой резистора  $r_1$  добиваясь нулевого отклонения стрелочного прибора ( $\Delta U = 0$ ).
4. Открыть кран сатуратора, нажав рычаг на 1–2 с, затем медленно открывать зажим 8. Заметить максимальное отклонение стрелки прибора  $\Delta U_{max}$  и записать в таблицу в делениях шкалы прибора.
5. Измерять значения  $\Delta U$  через каждую секунду, занося полученные значения в табл. 12.1.

Таблица 12.1. Расчетные и экспериментальные результаты

№	Параметр	$\Delta U_{max}$ , делений	$t$ , с	$\Delta U$ делений	$c_2$ , %
1					
2					
3					
4					
5					

6. Вычислить по (12.13) и занести в таблицу значения объемной концентрации  $c_2$  углекислого газа в измерительном объеме.

7. Построить график функции  $c_2 = f(t)$ .

8. Определить разрешающую способность анализатора  $M$ .

9. Определить чувствительность анализатора  $S = \frac{\Delta U}{\Delta t}$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

### 1. Цель работы

Ознакомиться с устройством и принципом действия психрометра; усвоить основные понятия, связанные с влажностью воздуха; научиться проводить измерение влажности воздуха.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Психрометр.
2. Пипетка для увлажнения фитиля психрометра.
3. Стакан с водой.
4. Штатив для крепления термометров психрометра.

### 3. Подготовка к работе

По лекциям изучить раздел по измерению влажности газов.

#### Ответить на вопросы

1. Понятие давления насыщенного пара.
2. Перечислить параметры, характеризующие влажность газа, и дать их определение.
3. Как определяется точка росы влажного газа?
4. Вывод уравнения, связывающего абсолютную и относительную влажности воздуха.
5. Принцип работы психрометра с двумя термометрами.
6. Что характеризуют показания сухого термометра?
7. Объяснить, почему температура влажного фитиля зависит от влажности поступающего к фитилю газа?

### 4. Теоретическое описание

#### *Параметры, характеризующие влажность*

Для измерения влажности воздуха и других газов применяют гигрометры. Психрометр – один из видов гигрометров, состоит из двух термометров, продуваемых исследуемым воздухом.

Влажный воздух содержит в своем составе, кроме обычных газов, водяные пары. Наличие пара существенно изменяет ряд параметров воздуха: его теплопроводность и электропроводность, способность поглощать оптические излучения, возможность участвовать в различных физико-химических и биологических процессах, поэтому измерение влажности воздуха является необходимым и в бытовых условиях, и в медицинских учреждениях, в промышленности, в метеорологии и др.

Пусть некоторый объем  $V$  влажного воздуха имеет температуру  $T$ . Массу  $M$  этого воздуха можно представить как сумму массы сухого воздуха  $m_a$  и массы водяного пара  $m_v$ , содержащихся в этом объеме. Общее (барометрическое) давление  $P$  влажного воздуха представляет собой сумму парциальных давлений сухого воздуха  $P_a$  и водяного пара  $P_v$ :

$$P = P_a + P_v. (13.1)$$

**Парциальное давление** водяного пара в сосуде с воздухом – такое давление в сосуде, которое в нем окажется, если удалить все газы, кроме водяного пара.

**Абсолютная влажность воздуха (массовое отношение влаги)  $r$**  – отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха:

$$r = m_v / m_a. \quad (13.2)$$

**Давление насыщенного пара  $P_{sm}$ , Па** – давление пара, находящегося в равновесии с жидкой водой при некоторой температуре. Это максимальное значение, которое может принимать парциальное давление пара  $P_v$ : при попытках сжать пар происходит его конденсация, но давление не возрастает.

**Относительная влажность воздуха  $U$ , %** – отношение парциального давления пара воды  $P_v$  при температуре  $T$  к давлению насыщенного пара  $P_{ST}$  при этой температуре:

$$U = P_v / P_{ST} \cdot 100. \quad (13.3)$$

**Температура точки росы,  $T_d$  °С** – температура, до которой необходимо охладить влажный воздух, чтобы достичь насыщения водяного пара в воздухе. При температуре точки росы пар, содержащийся в атмосфере, начнет конденсироваться, т. е. его парциальное давление станет давлением насыщенного пара:

$$P_v = P_{ST}. \quad (13.4)$$

**Температура влажного термометра  $T_h$  °С** – температура равновесного испарения воды в воздух в случае, когда необходимая для испарения теплота поступает только из воздуха. Эта температура имеет значение при работе психрометра и в некоторых других случаях.

