

**ЛАБОРАТОРНЫЙ  
ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИКЕ  
11 КЛАСС**

**ЧАСТЬ II**

**Москва  
2021 г.**

**Пособие подготовили:**

**Воинкова И.В.**

**Казанская А.Я.**

**Кирюшкина В.К.**

**Кузнецов К.И.**

**Лукашевский М.В.**

**Соколов А.В.**

<b>Щеглов С.А.</b>
--------------------

**Редактор Лукашевский М.В.**

Лабораторный практикум по физике для учащихся  
11 классов лицея № 1502 при МЭИ. Часть II.

Лабораторный практикум является пособием для  
выполнения лабораторных работ по программе  
11 класса ГБОУ Лицей № 1502 при МЭИ. Содержит  
указания к выполнению лабораторных работ и краткие  
теоретические введения к ним.

# Содержание

	<b>стр.</b>
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7(А и Б)	
ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8	
ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИНЗ	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9	
ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В УПРУГОЙ СРЕДЕ	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9А	
ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10	
ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА	37
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 11, 12	
ЯВЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА	46
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА И РАБОТЫ ВЫХОДА ФОТОКАТОДА МЕТОДОМ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12	
СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕМЕНТА	55
ПРИЛОЖЕНИЕ	
НАХОЖДЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПО ГРАФИКУ	60

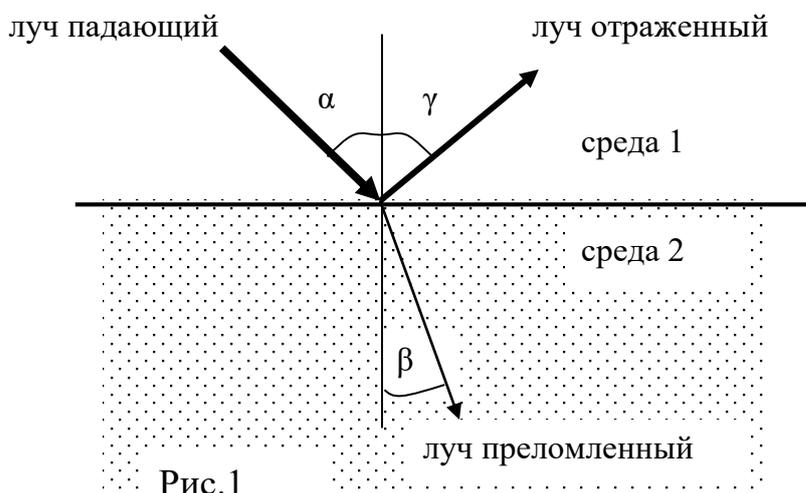
## Изучение оптических явлений на границе раздела сред

### Цель работы

- наблюдение оптических явлений на границе раздела сред;
- изучение законов отражения и преломления;
- определение показателя преломления.

### Теоретические основы работы

При падении луча на границу раздела оптически различных сред возникают два явления: **отражение** света в первую среду и прохождение света во вторую среду в общем случае с изменением направления луча (**преломление**) (рис.1).



#### Закон отражения

*Падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к границе раздела сред, лежат в одной плоскости.*

*Угол падения равен углу отражения.*

#### Закон преломления

*Падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к границе раздела сред, лежат в одной плоскости.*

*Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.*

Закономерности этих явлений можно объяснить с волновой точки зрения. Покажем это, получив формулу закона преломления.

Скорость электромагнитной волны зависит от среды, в которой она распространяется, поэтому при переходе света из одной среды в другую происходит преломление луча.

Величина, характеризующая уменьшение скорости распространения света в среде по сравнению со скоростью его распространения в вакууме, называется оптической плотностью этой среды. Мерой оптической плотности вещества является абсолютный показатель преломления  $n = \frac{c}{v}$ , где  $c$  – скорость распространения света в вакууме,  $v$  – скорость света в веществе.

Экспериментально установленный закон преломления света получает объяснение на основании принципа Гюйгенса, который утверждает, что каждая точка среды, до которой дошло волновое возмущение, сама становится точечным источником вторичных волн (рис.1).

Обозначим скорость волны в первой среде через  $v_1$ , а во второй – через  $v_2$ . Пусть на плоскую границу раздела двух сред  $MN$  падает плоская световая волна с углом падения  $\alpha$ . Волновая поверхность  $AC$  перпендикулярна лучам  $A_1A$  и  $B_1B$ . Поверхности раздела сред сначала достигнет луч  $A_1A$ . Луч  $B_1B$  достигнет поверхности спустя время  $\Delta t = CB/v_1$ . Следовательно, в момент, когда волна в точке  $B$  только начнет возбуждаться, волновая поверхность, распространяющаяся от точки  $A$ , уже имеет вид полусферы радиусом  $AD = v_2 \Delta t$ .

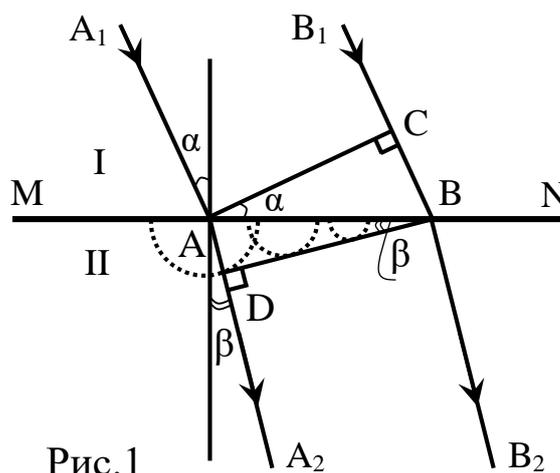


Рис.1

Результирующую плоскую волновую поверхность преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем вторичным сферам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. В данном случае это плоскость  $BD$ .

$$\text{Следовательно,} \quad CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha \quad (1)$$

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta, \quad (2)$$

где  $\beta$  – угол преломления.

Разделив почленно (1) на (2), получим  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21\text{отн}}$ , где  $n_{21\text{отн}}$  – *относительный показатель преломления* второй среды относительно первой, постоянная величина, не зависящая от угла падения. Так как  $n_1 = \frac{c}{v_1}$ , а  $n_2 = \frac{c}{v_2}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, получаем *закон преломления*:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Если показателя преломления первой среды  $n_1=1$  (вакуум, воздух), закон преломления принимает вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (4)$$

где  $n$  – абсолютный показатель преломления второй среды.

Из закона преломления следует, что при переходе луча из оптически менее плотной среды в оптически более плотную угол  $\beta$  меньше угла  $\alpha$  и наоборот. Если луч идет на границу раздела сред *из оптически более плотной среды*, при некотором значении угла падения  $\alpha_{\text{пред}}$  угол преломления формально составит  $90^\circ$ . Фактически преломленного луча просто нет, при углах падения, больших (или равных) предельному углу вся световая энергия полностью отражается в среду падения (явление полного внутреннего отражения). Значение предельного угла падения определяется из закона преломления:

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

При прохождении луча через плоскопараллельную пластину происходит преломление на обеих границах раздела сред (рис.2). В результате луч смещается в поперечном направлении на расстояние  $a$  тем сильнее, чем толще пластина и больше показатель преломления материала пластины.

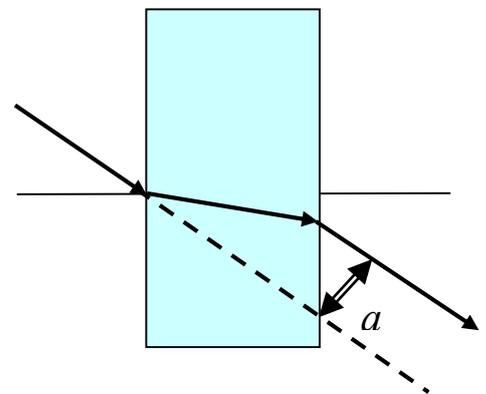


Рис.2

## Описание установки

В работе 7А исследуются оптические явления на границе раздела сред с использованием тела, имеющего форму полуцилиндра.

Установка для изучения оптических свойств полуцилиндра показана на рис.3. От осветителя (1) с узкой щелью луч падает на поверхность полуцилиндра (2), лежащего на диске кругового транспортера (3), так что их центры совпадают.

В работе 7Б исследуются оптические явления на границе раздела сред с использованием тела, имеющего форму прямой призмы с основанием в виде трапеции. Это тело можно рассматривать и как плоскопараллельную пластину.

Установка для изучения оптических свойств плоскопараллельной пластины показана на рис.4. От осветителя (1) с узкой щелью луч падает на короткую грань плоскопараллельной пластины (3), лежащей на листе бумаги (2).

Для измерения линейных размеров необходима миллиметровая линейка.

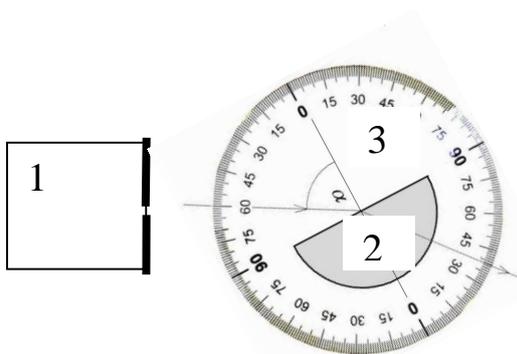


Рис.3

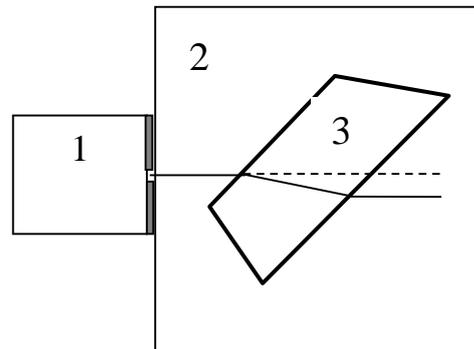


Рис.4

**Порядок выполнения работы 7А.** Изучение оптических свойств материала полуцилиндра (пц).

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1					

*Опыт 1А. Наблюдение явлений на границе раздела сред. Проверка закона отражения. Определение показателя преломления стекла ( $n_{ст.1}$ ) при переходе луча из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную*

2. Установите полуцилиндр на диске кругового транспортира, совместив их центры, так чтобы линия нулевого угла являлась нормалью к плоскости полуцилиндра, как показано на рис. 5.
3. Включите осветитель и добейтесь падения луча *в центр полуцилиндра* под углом  $\alpha_1 \sim 60 - 70^\circ$  к нормали. Запишите значения угла падения  $\alpha_1$  в протокол.
4. Наблюдайте явления отражения и преломления на плоской границе раздела сред, определите значение углов отражения  $\gamma_1$  и преломления  $\beta_1$  запишите в **таблицу 2**.

**Таблица 2.** Измерение углов отражения  $\gamma_1$

№	$\gamma_1$ , град	$ \Delta \gamma_1 $ , град	$\beta_1$ , град	$ \Delta \beta $ град
1				
2				
3				
Средн.				

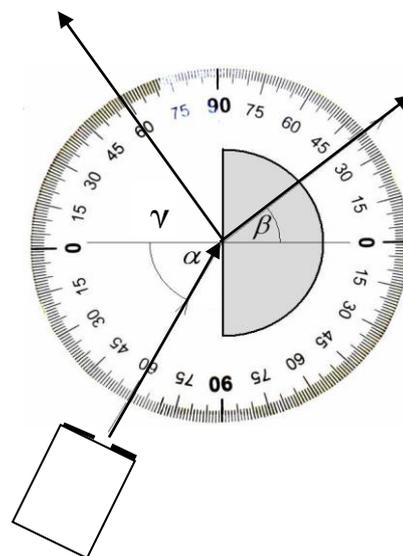


Рис.5

и преломления  $\beta_1$  при падении луча из среды оптически менее плотной.

Угол падения  $\alpha_1 = \dots \pm 1^\circ$

5. Поверните диск с полуцилиндром вокруг общей оси так, чтобы луч падал *в ту же точку с другой стороны под тем же углом*, что и в п.3. Запишите значения углов отражения  $\gamma_1$  и преломления  $\beta_1$  в таблицу.
6. Вновь поверните диск в первое положение и повторите опыт в соответствии с пп. 3-5.
7. Повторяя опыт, получите три значения углов отражения и преломления в **таблице 2**.

Опыт 2А. Наблюдение явлений на границе раздела сред. Проверка закона отражения. Определение показателя преломления стекла ( $n_{ст,2}$ ) при переходе луча из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную

8. Руководствуясь рисунком 6, расположите полуцилиндр на диске кругового транспортира, совместив их центры, так чтобы линия нулевого угла являлась нормалью к плоскости полуцилиндра, а луч падал на плоскую границу раздела из стекла.
9. *Опыт 2А* выполните так же, как *Опыт 1А*. Угол падения луча на плоскую границу раздела устанавливайте  $\alpha_2 \sim 25 - 30^\circ$ . Результаты измерений заносите в **таблицу 3**.

**Таблица 3.** Измерение углов отражения  $\gamma_2$  и преломления  $\beta_2$  при падении луча из среды оптически более плотной.

Угол падения  $\alpha_2 = \dots \pm 1^\circ$

№	$\gamma_2$ град	$ \Delta \gamma_2 $ , град	$\beta_2$ , град	$ \Delta \beta $ , град
1				
2				
3				
Средн.				