**Соотношения между величинами, характеризующими влажность**

Используя уравнение Менделеева – Клапейрона для идеального газа:

$$P \cdot V = m / M \cdot RT, \quad (13.5)$$

где  $P$  и  $V$  – давление и объем газа массой  $m$ ;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура газа;

$M$  – его молярная масса.

Найдем связь между массовым отношением влаги  $r$  и парциальным давлением  $P_v$  водяного пара в воздухе. Из (13.5) находим:

$$m = MPV / RT,$$

для массы водяного пара:

$$m_v = M_v P_v V_v / RT,$$

для массы сухого воздуха:

$$m_a = M_a P_a V_a / RT.$$

Учитывая (13.2), получим:

$$r = \frac{M_v P_v V / RT}{M_a P_a V / RT} = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{P_v}{P_a},$$

здесь  $M_v$  и  $M_a$  – молярные массы водяного пара и сухого воздуха.

Из (13.1) вытекает:  $P_a = P - P_v$ .

Окончательно:

$$r = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{P_v}{P - P_v} = \delta \cdot \frac{P_v}{P - P_v}, \quad (13.6)$$

$$\text{где } \delta = \frac{M_v}{M_a} \approx 0,622.$$

### Описание работы психрометра

В настоящей работе влажность воздуха измеряется психрометром. Схематически устройство психрометра показано на рис. 13.1.

Психрометр содержит два термометра. Правый на рис. 13.1 термометр имеет на своем чувствительном кончике увлажненную ткань; оба термометра – сухой и влажный – обдуваются одним потоком воздуха, влажность которого необходимо измерить.

Испарение воды в воздух вызывает охлаждение правого термометра до равновесного значения температуры, называемого «температурой влажного термометра». Другой термометр измеряет температуру воздуха – «температуру сухого термометра».

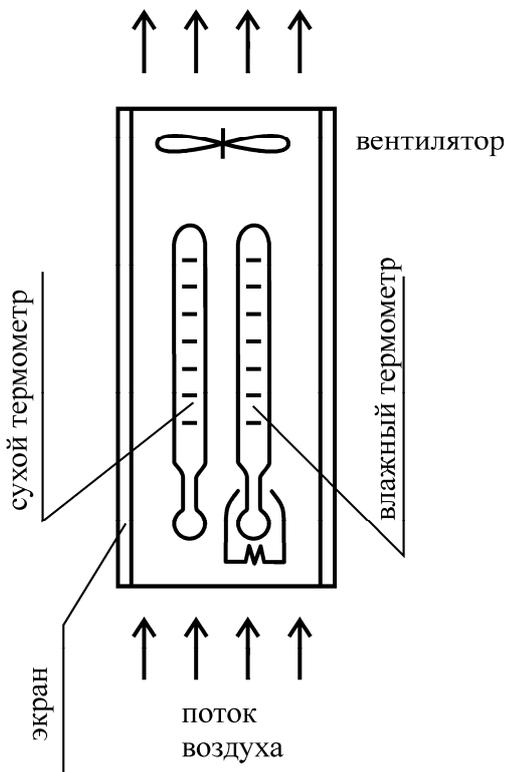


Рис. 13.1. Схема психрометра

В пограничном слое влажного фитиля воздух неподвижен и водяной пар в нем насыщен при температуре  $T_h$  влажного фитиля.

К фитилю подходит воздух, в котором уже есть влага массой  $m_v$  (в объеме пограничного слоя), поэтому для создания в пограничном слое насыщения водяного пара (т. е. массы влаги  $m_h$ ) необходимо из фитиля ввести дополнительно в слой количество влаги  $m_h - m_v$ . Эта влага должна испариться из фитиля, на что надо затратить удельное количество тепла:

$$\frac{Q_1}{m_a} = \frac{(m_h - m_v) L_{Th}}{m_a} = (r_h - r) L_{Th}, \quad (13.7)$$

где  $r_h = \frac{m_h}{m_a}$  – абсолютная влажность слоя при его насыщении влагой;  $m_a$  –

масса сухого воздуха в слое,  $r = \frac{m_v}{m_a}$  – абсолютная влажность атмосферного

воздуха;  $L_{Th}$  – удельная теплота испарения влаги.

Тепло это передается фитилю с потоком атмосферного воздуха, который состоит из сухой части с абсолютной влажностью, равной 1 и влаги с абсолютной влажностью  $r$ . Отдавая тепло, воздух охлаждается до температуры  $T_h$ , т. е. на величину  $\Delta T = T - T_h$ . Удельное количество тепла, переданное фитилю, равно:

$$\frac{Q_2}{m_a} = (c_{Pa} + c_{Pv} \cdot r) \cdot (T - T_h), \quad (13.8)$$

где  $c_{Pa}$  и  $c_{Pv}$  – удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара.

В уравнениях (13.7) и (13.8) левые части равны, поэтому равны и правые части:

$$(c_{Pa} + c_{Pv} \cdot r) \cdot (T - T_h) = (r_h - r) \cdot L_{Th}. \quad (13.9)$$

В этом уравнении неизвестна только искомая величина  $r$  абсолютной влажности атмосферного воздуха.

На практике пользуются рабочей формулой:

$$P_v = P_{STh} - A \cdot P(T - T_h), \quad (13.10)$$

где  $P_v$  – парциальное давление водяного пара в атмосферном воздухе;  $P_{STh}$  – давление насыщенного пара при температуре  $T_h$  (влажного термометра);  $P = 10^5$  Па – давление атмосферы,  $A = 6,4 \cdot 10^{-4}$ ; величина  $(T - T_h)$  находится экспериментально. Давление насыщенного пара находят из табл. 13.1.

Таблица 13.1. Давление насыщенного водяного пара, в зависимости от температуры

$T_h, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35
$P_s, \text{Па}$	872,5	1227,9	1705,3	2338,5	3168,7	4245,2	5626,5

$T_h, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	65
$P_s, \text{Па}$	7381,3	9589,8	12344,8	15752,3	19933,1	25023,7

## 5. Порядок выполнения работы

1. Смочить с помощью пипетки фитиль на нижнем конце влажного термометра психрометра.

2. Рукояткой завести пружину вентилятора и оставить психрометр висющим вертикально.

3. Следить за показаниями термометров. Когда изменения показаний влажного термометра прекратятся (~1 мин), записать в табл. 13.2, строка 1 наблюдаемые значения температур  $T$  – сухого термометра,  $T_k$  – влажного термометра.

4. Определить по табл. 13.1 давление  $P_{STh}$  насыщенного пара при температуре влажного термометра и занести в табл. 13.2. Для получения точного значения  $P_{STh}$  воспользоваться линейной интерполяцией.

Таблица 13.2. Экспериментальные и расчетные значения

№	$T, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$P_{STh}, \text{Па}$	$P_v, \text{Па}$	$T_{росы}, ^\circ\text{C}$	$P_{ST}, \text{Па}$	$U, \%$	$r$
1								
2								

5. Рассчитать по формуле (13.10) значения парциального давления  $P_v$  водяного пара в атмосфере, занести в табл. 13.2.

6. Воспользовавшись уравнение (13.4) и табл. 13.1, найти температуру точки росы  $T_{росы}$ , занести в табл. 13.2. При определении величин по табл. 13.1 использовать интерполяцию.

7. Определить относительную влажность атмосферного воздуха  $U$  по уравнению (13.3). Предварительно найти по табл. 13.1 давление насыщенного пара  $P_{ST}$  в атмосферном воздухе при температуре воздуха  $T^\circ\text{C}$ ,

воспользовавшись интерполяцией. Занести полученные значения  $P_{ST}$  и  $U$  в табл. 13.2.

8. Вычислить значение абсолютной влажности  $r$  атмосферного воздуха, воспользовавшись уравнением (13.6), занести в табл. 13.2.

9. Подставить под психрометр стакан с водой, провести повторно все измерения и расчеты (пункты 2–8), занести результаты в строку 2 табл. 13.2.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 ЗВУКОВАЯ ЭХО-ЛОКАЦИЯ

### 1. Цель работы

Изучить основы метода измерения положения тел по времени запаздывания отраженной от объекта звуковой волны.

Изучить лабораторный прибор для звуковой эхо-локации объектов.

### 2. Приборы и принадлежности

1. Лабораторный звуковой эхо-локатор.
2. Экран.
3. Осциллограф.

### 3. Подготовка к работе

По лекциям и теоретическому разделу описания настоящей работы ознакомиться с физическими основами распространения звуковых волн в жидкостях и газах, отражением и преломлением упругих волн, методами определения расстояний по времени прохождения волны до препятствий.

Изучить устройство и принцип работы макета звукового эхо-локатора.

### 4. Контрольные вопросы

1. Особенности физической природы звуковых волн в атмосфере.
2. Как зависит скорость звука в воздухе от высоты подъема в горах?
3. Меняется ли скорость звука в воздухе при смене времени года?

Обосновать ответ, привести количественные оценки.

4. Объяснить особенности прохождения звука через границу раздела разных сред, дать количественные оценки.

5. Принцип определения положения объекта при эхо-локации.

6. Объяснить устройство и работу макета звукового эхо-локатора.