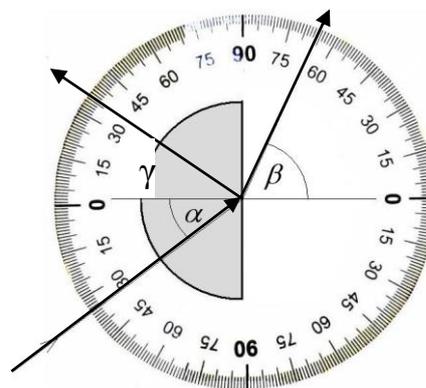


Рис.6

Опыт 3А. Определение показателя преломления стекла ( $n_{ст,3}$ ) по углу полного внутреннего отражения

10. Сохраните положение приборов, как в опыте 2А, и руководствуйтесь рисунком 7.
11. Поворачивайте диск с полуцилиндром вокруг общей оси, увеличивая угол падения. Наблюдайте за ростом угла преломления, обратите внимание на *изменение яркости преломленного луча*.
12. Получите такой угол падения  $\alpha_{пред}$ , при котором угол преломления близок к  $90^\circ$  (практически – преломленный луч исчезает);
13. Измерьте предельный угол падения  $\alpha_{пред}$ , результаты запишите в **таблицу 4**.

14. Поверните диск с полуцилиндром вокруг общей оси на угол  $\sim 100-120^\circ$  по направлению к падающему лучу и повторите пп. 11-13.
15. Проведите измерения предельного угла падения 3 раза. Результаты занесите в **таблицу 4**.

**Таблица 4.** Измерение предельного угла полного внутреннего отражения.

№	$\alpha_{\text{пред}}$ град	$ \Delta\alpha $ град
1		
2		
3		
Среднее		

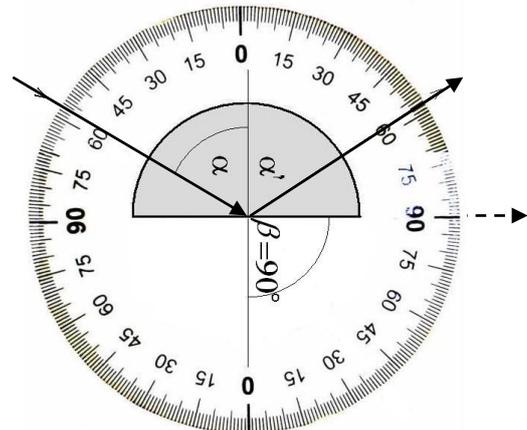


Рис.7

*Опыт 4А. Исследование зависимости показателя преломления от угла падения*

16. Повторите опыт 1А по пп. 2-4 при различных углах падения, указанных в таблице 5.

**Таблица 5.** Исследование зависимости показателя преломления от угла падения.

$\alpha$ , град	$\beta$ , град	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n$
75				
60				
45				

## Обработка результатов измерений по работе 7А

1. По результатам *Опыта 1А* рассчитайте среднее значение углов отражения  $\gamma_1$  и преломления  $\beta_1$  при угле падения  $\alpha_1$ .
2. Сравните среднее значение углов отражения  $\gamma_{1\text{ср}}$  со значением угла падения  $\alpha_1$  и сделайте вывод о справедливости закона отражения.
3. Рассчитайте значение показателя преломления материала полуцилиндра  $n_{\text{пц}}$  по формуле:

$$n_{\text{пц},1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_{1\text{ср}}}.$$

4. Аналогичным способом обработайте результаты *Опыта 2А*, получите значение показателя преломления полуцилиндра  $n_{\text{пц}}$  из

формулы: 
$$\frac{1}{n_{\text{пц},2}} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_{2\text{ср}}}.$$

5. По результатам *Опыта 3А* рассчитайте средние значения предельных углов падения  $\alpha_{\text{пред.}}$ .
6. Рассчитайте значение показателя преломления материала

полуцилиндра  $n_{\text{пц}}$  по формуле: 
$$n_{\text{пц},3} = \frac{1}{\sin \alpha_{\text{пред.ср}}}.$$

7. Рассчитайте среднее значение показателя преломления материала полуцилиндра  $n_{\text{пц}}$  по результатам трех опытов.
8. Для одного из опытов (1 или 2, по указанию преподавателя) найдите погрешность косвенного изменения  $n_{\text{пц}}$ :

$$\delta n_{\text{пц}} = \sqrt{\text{ctg}^2 \alpha \cdot \Delta \alpha^2 + \text{ctg}^2 \beta \cdot \Delta \beta^2}$$
$$\Delta n_{\text{пц},\text{ср}} = n_{\text{пц},\text{ср}} \cdot \delta n_{\text{пц}},$$

где  $\Delta \alpha = \Delta \alpha_{\text{приб}}$ ,  $\Delta \beta = \sqrt{\Delta \beta_{\text{приб}}^2 + \Delta \beta_{\text{случ}}^2}$ ,  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \beta$  выражены в радианах.

9. Запишите окончательный результат определения значения показателя преломления полуцилиндра  $n_{\text{пц},\text{ср}}$  с абсолютной погрешностью косвенного измерения в стандартном виде.
10. По результатам *Опыта 4А*, используя формулу (4), рассчитайте и занесите в **таблицу 5** значения показателя преломления при различных углах падения.

11. Убедитесь, что полученные значения показателя преломления при различных углах падения одинаковы в пределах погрешности, рассчитанной в п. 8.

### Порядок выполнения работы 7Б. Изучение оптических свойств материала призмы (плоскопараллельной пластины)

Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	линейка				

#### *Опыт 1Б. Определение показателя преломления ( $n_{пр1}$ ) и бокового смещения луча*

1. Установите призму на листе бумаги так, чтобы луч падал на короткую грань, как показано на рис. 4, 8.
2. Обведите призму карандашом. При дальнейших операциях следите, чтобы это положение призмы на листе не менялось.
3. Направьте луч на короткую грань, как показано на рис. 8, чтобы угол падения  $\alpha_1$  составил  $\sim 60-70^\circ$ .
4. Наблюдайте явления отражения и преломления на обеих границах раздела сред, зарисуйте картину хода лучей в протоколе.
5. Отметьте на листе точку падения луча на призму, точку выхода и ещё по одной точке на падавшем луче и на вышедшем. Это позволит при обработке результатов начертить ход луча.
6. Уменьшите угол падения до значения близкого к  $45^\circ$  и повторите операции п. 5.
7. Ещё уменьшите угол падения до значения близкого к  $30^\circ$  и повторите операции пп. 3-5.
8. Извлеките лист, начертите ход трёх лучей и покажите преподавателю.

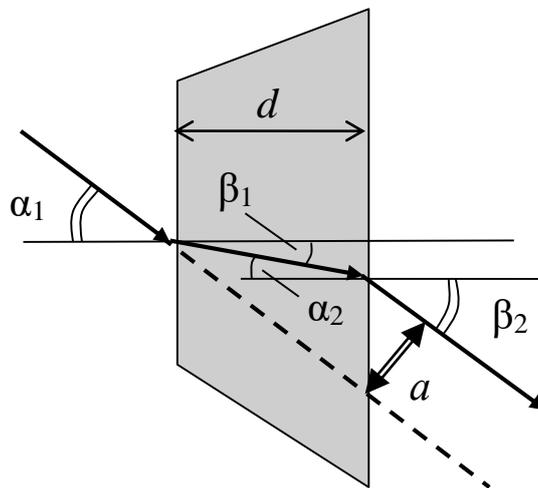


Рис. 8

## Обработка результатов измерений по работе 7Б

1. По чертежу, подобному рис. 8, 9 полученному в ходе *Опыта 1Б*, определите синусы углов падения и преломления для всех лучей на одной и другой границе раздела сред, занесите значения в **таблицу 2**. Для определения синусов углов следует, достроить прямоугольные треугольники (рис.10) и, измерив линейкой катет и гипотенузу, рассчитать синусы:

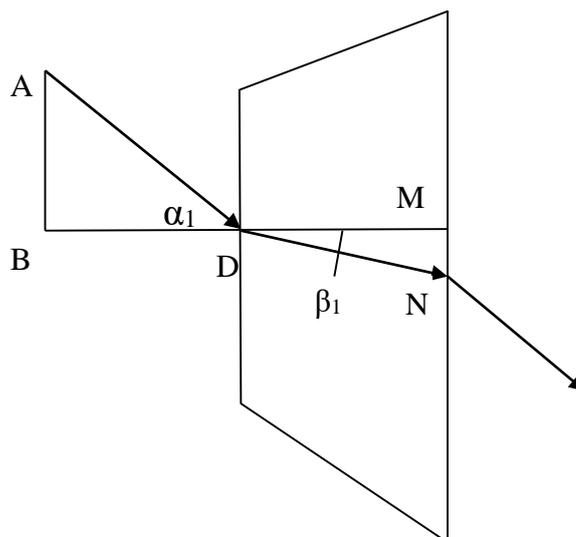


Рис. 9

$$\sin \alpha_1 = \frac{AB}{AD} \quad \sin \beta_1 = \frac{MN}{DN}$$

2. Рассчитайте значения показателя преломления материала призмы  $n_{пр}$ , используя формулы

$$n_{пр.1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1}; \quad \frac{1}{n_{пр.2}} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2};$$

для всех лучей и всех случаев преломления и занесите в **таблицу 2**.

**Таблица 2.** Результаты исследования хода лучей через призму (плоскопараллельную пластину)

№ луча	1	2	3	среднее
$\sin \alpha_1$				////////////////////
$\sin \beta_1$				////////////////////
$n_1$				
$\sin \alpha_2$				////////////////////
$\sin \beta_2$				////////////////////
$n_2$				

3. Сравните значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  с учетом приборной погрешности и *сделайте вывод* о характере прохождения луча через плоскопараллельную пластину.

4. По результатам *Опыта 1Б* измерьте линейкой боковое смещение одного из лучей  $a_{\text{экспер}}$  в результате прохождения через пластину (рис. 8) и запишите в протокол.
5. Измерьте по рисунку толщину пластинки  $d$ , запишите в протокол и рассчитайте теоретическое значение смещения  $a_{\text{теор}}$  по формуле:

$$a_{\text{теор}} = d \sin \alpha \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right).$$

6. Сравните  $a_{\text{экспер}}$  и  $a_{\text{теор}}$  и сделайте вывод о совпадении экспериментального результата с теоретической формулой.

### Литература

1. Под ред. Пинского А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995. § 40-41.
2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. Физика 11. Оптика. Квантовая физика, М., Дрофа, 2002. §§ 1.13-1.15.

### Контрольные вопросы

1. Что такое световой луч?
2. Какие оптические явления происходят на границе раздела двух сред?
3. Сформулируйте закон отражения света.
4. Как формулируется закон преломления?
5. Что такое абсолютный показатель преломления? В каких единицах измеряется?
6. Каков физический смысл относительного показателя преломления? Абсолютного показателя преломления?
7. В чем состоит явление полного внутреннего отражения?
8. Запишите формулу для определения предельного угла полного внутреннего отражения света.
9. Какие величины измеряются в ходе работы?
10. Какие величины являются результатом косвенных измерений?
11. Постройте ход лучей для опыта по указанию преподавателя.
12. (А) Каков угол падения луча на цилиндрическую поверхность, если он прошёл через центр полуцилиндра?
13. Каково значение показателя преломления воздуха (принято в работе)?

14. Выразите связь относительного показателя преломления двух граничащих сред с их абсолютными показателями преломления.
15. Что называется предельным углом полного отражения?
16. (Б) Выведите формулу для расчета бокового смещение луча в результате прохождения через плоскопараллельную пластину.
17. Начертите и объясните ход лучей через треугольную призму
18. Начертите и объясните ход лучей через плоскопараллельную пластину.
19. Начертите и объясните ход лучей через полуцилиндр.

## Изучение оптических свойств линз

### Цель работы

- получение изображений с помощью собирающей линзы и системы линз;
- определение фокусного расстояния собирающей линзы двумя способами;
- определение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

### Теоретические основы работы

Линзой называется прозрачное тело (обычно из стекла), ограниченное двумя сферическими поверхностями. *Основное свойство* линзы: падающий на неё параллельный пучок лучей преломляется так, что лучи *сходятся* в одной точке – фокусе, если линза *собирающая* или *расходятся* так, что их продолжения сходятся в одной точке – фокусе, если линза *рассеивающая* (рис.1,2). Тонкой называется линза, толщина которой мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих её сферических поверхностей.

Ещё несколько определений, иллюстрированных рисунками 1 и 2.

Главная оптическая ось (2) – прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, образующих линзу.

Оптический центр (о) – точка пересечения линзы и главной оптической оси.

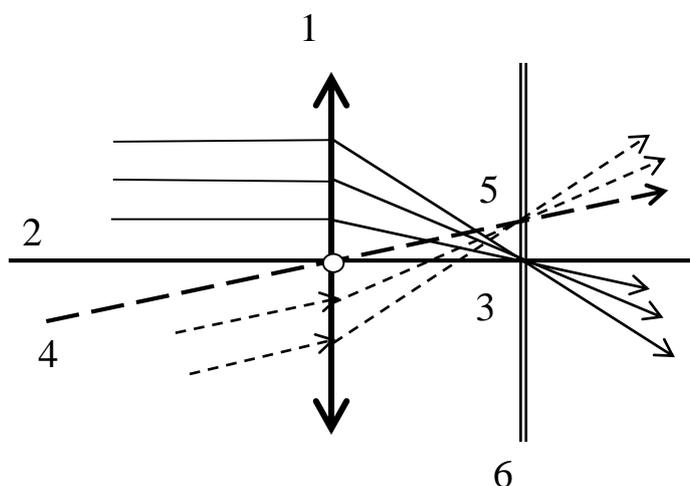


Рис. 1

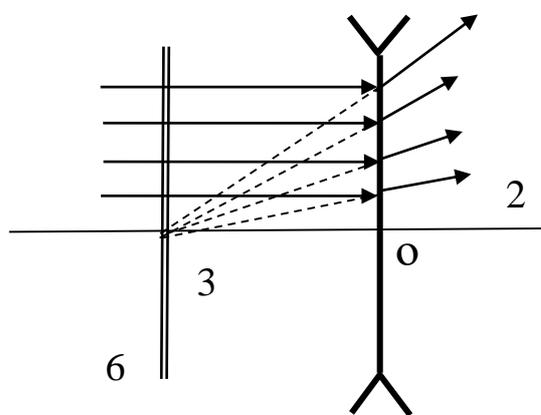


Рис. 2

Главный фокус (3) – точка пересечения лучей (или их продолжений), падавших на линзу параллельно главной оптической оси.

Фокальная плоскость (6) – плоскость, проходящая через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси, – геометрическое место побочных фокусов.

Побочная оптическая ось (4) – любая прямая, проходящая через оптический центр.

Побочный фокус (5) – точка пересечения побочной оптической оси (4) с фокальной плоскостью (6).

Связь между положениями предмета, его изображения и свойствами линзы определяется формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1),$$

где  $F$  – расстояние от линзы до ее фокуса (фокусное расстояние),  $d$  – расстояние от предмета до линзы,  $f$  – расстояние от линзы до изображения.

Оптической силой линзы называется величина, обратная фокусному расстоянию:  $D = \frac{1}{F}$  выражается в *диоптриях*.

Линейным увеличением линзы называется отношение линейного размера изображения  $H$  к соответствующему линейному размеру

предмета  $h$ :

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad (2)$$

Для экспериментального определения фокусного расстояния собирающей линзы используется метод получения действительных изображений (увеличенного и уменьшенного) и формула линзы.

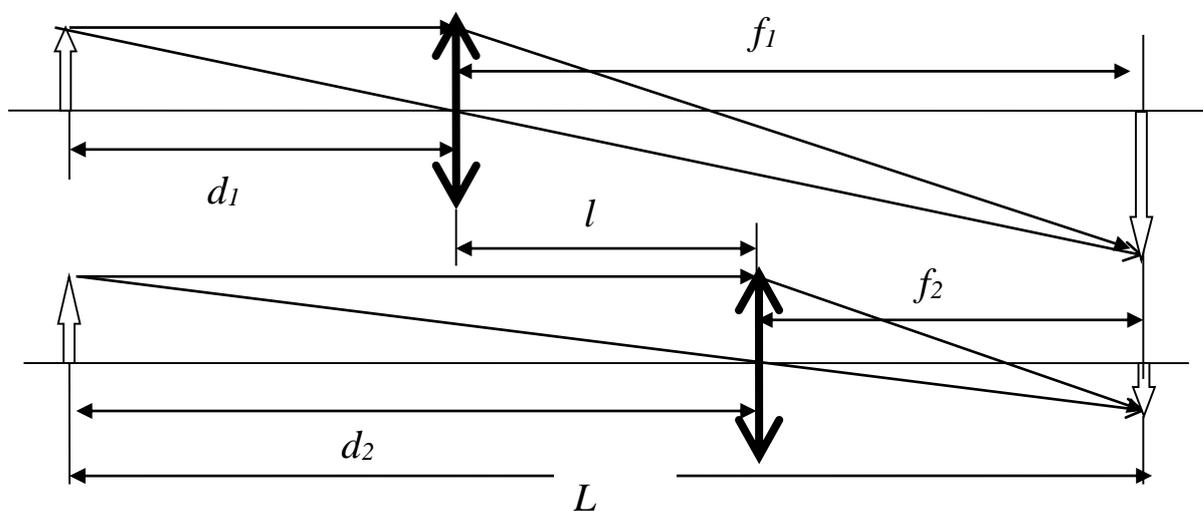


Рис.3

Из (1) следует:

$$F_1 = \frac{fd}{f + d} \quad (3)$$

Увеличенное и уменьшенное изображения можно получить, не изменяя расстояние  $L$  между предметом и экраном, а только перемещая линзу на расстояние  $l$  (рис.3). В этом случае фокусное расстояние определяется формулой:

$$F_2 = \frac{L^2 - l^2}{4L} \quad (4)$$

Рассеивающая линза действительных изображений не даёт. Для экспериментального определения её фокусного расстояния рассеивающая линза используется в системе с собирающей (рис.4). Мнимое изображение  $A'$  предмета  $A$ , даваемое рассеивающей линзой, служит «предметом» для следующего оптического прибора системы – собирающей линзы. В результате на экране получается действительное изображение  $A''$ .

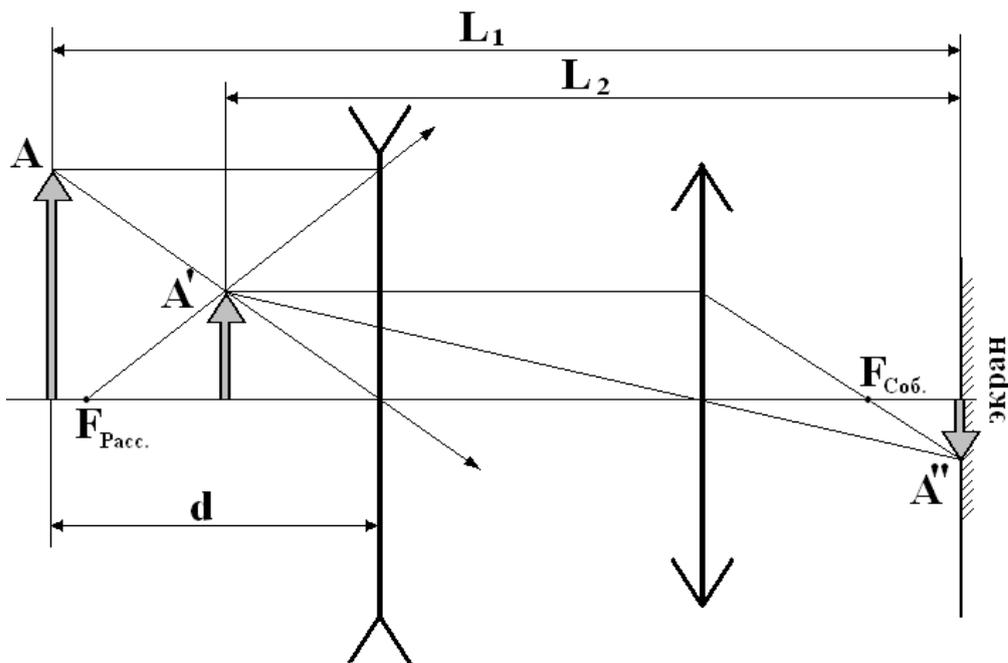


Рис.4

Применив формулу рассеивающей линзы с учетом обозначений, показанных на рис. 4, получаем для фокусного расстояния линзы:

$$F_{\text{расс}} = \frac{d(d - L_1 + L_2)}{L_2 - L_1}. \quad (5)$$

## Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 5, а) представляет собой оптическую направляющую (1), на которой установлены рейтеры (2) с осветителем (3), экраном (4) и линзой (5). Осветитель питается от источника (6). «Предметом» является слайд-транспарант (рис. 5, б), установленный на осветителе. Для измерений используются линейка оптической направляющей и миллиметровая линейка на экране.

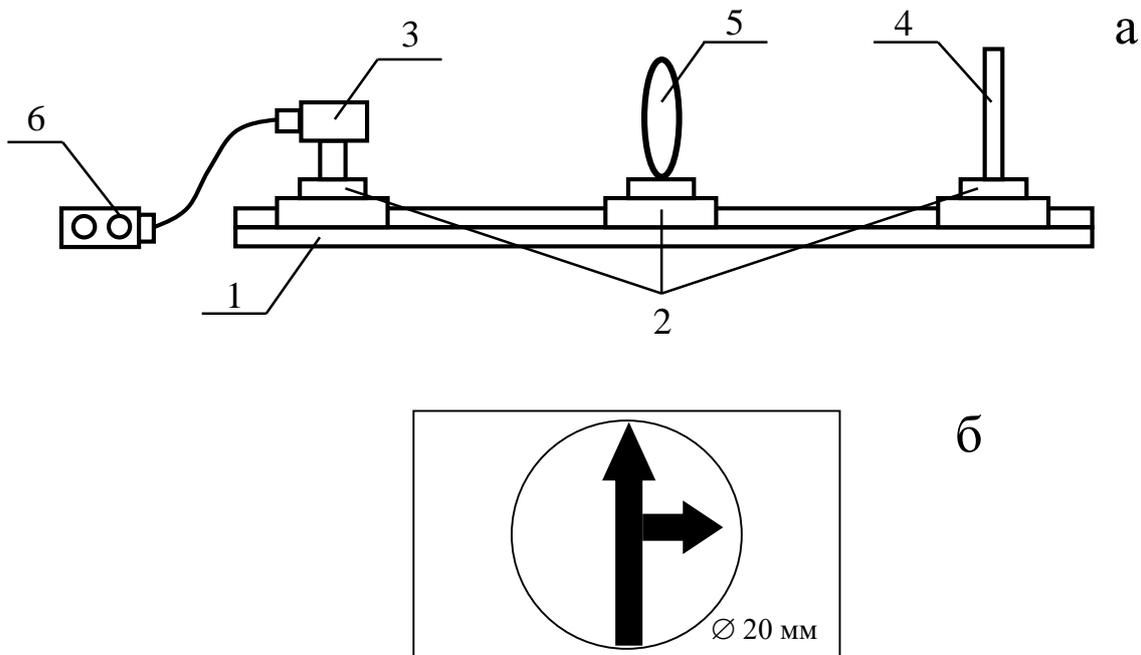


Рис. 5

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1					
2					

Транспарант от осветителя устанавливается на расстоянии 2-3 см. для получения оптимальной контрастности.

Опыт 1. Изучение изображений, создаваемых с помощью собирающей линзы. Определение фокусного расстояния собирающей линзы первым способом

2. Тумблером “сеть” на источнике питания включите осветитель.
3. Запишите в протокол диаметр окружности на транспаранте –  $h$ , линейный размер «предмета».
4. Перемещая рейтеры, получите на экране четкое изображение транспаранта.
5. Запишите в **таблицу 2** три характеристики полученного изображения (увеличенное или уменьшенное, прямое или обратное, действительное или мнимое).
6. Измерьте и запишите в **таблицу 2** линейный размер выбранного отрезка изображения  $H$ , расстояния  $d$  и  $f$ .
7. Измените положения рейтеров, получите изображение, отличное от первого и повторите операции пп. 4, 6.
8. Перемещая рейтеры, повторите опыт ещё три раза, получая разные изображения. Размер уменьшенного изображение должен быть больше 1 см. Выключите осветитель и покажите результаты преподавателю.

**Таблица 2.** Результаты исследования изображений, получаемых с собирающей линзой.

Линейный размер «предмета»  $h = \dots\dots\dots$ ,  $\Delta h = \dots\dots\dots$

№	характеристики изображения	$d$ , см	$f$ , см	$H$ , см	$\Gamma$		$F_1$ , см
					$H/h$	$f/d$	
1							
2							
3							
4							
5							
				среднее значение $F$			

Опыт 2. Определение фокусного расстояния собирающей линзы вторым способом

9. Установите значение расстояния от предмета до экрана  $L$  по указанию преподавателя, запишите в протокол. Включите осветитель.
10. Перемещая рейтер с линзой, получите на экране четкое *увеличенное* изображение предмета. Измерьте и запишите в **таблицу 3** значения  $d_1$  и  $f_1$  (рис.3).
11. Перемещая *только рейтер с линзой*, получите на экране четкое *уменьшенное* изображение предмета. Измерьте и запишите в **таблицу 3** значения  $d_2$  и  $f_2$ .
12. Повторите опыт ещё два раза, не изменяя  $L$ , в соответствии с пп. 10-11.

**Таблица 3.** Результаты исследования изображений при неизменном расстоянии между предметом и экраном  $L = \dots\dots\dots$

№	увеличенное изображение		уменьшенное изображение		$l$ , см	$ \Delta l $ , см
	$d_1$ , см	$f_1$ , см	$d_2$ , см	$f_2$ , см		
1						
2						
3						
				среднее		

Опыт 3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

(проводится по схеме, приведённой на рис. 4)

13. Рассеивающую линзу поставьте перед собирающей линзой на расстоянии  $d > 10$  см от «предмета» и, перемещая *собирающую* линзу, получите на экране четкое изображение. Запишите в протокол значение расстояния  $L_1$  от предмета до экрана и расстояние  $d$  от предмета до рассеивающей линзы, см. рис. 4.
14. Уберите рассеивающую линзу и, *не сдвигая собирающую линзу и экран*, передвиньте «предмет» (осветитель с транспарантом) так, чтобы на экране вновь возникло его четкое изображение. Измерьте расстояние от транспаранта до экрана  $L_2$  и запишите в протокол.

## Обработка результатов измерений

### Опыт 1

1. По данным **таблицы 2** рассчитайте линейные увеличения двумя способами, сопоставьте полученные значения с наблюдаемым видом изображения. *Сделайте выводы* о зависимости линейного увеличения от расстояния между линзой и предметом.
2. Рассчитайте фокусное расстояние собирающей линзы по формуле (3) для всех пяти случаев **таблицы 2** и его среднее значение.
3. Рассчитайте погрешность косвенного измерения фокусного расстояния для одного случая по указанию преподавателя по формуле:

$$\Delta F_1 = \frac{\sqrt{(2f - d)^2 \cdot d^2 \cdot \Delta f^2 + (2d - f)^2 \cdot f^2 \cdot \Delta d^2}}{(f + d)^2}$$

где  $\Delta d$  и  $\Delta f$  считать равными приборной погрешности.