7. Какую роль играют мембраны микрофонов в излучателе и приемнике звуковых волн?

### 5. Теоретический раздел

*Распространение звуковых волн в атмосфере. Отражение волн от препятствий*

Распространение колебательного движения в жидкости или газе называется *звуковыми волнами*.

Жидкости и газы обладают только объемной упругостью, но не упругостью формы. Поэтому в них могут распространяться только *продольные* возмущения; поперечные не распространяются. В каждой точке жидкости или газа, участвующей в распространении звуковой волны, происходят попеременные сжатия и разрежения.

Звуковые колебания в газе происходят настолько быстро, что тепло, выделившееся при сжатии локальной области газа, не успевает «рассасываться» за счет теплопроводности газа в окружающее пространство, разности температур между сгущениями и разрежениями газа в звуковой волне не успевают выравниваться, так что распространение звука можно считать адиабатическим процессом. Для скорости звуковых волн в газе справедливы равноценные формулы:

$$c_{36} = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}, \quad (14.1)$$

$$c_{36} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (14.2)$$

где  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и

постоянном объеме: для двухатомного газа  $\gamma = 1,4$ ;

$P$  и  $\rho$  – давление и плотность газа;

$R = 8,31$  Дж/моль – универсальная газовая постоянная;

$T$  – термодинамическая температура газа, К;

$M$  – молярная масса газа (для воздуха  $M = 0,0288$  кг/моль).

При попадании волны на границу двух сред, часть волны отражается, часть проходит во вторую среду и преломляется. Если волна падает на границу не под прямым углом, то направление преломленной волны не совпадает с направлением падающей.

Проникновение звуковой волны во вторую среду зависит от соотношения *волновых сопротивлений*  $Z_{36}$  или *удельных акустических импедансов* сред:

$$Z_{36} = \rho \cdot c_{36}. \quad (14.3)$$

Долю  $\beta$  прошедшей через границу раздела сред энергии волны можно определить как отношение интенсивности  $I_2$  прошедшей волны к интенсивности  $I_1$ , падающей:

$$\beta = \frac{I_2}{I_1}, \quad (14.4)$$

где  $\beta$  – коэффициент проникновения звуковой волны.

Этот коэффициент можно вычислить по формуле:

$$\beta = 4 \cdot \frac{\frac{Z_{136}}{Z_{236}}}{\left[ \frac{Z_{136}}{Z_{236}} + 1 \right]^2}, \quad (14.5)$$

где  $Z_{136}$  и  $Z_{236}$  – волновые сопротивления первой и второй среды.

Если волновые сопротивления сред отличаются многократно, то коэффициент проникновения очень мал, и практически вся волна отражается от границы раздела. Поэтому отражение звуковых волн в атмосфере от твердых тел или поверхности воды почти полное.

### **Определение положения тел методом звуковой эхо-локации**

Звуковая локация – определение положения объекта по отражению от него звука, создаваемого специальными излучателями.

При импульсной локации расстояние  $l$  до объекта определяют по времени запаздывания  $\Delta t$  отраженного эхо-сигнала:

$$l = \frac{1}{2} c_{зв} \cdot \Delta t. \quad (14.6)$$

При измерении расстояния по эхо-сигналу используется схема, изображенная на рис. 14.1.

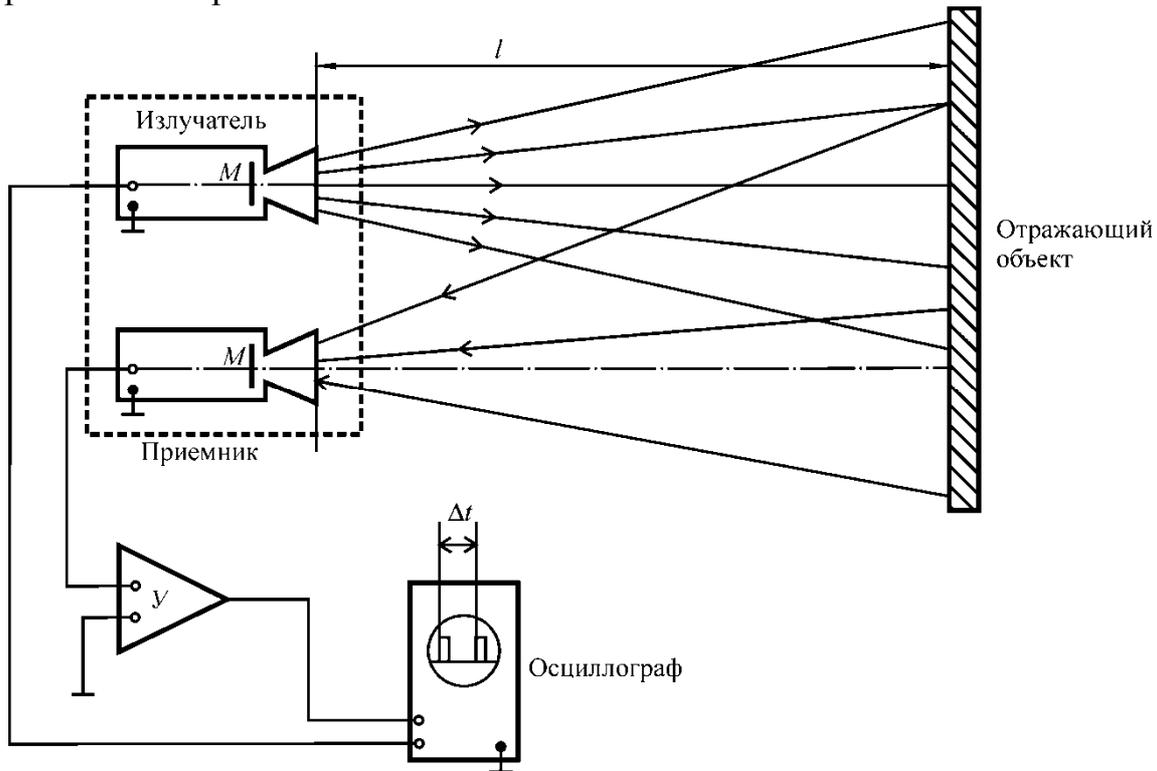


Рис. 14.1. Определение расстояний по времени прохождения волны до объекта и обратно

В лабораторной установке излучатель и приемник размещены в общем корпусе (пунктир). Каждый из них снабжен рупором, повышающим избирательность излучения и приема звуковых волн. Поэтому звуковые волны, достигшие поверхности объекта, отразившись, попадают только в рупор приемника. В излучателе источником звуковой волны является мембрана  $M$  микрофона, которая колеблется под действием электромагнитного поля катушки с током и создает короткий пакет звуковых волн – звуковой импульс. Одновременно со звуковым импульсом излучатель посылает электрический импульс на осциллограф, где сразу же запускается «развертка» электронного пучка по экрану – начинается движение светящегося пятна по экрану и формируется изображение пришедшего от излучателя импульса.

Отраженный звуковой импульс в форме пакета волн, попав в рупор приемника, возбуждает колебания мембраны  $M$  микрофона, являющегося в приемнике преобразователем звуковых колебаний в колебания электрического напряжения. Эти колебания поступают на вход усилителя  $U$ , усиливаются и поступают в осциллограф, возбуждая на его экране импульс эхо-сигнала, сдвинутый относительно первого запускающего развертку импульса на временной промежуток  $\Delta t$ . Используя (14.6), можно вычислить расстояние  $l$  до объекта.

## 6. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему опыта согласно рис. 14.1.
2. Включить лабораторную установку (переключателем на ее корпусе), расположить экран-отражатель на расстояние 3–5 м.
3. Настроить осциллограф (установить чувствительность в диапазоне 0,1 – 1 В/дел, длительность развертки в диапазоне 1–5 мс/дел). Убедиться в наличии на экране осциллографа картины импульсов, смещающихся при перемещении отражателя.
4. Измерить по экрану осциллографа время  $\Delta t$  запаздывания эхо-сигнала для пяти удаленностей экрана, измерить соответствующие расстояния  $l$  до отражателя, внести данные в табл. 14.1.

Таблица 14.1. Экспериментальные и расчетные результаты

N	$l$ , м	$\Delta t$ , с	$l_p$ , м	$c_{зв}$ , м/с	$\beta$	$l_{мин}$ , м
1						
2						
3						

5. Рассчитать скорость звука в воздухе при комнатной температуре по формуле (14.2), занести результат в таблицу.
6. Рассчитать, используя формулы (14.3) и (14.5), коэффициент  $\beta$  проникновения звуковой волны из воздуха в деревянный экран (плотность воздуха  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , плотность дерева  $\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , скорость звука в дереве  $c_{зв} \approx 10^3 \text{ м/с}$ ), результат занести в таблицу.
7. Рассчитать расстояние  $l_p$  до отражателя, используя (14.6) и результаты измерения времени запаздывания, занести полученные данные в таблицу.
8. Определить расстояние  $l_{мин}$  обнаружения отражателя малых размеров (площадью  $10 \times 10 \text{ см}^2$ ), результат занести в таблицу.
9. Сделать вывод о точности измерения положения объекта с помощью лабораторного эхо-локатора.