4. Представьте результат измерения среднего значения фокусного расстояния в стандартном виде с погрешностью.
5. Рассчитайте погрешности двух способов косвенного измерения линейного увеличения для одного случая по указанию преподавателя по формулам:

$$\delta \Gamma_1 = \sqrt{\delta H^2 + \delta h^2}; \quad \Delta \Gamma_1 = \Gamma_1 \delta \Gamma_1$$

$$\delta \Gamma_2 = \sqrt{\delta f^2 + \delta d^2}; \quad \Delta \Gamma_2 = \Gamma_2 \delta \Gamma_2$$

6. Сравните результаты измерения линейного увеличения двумя способами с учетом погрешностей. *Сделайте выводы*.
7. Рассчитайте оптическую силу линзы  $D$ , используя результаты опыта.

### Опыт 2

8. По данным **таблицы 3** рассчитайте  $l = |d_1 - d_2|$  и его среднее значение, занесите в таблицу.
9. Рассчитайте фокусное расстояние собирающей линзы по формуле (4), используя среднее значение  $l$ .
10. Рассчитайте погрешность косвенного измерения фокусного расстояния по формуле:

$$\Delta F_2 = \sqrt{\left(\frac{L^2 + l^2}{4L^2}\right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{l}{2l}\right)^2 \cdot \Delta l^2}$$

где  $\Delta l = 2\Delta d_{\text{приб}}$ ,  $\Delta L = \Delta L_{\text{приб}}$ .

11. Представьте результат измерения фокусного расстояния собирающей линзы вторым способом в стандартном виде с погрешностью и сравните с результатом первого опыта.

### Опыт 3

12. Рассчитайте фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле (5).

13. Рассчитайте оптическую силу рассеивающей линзы  $D$ , используя результаты опыта. Сравните с оптической силой собирающей линзы.

### **Литература**

1. П. ред. Пинского А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995. § 43.
2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. Физика 11. Оптика. Квантовая физика, М., Дрофа, 2002. §§ 1.18-1.20.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется линзой? Какие линзы существуют?
2. Какую линзу называют тонкой? Что такое оптический центр тонкой линзы?
3. Что называется главной оптической осью? Побочной оптической осью?
4. Что называется фокусом линзы? В каком случае фокус линзы действительный, а в каком – мнимый?
5. Какого вида изображения можно получить с собирающей линзой? Сделайте построения.
6. Какого вида изображения можно получить с рассеивающей линзой? Сделайте построения.
7. Напишите формулу тонкой линзы. Каковы правила постановки знаков в формуле?
8. Что называется линейным увеличением линзы?
9. Что называется оптической силой линзы? В каком случае оптическая сила положительная, а в каком отрицательная?
10. Какие величины измеряются в ходе работы?
11. Какие величины являются результатом косвенных измерений?
12. Выведите формулу для расчета оптической силы собирающей линзы по результатам Опыта 1.
13. Выведите формулу для расчета оптической силы собирающей линзы по результатам Опыта 2.
14. Выведите формулу для расчета оптической силы рассеивающей линзы по результатам Опыта 3.

## Изучение распространения волн в упругой среде

### Цель работы

- изучение распространения волн в упругой среде;
- изучение явления интерференции волн на примере акустического интерферометра;
- экспериментальное определение скорости звука в воздухе.

### Теоретические основы работы

Волной называется распространение колебательного процесса в пространстве. Звуковая волна в воздухе – продольная упругая волна. Под действием источника звука (колеблющейся мембраны, струны, голосовых связок) возникают области «сгущения» молекул воздуха, где давление на малую величину  $\Delta p$  превышает атмосферное давление. Газ расширяется в соседние области, молекулы приобретают направленную скорость  $\vec{u}$  и по инерции «проскакивают» положение равновесия. Область сжатия распространяется от источника, а позади нее образуется область разрежения газа. Колебания молекул газа происходят около положения равновесия вдоль направления распространения волны например, по гармоническому закону:  $S = S_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ , где  $S_m$  – амплитуда колебаний,  $\varphi_0$  – начальная фаза, зависящая от координаты точки волны,  $\omega$  – циклическая частота. Колебания давления происходят по такому же закону около равновесного значения атмосферного давления  $p_0$ :  $p = p_0 + \Delta p = p_0 + p_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ , где,  $p_m$  – максимальное значение возмущения давления  $\Delta p$ ,  $p$  – мгновенное значение давления.

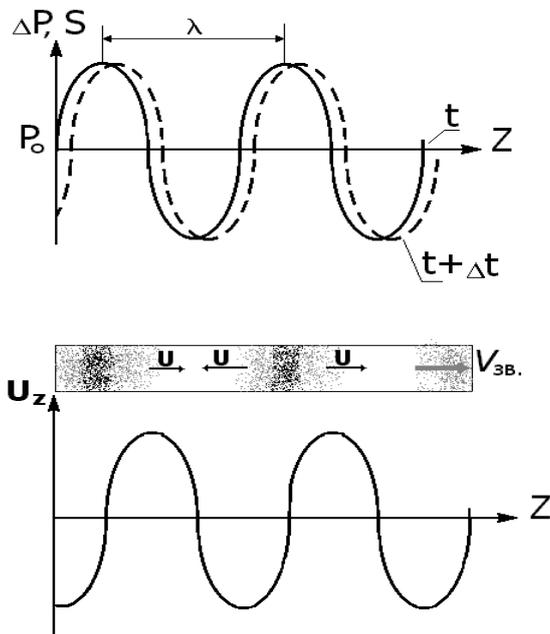


Рис.1

Через малое время  $\Delta t$ , много меньшее, чем период колебания частиц, волновой процесс переместится вдоль оси  $Z$  (пунктирная линия на верхнем графике). Такая волна называется бегущей. Все точки плоской бегущей волны колеблются с одной амплитудой, но чем дальше точка от источника, тем больше колебание отстает по

фазе. Уравнение плоской бегущей волны  $S = S_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z)$ , где  $S_m$  – амплитуда волны,  $\lambda$  – длина волны,  $Z$  – расстояние, пройденное волной от начала координат. «Сгущения» газа перемещаются со скоростью, которая и является скоростью звука  $V_{зв}$ .

Расстояние, на которое волна перемещается за время одного полного колебания частиц (период  $T$ ), называется длиной волны:  $\lambda = V_{зв} \cdot T$  или  $\lambda = \frac{V_{зв}}{\nu}$ , так как  $\nu = \frac{1}{T}$ . Определив длину волны и частоту колебаний, можно вычислить скорость волны:

$$V_{зв.экспер.} = \lambda \nu \quad (1)$$

Частота звуковых колебаний определяется источником звука. Длину волны можно измерить экспериментально, используя явление интерференции.

Интерференцией называется результат сложения двух или более волн от когерентных источников, характеризующийся увеличением амплитуды колебаний в одних точках пространства и уменьшением – в других. Явление интерференции акустических (звуковых) волн используется при измерении длины волны в акустическом интерферометре.

Принципиальная схема интерферометра представлена на рисунке 2.

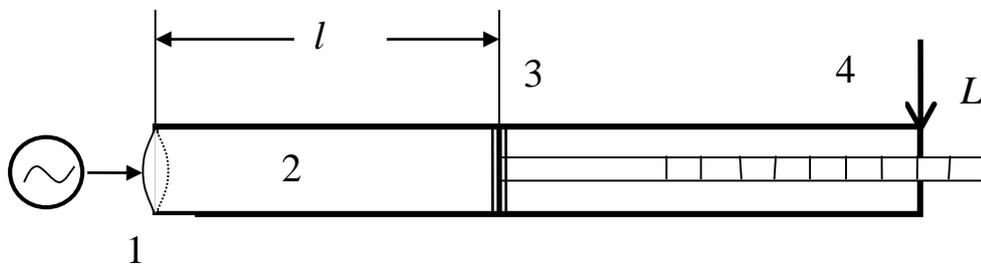


Рис.2

Источником звуковых волн является плоская мембрана (1). Волна распространяется вдоль канала (2) со скоростью звука, достигает отражателя (3), плоскость которого параллельна плоскости излучателя. Отразившись от него, волна распространяется в обратном направлении и вновь отражается от мембраны излучателя. Если при отражении от мембраны фаза отражаемого сигнала (эхо-сигнала) совпадает с фазой излучаемого сигнала – их амплитуды складываются, и громкость звука увеличивается. Такое «благоприятное» сложение происходит, если на длине акустического пути  $2l$  (расстояния от излучателя до отражателя и обратно) фаза волны меняется на величину, кратную  $2\pi$ . Для этого отраженная волна должна пройти расстояние кратное целому числу

длин волн. Перемещение отражателя (изменение длины акустического пути) приводит к изменению условий сложения волн, изменению амплитуды результирующих колебаний, то есть громкости звука. Изменение положения отражателя фиксируется по шкале (4).

Первое усиление звука (первый интерференционный максимум) происходит при разности хода падающей и отраженной волн равной длине волны, то есть при условии  $l_1 = \lambda/2$ . При увеличении этого расстояния на половину длины волны, то есть при разности хода  $2\lambda$ , возникает второй интерференционный максимум. Таким образом, расстояние между положениями отражателя, соответствующими соседним интерференционным максимумам, равно половине длины волны.

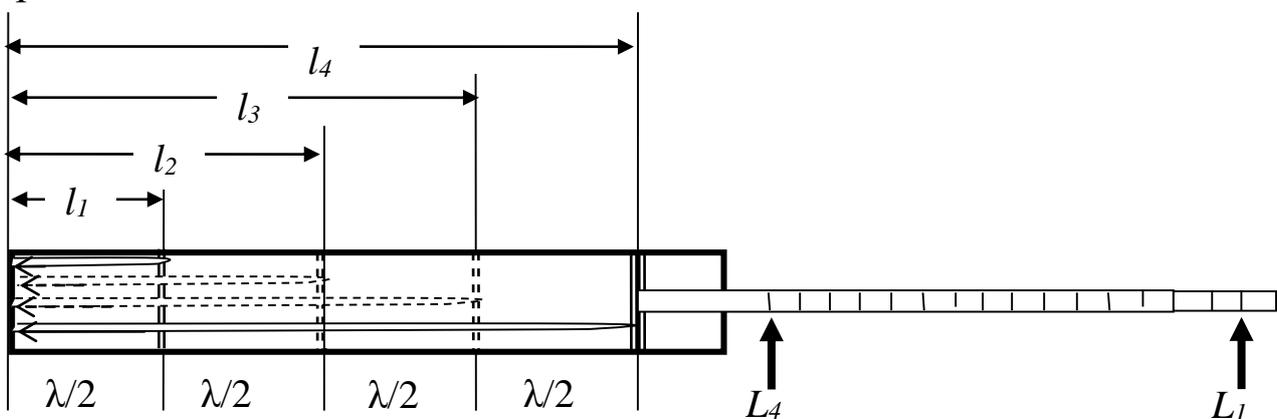


Рис.3

Пусть  $L_1$  и  $L_4$  – показания шкалы, соответствующие первому и четвертому интерференционным максимумам (рис.3). Очевидно, что

$$|L_4 - L_1| = 3 \lambda/2,$$

откуда значение длины волны определяется формулой:

$$\lambda = \frac{2}{3} |L_4 - L_1| \quad (2)$$

При распространении упругой волны в газе происходит изменение параметров газа (давления, плотности). Так как эти процессы происходят быстро, процесс распространения звуковой волны в воздухе можно считать адиабатным.

В этом случае можно показать, что скорость звуковой волны в идеальном газе определяется формулой:

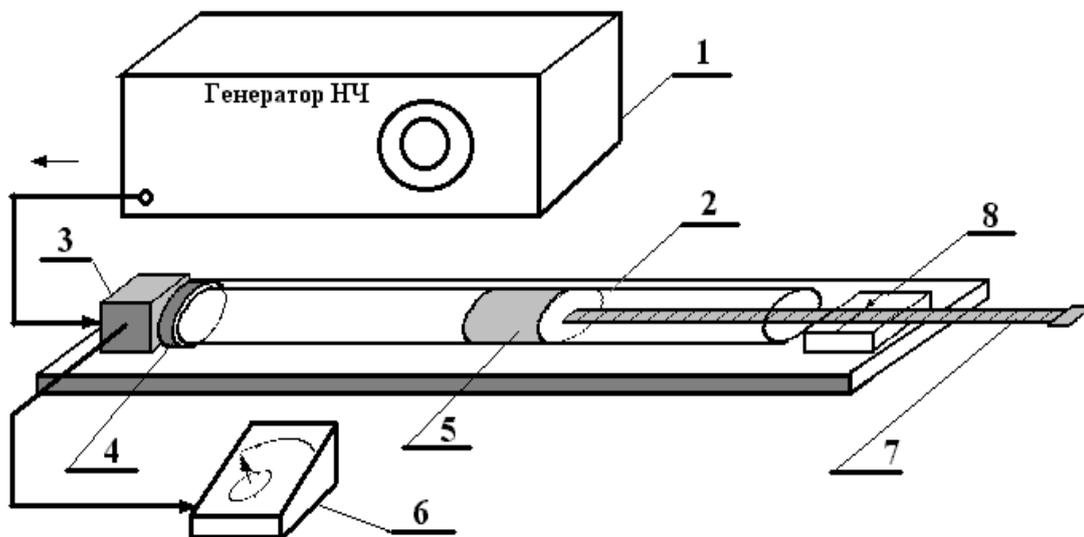
$$V_{зв.теор.} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \frac{R}{\mu} T} \quad (3),$$

где  $T$  – абсолютная температура,  $C_p$  и  $C_v$  – молярные теплоемкости при изобарном и изохорном процессах соответственно,

$R=8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная,  $\mu$  – молярная масса газа. Молярные теплоемкости зависят от  $i$  – числа степеней свободы молекулы газа:  $C_p = \frac{i+2}{2}R$ ;  $C_v = \frac{i}{2}R$ . Для воздуха  $i = 5$ ,  $\mu=29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, подставив в формулу (3), получаем:

$$V_{зв.теор.} = 20\sqrt{T} \text{ (м/с)} \quad (4)$$

## Описание установки



1. Электрический генератор звуковой частоты.
2. Акустический волновод (труба).
3. Устройство, преобразующее звуковой сигнал в электрический.
4. Мембрана-излучатель звуковой волны.
5. Отражатель звуковой волны.
6. Микроамперметр.
7. Шток отражателя с миллиметровой линейкой.
8. Визир линейки.

Звуковая волна возбуждается в трубе (2) с помощью мембраны-излучателя (4), сигнал на которую подается с генератора синусоидальных колебаний (1). Перемещая отражатель (5), можно установить длину воздушного столба соответствующую условию первого интерференционного максимума:  $l_1 = \frac{\lambda}{2}$ , (рис.3). При этом микроамперметр (6) показывает максимальное значение силы тока. Положение отражателя определяется числом  $L_1$  делений линейки (7), закреплённой на штоке отражателя; отсчет производится по визиру

(8). Перемещая отражатель вправо, следующее максимальное отклонение стрелки микроамперметра будем наблюдать, когда длина воздушного столба увеличится на половину длины волны:  $l_2 = 2 \frac{\lambda}{2}$ , отсчёт по визиру составит  $L_2$  – и так далее. Используя формулу (2), можно рассчитать длину волны.

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	Генератор звуковой частоты (марка)				
2	Термометр				
3	Линейка				

2. Включите звуковой генератор. Запишите в протокол значение рабочей частоты, указанной на установке, с погрешностью.
3. Медленно перемещая отражатель, найдите такое его положение, при котором наблюдается максимальное отклонение стрелки микроамперметра. Запишите в **таблицу 2** значение положения визира на линейке  $L_1$ .
4. Перемещая отражатель далее, найдите второй, третий и четвертый максимумы. Положение линейки, соответствующее четвертому максимуму  $L_4$ , запишите в таблицу.
5. По показаниям термометра определите температуру воздуха вблизи интерферометра и запишите его значение в **таблицу 2**.
6. Повторите пункты 3-5 пять раз.

**Таблица 2.** Определение условий максимумов.

Частота генератора  $\nu = \dots \pm \dots$  Гц

№ опыта	$L_1, \text{ см}$	$\Delta L_1, \text{ см}$	$L_4, \text{ см}$	$\Delta L_4, \text{ см}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$T, \text{ K}$
1						
2						
3						
4						
5						
Среднее						

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте средние значения  $L_1$ ,  $L_4$  и температуры.
2. По формуле (2) рассчитайте длину звуковой волны в воздухе, используя средние значения  $L_1$  и  $L_4$ . Результат покажите преподавателю.
3. Рассчитайте по формуле (1) скорость звука, используя полученное значение длины волны.
4. По формуле (4) рассчитайте теоретическую термодинамическую скорость звука.
5. Рассчитайте погрешности прямых измерений в следующем порядке:

а) для значений  $L_1$  и  $L_4$  найдите среднее случайное отклонение от среднего:

$$\Delta L_{сл} = \frac{\sum |L_{ср} - L_i|}{5}$$

б) определите максимальную погрешность прямых изменений значений  $L_1$  и  $L_4$ :

$$\Delta L_{1,4} = \Delta L_{np} + \Delta L_{сл} .$$

в) аналогичным способом рассчитайте погрешность измерения температуры  $\Delta T$ .

6. Рассчитайте погрешности косвенных измерений:

$$\delta V_{зв. \text{экспер.}} = \frac{\Delta \nu}{\nu} + \frac{\Delta L_1 + \Delta L_4}{L_1 - L_4}, \quad \Delta V_{зв. \text{экспер.}} = V_{зв. \text{экспер.}} \delta V_{зв. \text{экспер.}},$$

$$\delta V_{\text{зв.теор}} = \frac{\Delta T}{2T}, \quad \Delta V_{\text{зв. теор.}} = V_{\text{зв. теор.}} \delta V_{\text{зв. теор.}} .$$

7. Запишите результаты расчетов в стандартной форме.
8. Сделайте выводы о результатах проведенных измерений и расчетов, сравните полученные значения скорости звука в воздухе с табличными.

### Литература

1. Под ред. Пинского А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995, §§ 20.
2. Касьянов В. А., Физика-10, М., Дрофа, 2003, §§ 70-74.
3. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Физика 11. Колебания и волны, М., Дрофа, 2002, §§ 4.1-4.5, 4.9-4.16.

### Контрольные вопросы

1. Что такое волна? Какие волны называются продольными? поперечными?
2. Что такое плоская волна? Запишите уравнение плоской волны, объясните смысл входящих в него величин.
3. Что представляют собой звуковые волны в газе?
4. Что такое интерференция волн? При каких условиях её можно наблюдать?
5. Сформулируйте условия интерференционных максимумов и минимумов.
6. Какие физические параметры подвергаются возмущению при распространении акустических волн в идеальном газе?
7. Почему процесс изменения давления в акустической волне можно с хорошим приближением считать адиабатным?
8. Как использовано явление интерференции волн в данной работе?
9. Опишите принцип действия акустического интерферометра.
10. Выведите расчетную формулу для определения длины волны в этой работе.
11. От чего зависит скорость звука в газе?
12. В каких средах могут распространяться звуковые волны?
13. Каковы частоты звуковых колебаний, воспринимаемых человеческим органом слуха?

## **Изучение интерференции электромагнитных волн**

### **Цель работы**

- изучение распространения электромагнитных волн;
- изучение явления интерференции волн;
- экспериментальное определение длины электромагнитных волн.

### **Теоретические основы работы**

Волной называется распространение колебательного процесса в пространстве. Распространяющееся в пространстве периодически изменяющееся электромагнитное поле и представляет собой электромагнитную волну. Скорость распространения электромагнитного поля в вакууме равна скорости света, скорость распространения электромагнитных волн используемой частоты в воздухе так же можно считать равной скорости света. Электромагнитные волны – поперечные, направления колебаний векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$  взаимоперпендикулярны и расположены перпендикулярно направлению распространения волны.

$$\text{Уравнение плоской бегущей волны } E_x = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z + \varphi_0\right),$$

где  $E_0$  – амплитуда волны,  $\lambda$  – длина волны,  $Z$  – расстояние, пройденное волной от начала координат,  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Расстояние, на которое волна перемещается за время одного полного колебания частиц (период  $T$ ), называется длиной волны:

$$\lambda = cT \text{ или } \lambda = \frac{c}{\nu}, \text{ так как } \nu = \frac{1}{T}.$$

Частота и длина волны колебаний определяется источником волн. Длину волны можно измерить экспериментально, используя явление интерференции.

Интерференцией называется результат сложения двух или более волн от когерентных источников, характеризующийся увеличением амплитуды колебаний в одних точках пространства и уменьшением – в других.

Принципиальная схема интерферометра представлена на рисунке 1.

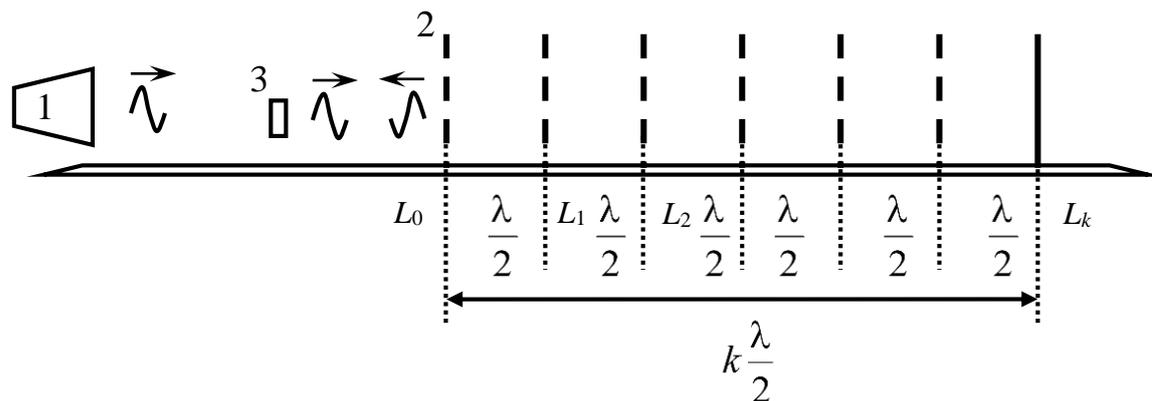


Рис. 1

Волна распространяется от излучателя (1) вдоль направляющей, достигает металлической пластины (отражателя, 2), плоскость которой перпендикулярна направляющей. Отразившись от отражателя, волна распространяется в обратном направлении. На направляющей между излучателем и отражателем располагается приемник колебаний (3). Если при отражении от отражателя фаза отражаемого сигнала совпадает с фазой излучаемого сигнала – их амплитуды складываются, и интенсивность колебаний, принимаемых приемником, увеличивается. Такое «благоприятное» сложение происходит, если на длине пути (расстояния от приемника до отражателя и обратно) фаза волны меняется на величину, кратную  $2\pi$ . Для этого отраженная волна должна пройти расстояние кратное целому числу длин волн. Перемещение отражателя (изменение длины пути) приводит к изменению условий сложения волн, изменению амплитуды результирующих колебаний.

Таким образом, расстояние между положениями отражателя, соответствующими соседним интерференционным максимумам, равно половине длины волны.

Пусть  $L_0$  – координата по шкале направляющей, соответствующая начальному положению отражателя, при котором наблюдалось увеличение интенсивности колебаний,  $L_k$  – координата отражателя, соответствующая  $k$ -ому интерференционному максимуму, отсчитанному от начального положения ( $L_0$ ). Тогда,

$$|L_k - L_0| = k \lambda/2,$$

откуда значение длины волны определяется формулой:

$$\lambda = \frac{2}{k} |L_k - L_0| \quad (1)$$

## Описание установки

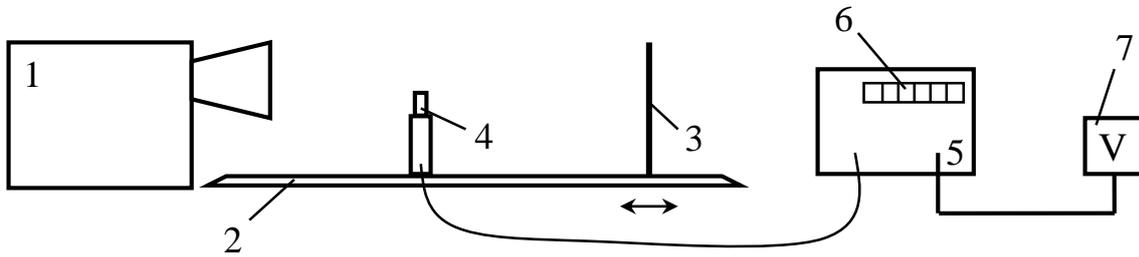


Рис. 2

Для создания электромагнитных волн используется генератор высокочастотного диапазона (1), излучающий электромагнитные волны постоянной частоты. На направляющей (2) установлены металлическая пластина (3), отражающая электромагнитные волны, а так же высокочастотный диод (4), предназначенный для приема электромагнитных колебаний. Высокочастотный диод (4) подключен к приемнику высокочастотных колебаний (5). Для измерения амплитуды колебаний, принимаемых высокочастотным диодом, предназначены линейка светодиодов (6) и вольтметр (7). Количество светящихся диодов и напряжение измеряемое вольтметром пропорционально амплитуде, принимаемых диодом колебаний.

## Порядок выполнения работы

Внимание! Согласно требованиям техники безопасности, рупорная антенна генератора не должна быть направлена на человека длительное время. Не допускается направление рупорной антенны генератора в глаза.

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	Шкала направляющей				

2. Включите генератор высокочастотного диапазона и приемник высокочастотных колебаний тумблерами питания, расположенными на соответствующих приборах.
3. Медленно перемещая отражатель, найдите такое его положение, при котором наблюдается максимальное отклонение стрелки вольтметра. Запишите в **таблицу 2** координату отражателя по шкале направляющей  $L_0$ .
4. Медленно перемещая отражатель вдоль направляющей в сторону от генератора, определите ближайшее положение, при котором наблюдается следующее максимальное возрастание амплитуды колебаний (контролируя по показаниям вольтметра). Это положение соответствует максимуму № 1.
5. Продолжите перемещение отражателя. Отсчитайте несколько (4–6) последовательных максимумов интерференции.
6. Установите отражатель в положении максимума №  $k$  ( $k = 4–6$ ). Запишите в **таблицу 2** координату отражателя по шкале направляющей  $L_k$  и номер максимума  $k$ .
7. Повторите пункты 3–6 пять раз, используя различные значения  $k$ .

**Таблица 2.** Определение координат максимумов интерференции.

№ опыта	$L_0, \text{мм}$	$L_k, \text{мм}$	$k$	$\lambda, \text{мм}$
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее	_____			

### Обработка результатов измерений

1. По формуле (1) для каждого выполненного опыта рассчитайте значение длины электромагнитной волны.
2. Рассчитайте среднее значение длины волны для всех проведенных экспериментов.
3. Рассчитайте значение частоты изучаемых колебаний. Результат покажите преподавателю.
4. Рассчитайте погрешности выполненных измерений в следующем порядке:

а) для определенного вами значения длины волны найдите среднее случайное отклонение от среднего:

$$\Delta\lambda_{\text{сл}} = \frac{\sum |\lambda_{\text{ср}} - \lambda_i|}{5},$$

б) определите максимальную погрешность изменения длины волны:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{\text{сл}} + \Delta\lambda_{\text{пр}},$$

приборную погрешность измерения длины волны примите равной погрешности измерения координат максимумов.

в) рассчитайте погрешность измерения частоты колебаний, пользуясь выражением

$$\delta\nu = \delta\lambda.$$

5. Запишите результаты расчетов в виде доверительных интервалов.

$$\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda, \quad \nu = \nu_{\text{ср}} \pm \Delta\nu$$

6. Сделайте выводы о результатах проведенных измерений и расчетов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое волна? Какие волны называются продольными? поперечными?
2. Запишите уравнение волны, объясните смысл входящих в него величин.
3. Что представляют собой электромагнитные волны?
4. Что такое интерференция волн? При каких условиях её можно наблюдать?
5. Сформулируйте условия интерференционных максимумов и минимумов.
6. Как использовано явление интерференции волн в данной работе?
7. Выведите расчетную формулу для определения длины волны в этой работе.

## Изучение явления дифракции света

### Цель работы

- наблюдение явления дифракции света на дифракционной решетке и узкой щели;
- определение длины волны светового излучения по дифракционной картине;
- определение ширины дифракционной щели
- \*изучение зависимости дифракционной картины от ширины щели.

### Теоретические основы работы

Дифракция света проявляется в отклонении от прямолинейного распространения и в перераспределении интенсивности света в пространстве, если размеры препятствия или отверстия соизмеримы с длиной волны. (Конечно, дифракция происходит и на предметах больших размеров, но наблюдать ее сложно). Пусть параллельный пучок монохроматического света падает на дифракционную решетку – ряд узких параллельных щелей (рис. 1), расположенных перпендикулярно плоскости рисунка. Расстояние  $d$  называется периодом, или постоянной решетки. Каждая точка открытого участка фронта волны по принципу Гюйгенса является источником вторичных волн и излучает волны к экрану во всех направлениях. На экране наблюдается интерференция вторичных волн. Волны от соседних щелей накладываются в точке на экране и, в зависимости от их разности фаз, в этой точке наблюдается максимум интенсивности (если фазы волн одинаковы) или минимумы (если волны пришли в точку экрана в противофазе).

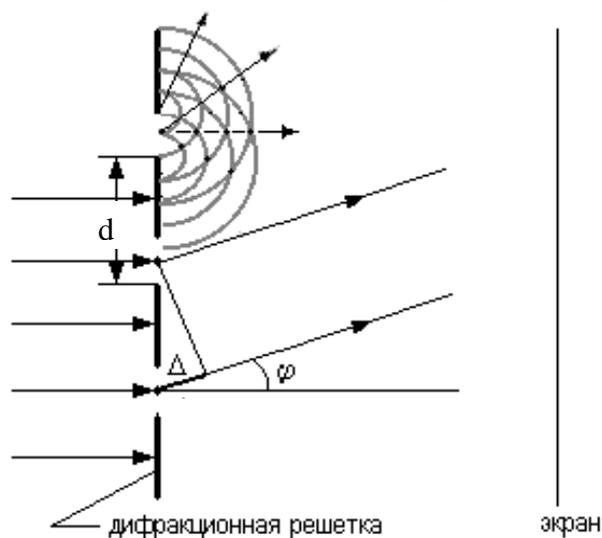


Рис.1

Возьмём две точки в соседних щелях решетки, расположенные одинаково по отношению к краям щелей. Такие точки называются соответственными. Расстояние между ними равно  $d$ . Так как они лежат на одном фронте волны, колебания в этих точках происходят в одной фазе. Результат

сложения волн, идущих от этих точек, будет зависеть от разности путей, пройденных волнами до точки наложения. В центр экрана все волны приходят, пройдя один и тот же путь, поэтому складываются в одной фазе, – здесь наблюдается максимум.

В точку, расположенную на экране под углом  $\varphi$ , «соседние» волны приходят, пройдя расстояния, отличающиеся на величину разности хода  $\Delta$ :

$$\Delta = d \sin \varphi \quad (1).$$

Если на этом расстоянии укладывается целое число длин волн  $\lambda$ , то волны придут на экран в одинаковых фазах, так как на пути длиной  $\lambda$  фаза волны меняется на  $2\pi$ . Таким образом, максимумы освещенности на экране при дифракции на решётке с постоянной  $d$  наблюдаются под углами дифракции  $\varphi_k$ , определяемыми условием:

$$d \sin \varphi_k = k\lambda, \quad \text{где } k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (2).$$

Число  $k$  определяет порядок дифракционного максимума, оно равно количеству длин волн, которое укладывается на расстоянии разности хода  $\Delta$  (рис.2).

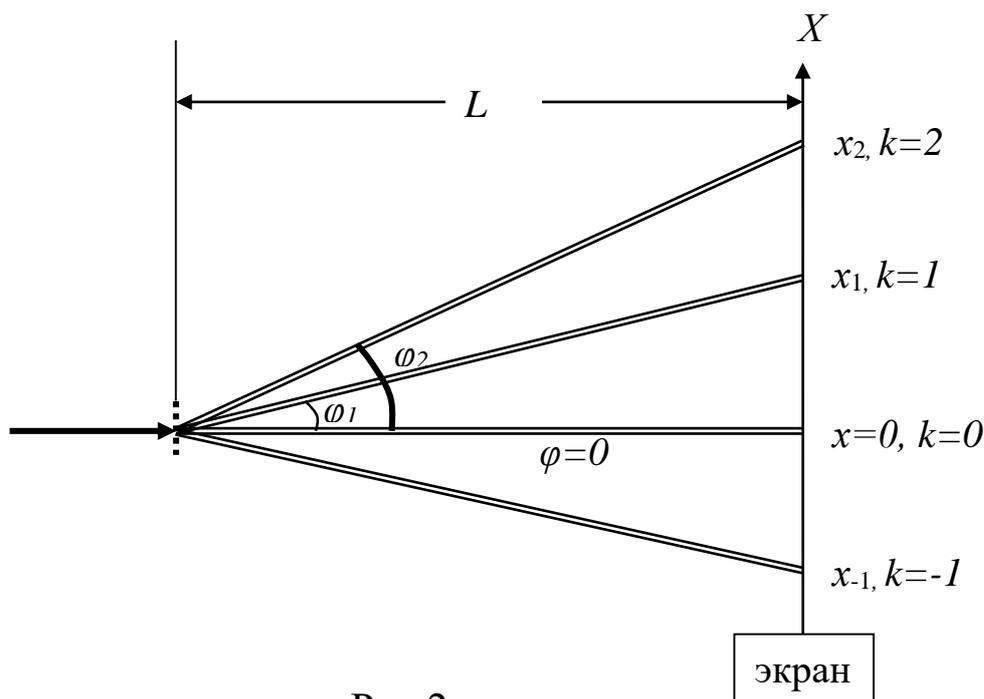


Рис.2

Синус угла дифракции, как это видно из рис. 2, определяется формулой

$$\sin \varphi_k = \frac{|x_k|}{\sqrt{L^2 + x_k^2}} \quad (3),$$

где  $L$  – расстояние от решетки до экрана,  $x_k$  – расстояние от центра дифракционной картины до  $k$ -ого максимума.

Дифракцию можно наблюдать и на одной щели шириной  $b$  (рис. 3). В каждую фиксированную точку экрана приходят волны, которые образуют плоский фронт АС (рис.4), повернутый по отношению к фронту падающей волны на некоторый угол  $\gamma$  – угол дифракции. На экране будет наблюдаться результат интерференции вторичных волн света.

Для оценки результата интерференции на экране применяется так называемый метод зон Френеля. Отрезок ВС мысленно разобьем

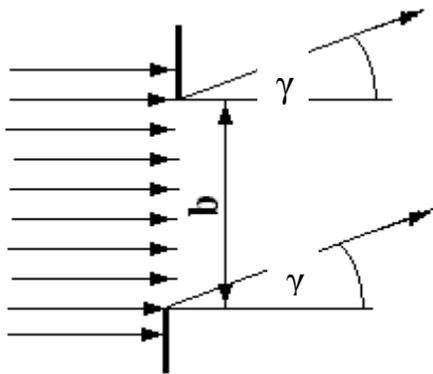


Рис. 3

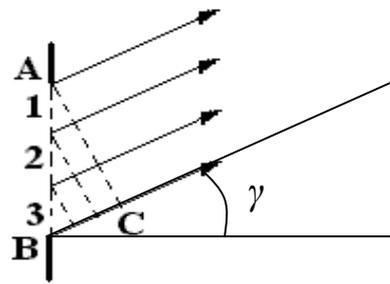


Рис.4

на отрезки длиной  $\frac{\lambda}{2}$ ; затем через полученные точки проведем прямые параллельные фронту волны АС. Эти прямые разделят первоначальный фронт АВ на зоны Френеля. На рис.4 таких зон, уложившихся на щели, образовалось три. Волны от двух соседних зон приходят к новому фронту АС с разностью хода  $\frac{\lambda}{2}$ , то есть в противофазе; амплитуды, создаваемые одинаковыми по площади зонами, равны. В результате интерференции волны от двух соседних зон резко ослабляют друг друга. Таким образом, если число зон, образовавшихся на фронте АВ, четное, то в соответствующей точке на экране будет минимум дифракционной картины, то есть будет наблюдаться темная полоса; **условие минимума** определится по формуле:

$$b \sin \gamma_k = k\lambda, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots \quad .(4)$$

Если на фронте АВ укладывается нечетное число зон Френеля, то под соответствующим углом  $\gamma$  на экране будет наблюдаться максимум дифракционной картины, так как влияние одной из зон сохранится. **Условие максимума** результирующего колебания  $k$ -того

порядка при дифракции на щели шириной  $b$  определяется по формуле:

$$b \sin \gamma_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots \quad (5).$$

В направлении  $\gamma = 0$  на экране наблюдается самый интенсивный центральный максимум нулевого порядка: в соответствующую точку на экране все волны приходят в одинаковых фазах. В область центрального максимума нулевого порядка попадает порядка 90 % всей световой энергии, прошедшей через щель.

## Описание установки

Экспериментальная установка схематически изображена на рис.5.

- 1 – оптическая скамья
- 2 – источник света (лазер)
- 3 – рейтеры
- 4 – дифракционная решетка
- 5 – экран с измерительной шкалой

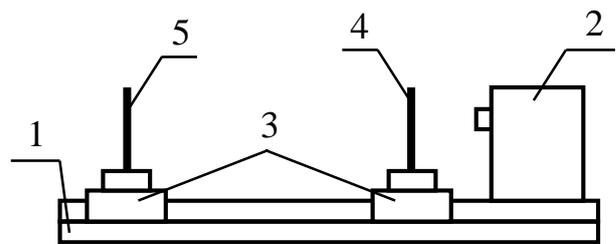


Рис. 5

Источником светового излучения является лазер (2), генерирующий узкий пучок параллельных лучей. Излучение лазера монохроматично, то есть содержит волны одной длины  $\lambda$ . Свет лазера падает на дифракционную решетку (4), укрепленную на рейтере (3). Дифракционная решетка представляет собой прозрачную пластину, на которой нанесены параллельные штрихи с малым периодом  $d$ , значение которого указано на установке. Дифракционная картина наблюдается на экране (5), снабженном измерительной шкалой, позволяющей определить координаты  $x$  точек дифракционных максимумов. Для измерения расстояний используется миллиметровая линейка.

Во второй части работы вместо рейтера с дифракционной решеткой на оптическую скамью ставится рейтер со щелью, ширина которой регулируется микрометрическим винтом и может быть измерена по шкале микрометра.

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1					
2					

***ВНИМАНИЕ!** В работе используется лазер. Его излучение при попадании в глаз оказывает неблагоприятное воздействие на сетчатку. Будьте осторожны, не допускайте попадания прямого или отраженного луча в глаз!*

2. Включите лазер, убедитесь, что он генерирует узкий луч света.

### *Опыт 1. Изучение дифракции на решётке*

3. Запишите в протокол значение постоянной решётки.
4. Установите дифракционную решетку на рейтер. Подберите такое положение, при котором на экране наблюдается дифракционная картина – чередование ярких точек с темными пробелами.
5. Установите измерительную шкалу в такое положение, при котором координата центрального максимума равна нулю.
6. Определите по измерительной шкале на экране координаты  $x_k$  дифракционных **максимумов** следующих порядков ( $k = 1, 2, 3, -1, -2, -3$ ). Результаты запишите в **таблицу 2**.
7. Измерьте и запишите расстояние  $L$  от решетки до экрана.

**Таблица 2.** Результаты измерения координат дифракционных максимумов при дифракции на решётке.

Постоянная решётки  $d = \dots\dots$  мм,  $L = \dots\dots \pm \dots\dots$  мм

Порядок $k$	$x_k$ , мм	$\sin \phi_k = \frac{ x_k }{\sqrt{L^2 + x_k^2}}$	$\lambda = \frac{d \sin \phi_k}{k}$	
			мм	нм
0	0			
1				
2				
3				
-1				
-2				
-3				
среднее значение длины волны				

Опыт 2. Изучение дифракции на щели

8. Произведите пробные измерения ширины щели с помощью микрометрического винта, покажите результаты пробной настройки преподавателю.
9. Вместо рейтера с дифракционной решеткой на оптическую скамью установите рейтер со щелью. Изменяя ширину щели микрометрическим винтом, получите на экране хорошо различимую дифракционную картину.

**Таблица 3.** Результаты измерения координат дифракционных максимумов при дифракции на щели.

Измеренная ширина щели  $b_{\text{измер}} = \dots\dots \pm \dots\dots$  мм,  $L = \dots\dots \pm \dots\dots$  мм

Порядок $k$	$x$ , мм	$\sin \gamma_k \approx \frac{ x_k }{L}$	$b_{\text{расчётн}}$ , мм
0	0		
1			
2			
3			
-1			
-2			
-3			
среднее расчетное значение ширины щели			

10. Повторите операции, описанные в пп. 5-6, определяя координаты дифракционных **максимумов**. Результаты запишите в таблицу 3.
11. Измерьте расстояние от щели до экрана  $L$  и запишите в протокол.
12. Аккуратно снимите рейтер со щелью с оптической скамьи, определите ширину щели с помощью микрометрического винта и запишите в протокол значение  $b_{\text{измер}}$ .

*\*Опыт 3. Исследование зависимости ширины центрального дифракционного максимума от ширины щели*

13. С помощью микрометрического винта установите ширину щели по указанию преподавателя, запишите в таблицу 4.
14. Установите рейтер со щелью на оптическую скамью. Определите по измерительной шкале на экране координату первого минимума, запишите в таблицу 4.
15. Уменьшите ширину щели и повторите пп. 13-14.
16. Уменьшая ширину щели, повторите изменения ширины щели и координаты первого минимума ещё три раза.

**\*Таблица 4.** Измерение координат первого дифракционного минимума при различных значениях ширины щели.

№ опыта	$b$ , мм	координата первого минимума		ширина нулевого максимума $a$ , мм
		$x_{1\text{теоретич}}$ , мм	$x_{1\text{эксперим}}$ , мм	

## Обработка результатов измерений

### Опыт1. Изучение дифракции на решётке.

1. По данным таблицы 2, используя формулу (2), вычислите все значения  $\lambda$  – длины световой волны, излучаемой лазером, и среднее значение  $\lambda_{\text{ср}}$ . Результат покажите преподавателю.
2. Вычислите относительную погрешность измерения длины волны для случая  $k = 2$  по формуле

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta x^2 + \delta L^2 + \delta d^2}, \text{ где } \delta d = 0,01.$$

3. Вычислите абсолютную погрешность измерения длины волны:

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{ср}} \delta\lambda.$$

Запишите значение длины волны с учетом погрешности

$$\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda.$$

### Опыт2. Изучение дифракции на щели.

4. По данным таблицы 3, используя значение длины волны  $\lambda_{\text{ср}}$ , вычислите значения ширины щели  $b_{\text{расч}}$  по формуле

$$b_{\text{расч}} = \frac{(2k + 1)\lambda_{\text{ср}}}{2\sin\gamma_k}$$

и найдите его среднее значение  $b_{\text{ср расч}}$ .

5. Вычислите относительную погрешность измерения для случая  $k = 2$  по формуле

$$\delta b = \sqrt{\delta x^2 + \delta L^2 + \delta\lambda^2}$$

и абсолютную погрешность измерения среднего значения по формуле

$$\Delta b = b_{\text{ср}} \delta b.$$

6. Запишите значение  $b_{\text{расч}}$  с учетом погрешности:  $b_{\text{ср расч}} \pm \Delta b$ .
7. Сравните значения ширины щели, рассчитанное по дифракционной картине  $b_{\text{расч}}$  и полученное в результате измерения микрометром  $b_{\text{измер}}$ .

*\*Опыт 3. Исследование зависимости ширины центрального дифракционного максимума от ширины щели.*

8. По данным таблицы 4 для каждого значения ширины щели  $b$  вычислите ширину нулевого максимума по формуле  $a = 2x_1$  и занесите в таблицу 4.
9. Постройте график зависимости ширины нулевого максимума (ширины освещенной зоны на экране) от ширины щели  $a = f(b)$ . Сделайте выводы, объясните результат.
10. Используя формулу (4), определите теоретические значения координат первого минимума  $x_{1\text{теоретич}}$  и сравните их с экспериментальными  $x_{1\text{эксперим}}$ .

### **Литература**

4. Пинский А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995, §§ 34, 35.
5. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Физика 11. Оптика. Квантовая физика, М., Дрофа, 2002. §§ 2.8, 2.11, 2.12.

### **Контрольные вопросы**

1. Какая сторона природы света проявляется в явлении дифракции?
2. Что называется дифракцией света? При каких условиях ее можно наблюдать?
3. Что представляет собой дифракционная картина? Как объяснить её образование?
4. Что представляет собой световая волна?
5. В чем состоит явление интерференции волн?
6. Сформулируйте и поясните на рисунке принцип Гюйгенса. Объясните на основе принципа Гюйгенса явление дифракции волн.
7. Что представляет собой дифракционная решетка? Что такое период (постоянная) решетки?
8. Сделав рисунок, объясните, как происходит дифракция света на дифракционной решетке. Какова при этом дифракционная картина на экране?
9. Выведите условия образования дифракционных максимумов и минимумов при дифракции на решетке.

10. Сделав рисунок, объясните, как происходит дифракция света на одной щели. Какова при этом дифракционная картина на экране?
11. Что такое зоны Френеля? Как их образовать при дифракции на щели?
12. Выведите условия образования дифракционных максимумов и минимумов при дифракции на узкой щели.
- 13.\* Как зависит ширина нулевого максимума (ширина освещенной зоны на экране) от ширины щели?

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 11, 12

### Явление внешнего фотоэффекта

Фотоэффект (внешний) – явление выхода электронов, получивших дополнительную энергию под действием света, с поверхности твердых и жидких материалов.

Принципиальная схема опытов Столетова (использована в данной лабораторной работе) представлена на рис. 1.

В вакуумную трубку через окошко (1) падает свет на катод (2), изготовленный из вещества, обладающего низкой работой выхода, фотоэффект которого изучается. Вылетевшие из катода фотоэлектроны попадают в ускоряющее электрическое поле, созданное между катодом и анодом (3). Напряженность этого поля можно менять, изменяя напряжение между катодом и анодом с помощью потенциометра (4). Значение напряжения измеряется вольтметром (5). Возникающий фототок измеряется микроамперметром (6).

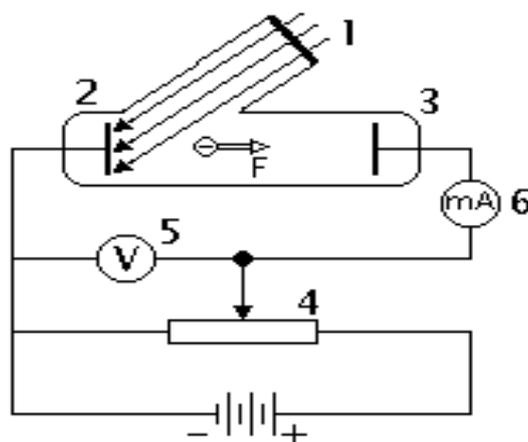


Рис 1.

Зависимость фототока от анодного напряжения называется *вольтамперной характеристикой*; она представлена на рис. 2.

С ростом анодного напряжения фототок увеличивается, так как все большее число электронов достигает анода. При некотором значении анодного напряжения все вылетевшие электроны

попадают на анод, дальнейшее увеличение напряжения не приводит к росту тока – достигнут ток насыщения:

$$I_{\text{нас}} = en, \quad (1)$$

где  $n$  – число фотоэлектронов, вылетевших из катода в единицу времени,  $e$  – модуль заряда электрона, равный элементарному электрическому заряду:  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл

При отрицательном значении потенциала анода по отношению к катоду фотоэлектроны попадают в тормозящее поле, поэтому достигнуть анода могут только электроны, обладающие после выхода из катода достаточно большой кинетической энергией. Ток прекращается при задерживающем напряжении  $U_{\text{зад}}$ , когда самые быстрые электроны не достигают анода.

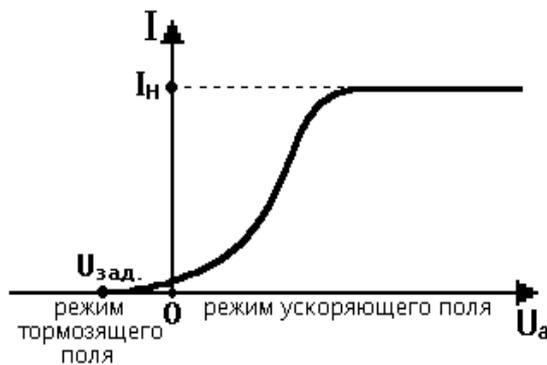


рис2.

Максимальная скорость фотоэлектронов определяется по величине  $U_{\text{зад}}$ . с помощью теоремы об изменении кинетической энергии.

$$\Delta W_{\text{кин}} = A_{\text{поля}}; \quad \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = eU_{\text{зад}}. \quad (2)$$

Изменяя частоту света  $\nu$  и число фотонов в единицу времени  $n$ , падающего на катод, можно установить влияние этих величин на фотоэффект. На рис. 3 показаны вольтамперные характеристики фотоэффекта, полученные при различных параметрах светового излучения:

1.  $\nu = \nu_1; n = n_1$
2.  $\nu_2 > \nu_1; n_2 \approx n_1$
3.  $\nu_2 = \nu_3; n_3 > n_2$

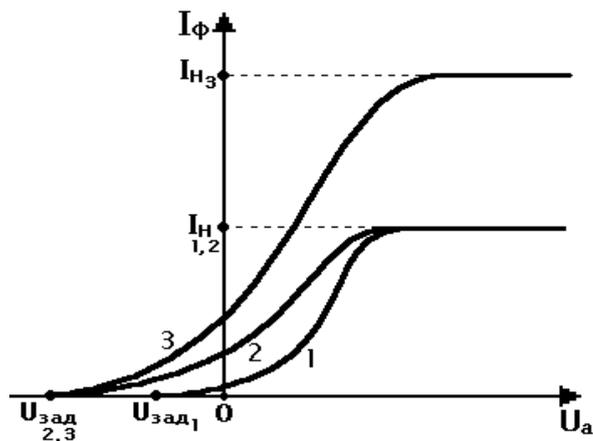


Рис. 3

По таким характеристикам были сформулированы *законы фотоэффекта* (законы Столетова).

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества фотокатода существует красная граница фотоэффекта – такая наименьшая частота света  $\nu_0$ , при которой еще возможен фотоэффект.
3. Число фотоэлектронов  $n$ , вылетающих из катода в единицу времени (определяющее ток насыщения), прямо пропорционально интенсивности света.
4. Фотоэффект безынерционен, то есть возникает сразу после освещения катода (при условии  $\nu > \nu_0$ ).

Законы фотоэффекта объясняются при использовании квантовых представлений о природе света.

В соответствии с корпускулярной теорией, свет – это поток частиц – фотонов, которые испускаются и поглощаются только как целое. Энергия фотона определяется частотой волны и составляет величину

$$\varepsilon = h \nu, \quad (3)$$

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

Квант света, попадая на фотокатод, целиком поглощается электроном и расходуется на совершение работы по преодолению притяжения кристаллической решетки (работы выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$ ). Избыточная энергия остается в виде кинетической энергии фотоэлектрона. Применение закона сохранения энергии к фотоэффекту дает уравнение

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}, \quad (4)$$

называемое уравнением Эйнштейна.

Работа выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$  зависит от вещества катода и состояния его поверхности. Увеличение частоты света приводит к росту «избыточной» кинетической энергии электронов (в соответствии с первым законом фотоэффекта).

Минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект (красная граница  $\nu_0$ ) соответствует уравнению

$$h \nu_0 = A_{\text{ВЫХ}} \quad (5)$$

и определяется материалом фотокатода, – в соответствии со вторым законом фотоэффекта. Соответствующая длина волны

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света.

Количество фотоэлектронов, определяющее ток насыщения, зависит от количества падающих фотонов, то есть от интенсивности света – по третьему закону фотоэффекта.

Безинерционность фотоэффекта также легко объясняется, так как энергия кванта поглощается мгновенно.

Для экспериментального анализа закономерностей фотоэффекта уравнение Эйнштейна (4) удобно записать в виде

$$eU_{\text{зад}} = \hbar\omega - A, \quad (6)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Красная граница фотоэффекта равна частоте света, освещающего фотокатод, при которой кинетическая энергия фотоэлектронов и, следовательно, задерживающее напряжение равны нулю.

Из формулы Эйнштейна следует, что значение частоты, соответствующей красной границе фотоэффекта, определяется работой выхода материала фотокатода:

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{A}{\hbar}. \quad (7)$$

В лабораторной работе производится экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, определяются значения задерживающего напряжения для пяти длин волн света и строится график зависимости максимальной кинетической энергии электронов от циклической частоты излучения, освещающего фотокатод (рис. 4).

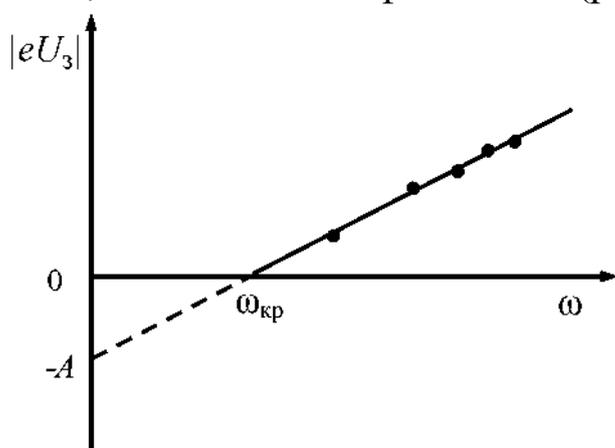


Рис. 4 Зависимость максимальной кинетической энергии электронов от частоты

Соответствие этого графика функциональной зависимости (3) дает основание говорить о справедливости уравнения Эйнштейна, а коэффициенты уравнения прямой, описывающей эту зависимость,

найденные с помощью аналитической или графической аппроксимации, позволяют определить постоянную Планка и работу выхода материала фотокатода. Разброс экспериментальных точек от линейной зависимости позволяет оценить погрешности получаемых величин (см. приложение).

## Лабораторная работа № 11

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА И РАБОТЫ ВЫХОДА ФОТОКАТОДА МЕТОДОМ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

**Цель работы** – экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта; определение постоянной Планка и работы выхода фотокатода методом задерживающего потенциала, получение вольтамперной характеристики фотоэлемента в тормозящем поле.

#### Описание установки

Принципиальная схема установки для изучения фотоэффекта приведена в теоретической части (рис. 1).

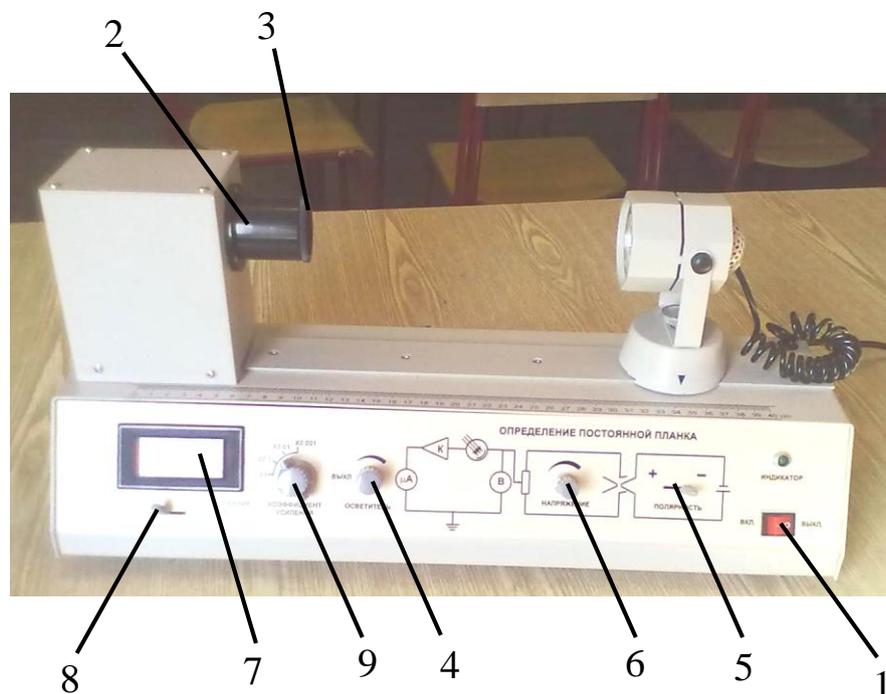


Рис. 5 Экспериментальная установка

Используемая экспериментальная установка изображена на рис. 5. Включение питания установки производится тумблером 1. Фотоэлемент, используемый в установке, представляет собой вакуумный диод. Освещение катода производится через патрубок 2,

непрозрачного корпуса, в который помещен фотоэлемент. На патрубков надеваются или заглушка, или светофильтр 3. **Яркий свет сокращает срок службы фотокатода, поэтому фотоэлемент должен быть всегда закрыт непрозрачным кожухом или светофильтром!**

В комплекте установки имеется набор из пяти светофильтров, излучающих свет различных длин волн (460 нм, 500 нм, 540 нм, 570 нм и 635 нм). При выполнении измерений с патрубка снимается заглушка и надевается соответствующий светофильтр.

Интенсивность излучения осветителя изменяется с помощью ручки 4. Для изменения полярности, подаваемого на фотоэлемент напряжения служит переключатель +/– 5. Таким образом, в положении «+» электрическое поле фотоэлемента ускоряет электроны, движущиеся от катода к аноду, в положении «–» – замедляет. Величину напряжения можно изменять с помощью потенциометра 6.

Для измерения разности потенциалов между катодом и анодом служит цифровой вольтметр для измерения силы тока в цепи фотоэлемента служит цифровой микроамперметр. Вольтметр и микроамперметр имеют общее цифровое табло 7. Переключатель режимов работы 8 служит для отображения на табло либо значений разности потенциалов в Вольтах, либо силы тока в мкА. Для выбора предела измерения микроамперметра служит переключатель 9.

### 3. Порядок выполнения работы

*Опыт 1. Изучение зависимости задерживающего напряжения от длины волны излучения*

1. Заполните табл. 1 спецификации измерительных приборов и запишите данные установки.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

Название прибора и его тип	Цена деления	Инструментальная погрешность
Цифровой вольтметр	0,01 В	1 %
Цифровой микроамперметр	0,001 мкА	5 %

2. Измерьте значение задерживающего напряжения для пяти значений длин волн излучения, для чего:

3. Наденьте на корпус фотоэлемента светофильтр, пропускающий свет с длиной волны 460 нм.
4. Включите осветитель с помощью ручки 4.
5. Установите переключатель 5 в положение «←». Установите переключатель режимов работы 8 в положение "ток". Установите переключатель предела измерения микроамперметра 9 в положение **0,001**.
6. Подберите значение задерживающего напряжения (регулируется ручкой 6) при котором фототок отсутствует. То есть, регулируя анодное напряжение ручкой 6, добейтесь нулевых показаний микроамперметра (с точностью до 1 – 2 единиц последнего разряда измерительного табло 7).
7. Переведите переключатель режимов работы 8 в положение "напряжение", измерьте и запишите в табл. 2 полученное значение задерживающего напряжения  $U_{\text{зад}}$ , при котором фототок стал равным нулю.
8. Повторите пп. 3 – 7 с использованием остальных четырех светофильтров.

**Таблица 2.** Зависимость задерживающего напряжения от длины волны излучения.

№	$\lambda$ , нм	$U_z$ , В	$\omega$ , рад/с	$eU_z$ , Дж
1.	460			
2.	500			
3.	540			
4.	570			
5.	635			

Опыт 2. Изучение отрицательной части вольтамперной характеристики фотоэффекта

1. Наденьте на корпус фотоэлемента светофильтр, соответствующий длине волны  $\lambda_1$  (по указанию преподавателя).
2. Установите ручку регулировки потенциометра 6 в крайне левое положение, соответствующее напряжению 0 В. Установите переключатель 5 в положение «←».
3. Включите осветитель и установите максимальную величину накала лампы (ручка 4).
4. Измерьте текущую величину фототока амперметром 7, (переключатель 8 должен быть установлен в положение "ток").

Запишите измеренное значение в первую строку таблицы 3 в столбец, соответствующий мощности освещения фотокатода  $\Phi_1$ .

5. Регулируя значение задерживающего напряжения ручкой 6, добейтесь отсутствия тока фотоэлемента (амперметр 7 показывает ноль) в положении переключателя коэффициента усиления 9 **0,001**.

6. Переведите переключатель 8 в положение "напряжение", измерьте установленное значение анодного напряжения и запишите его в строку 7 первой части таблицы 3.

7. Равномерно уменьшая тормозящее напряжение, зарегистрируйте ещё пять точек зависимости фототока от анодного напряжения, записывая значения в соответствующие строки таблицы 3.

8. Наденьте на корпус фотоэлемента светофильтр с длиной волны  $\lambda_2$  (по указанию преподавателя).

**Таблица 3.** Зависимость фототока от задерживающего напряжения для различных длин волн и интенсивностей излучения.

Длина волны $\lambda_{1,2}$ , нм	№	Задерживающее анодное напряжение $U_A$ , В	Сила фототока $I_\Phi$ , мкА	
			$\Phi_1$	$\Phi_2$
	1.	0		
	2.			
	3.			
	4.			
	5.			
	6.			
	7.			0
	1.	0		
	2.			
	3.			
	4.			
	5.			
	6.			
	7.			0

9. Повторите пп. 4 – 7, записывая полученные результаты во вторую часть таблицы 3.

10. С помощью регулятора 4 установите меньшую величину накала лампы по указанию преподавателя.

11. Повторите пп. 4 – 9, используя светофильтры с длиной волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , записывая измеренные значения фототока в столбец, соответствующий мощности освещения фотокатода  $\Phi_2$ .

#### 4. Обработка результатов измерений

*Опыт 1. Изучение зависимости задерживающего напряжения от длины волны излучения*

1. Переведите значения длин волн излучения светофильтров в значения циклической частоты колебаний. Результаты запишите в табл. 2.
2. Переведите значения задерживающее напряжение в кинетическую энергию электронов по формуле  $W_k = |eU_{\text{зад}}|$ . Результаты запишите в табл. 2.
3. Постройте график зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от циклической частоты  $\omega$ .
4. Проведите графическую аппроксимацию (см. приложение) экспериментальной зависимости прямой линией согласно уравнению (3).
5. По коэффициентам уравнения прямой определите постоянную Планка и работу выхода материала фотокатода.
6. Определите абсолютные погрешности постоянной Планка и работы выхода (см. приложение).
7. Сравните полученное значение постоянной Планка с табличным.
8. Запишите результаты измерений в виде доверительного интервала.

*Опыт 2. Изучение отрицательной части вольтамперной характеристики фотоэффекта*

1. По данным таблицы 3 постройте на одной координатной плоскости 4 графика зависимости фототока  $I_{\text{ф}}$  от анодного напряжения  $U_{\text{А}}$ , откладывая значения  $U_{\text{А}}$  в отрицательной области, для двух длин волн света и двух значений мощности освещения фотокатода.
2. Из анализа полученных вольтамперных характеристик сделайте выводы о:
  - 1) зависимости вольтамперной характеристики фотоэффекта от длины волны излучения;

2) зависимости вольтамперной характеристики фотоэффекта от интенсивности освещения фотокатода.

## Литература

1. Под ред. Пинского А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995, §§ 58-59.
2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Физика – 11. Оптика. Квантовая физика, М., Дрофа, 2002, §§ 5.2,5.3,5.5.

**Контрольные вопросы** (см. после описания лабораторной работы № 12)

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### Снятие вольт-амперной характеристики фотоэлемента

#### Цель работы

- получить вольт-амперные характеристики фотоэлемента;
- выявить влияние интенсивности света на вольт-амперные характеристики.

**Теоретические основы работы** см. теоретическое введение к лабораторным работам № 11, 12

#### Описание установки

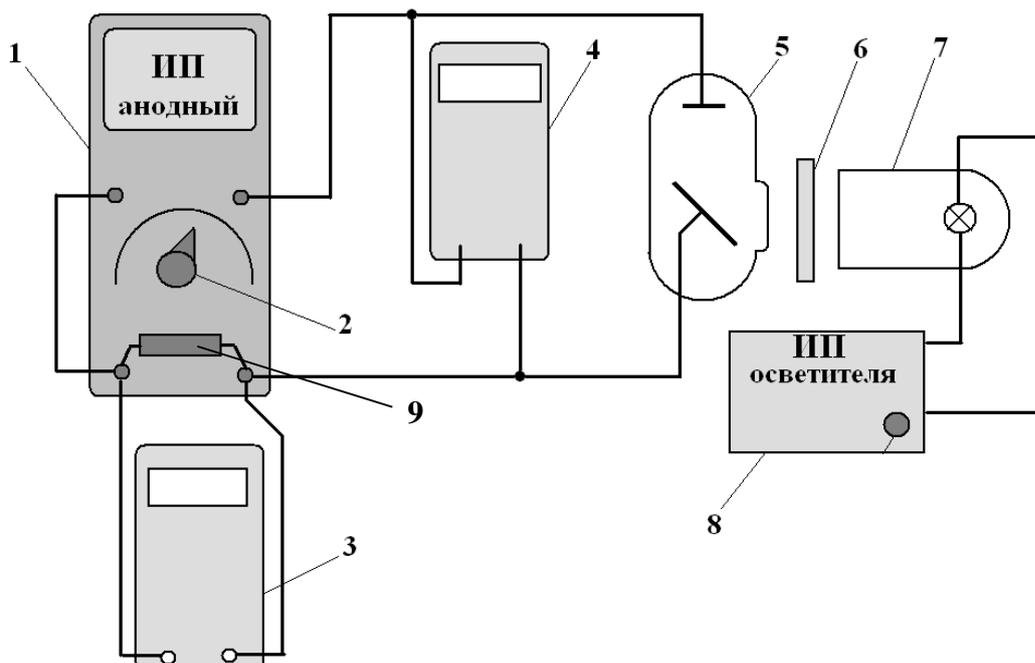


Рис. 1

Принципиальная схема установки для снятия вольтамперной характеристики фотоэффекта приведена в теоретическом введении. Установка, используемая в работе, имеет некоторые отличия.

- Изменение напряжения между анодом и фотокатодом производится с помощью ручки регулятора (2) источника анодного напряжения (1).
- Анодное напряжение измеряется цифровым вольтметром (4).
- Малые значения фототоков измерить довольно трудно, поэтому цифровым вольтметром (3) измеряется напряжение, создаваемое этим током на резисторе (9) с большим сопротивлением  $R_{обр}$ , включенном последовательно с фотоэлементом. Используя закон Ома, можно вычислить значения фототоков.

На схеме указаны:

1. Источник анодного напряжения.
2. Ручка регулятора анодного напряжения.
3. Цифровой вольтметр (мультиметр).
4. Цифровой вольтметр (мультиметр).
5. Фотоэлемент.
6. Светофильтр.
7. Осветитель.
8. Источник питания осветителя.
9. Образцовый резистор  $R_{обр}$ .

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

**Таблица 1.** Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1					
2					

2. Перед включением источника питания установите нулевое анодное напряжение, повернув ручку (2) источника (1) в крайнее левое положение.

3. Включите источник анодного напряжения, убедитесь, что анодный вольтметр показывает ноль.
4. **Внимание! Перед включением источника питания осветителя (лампы накаливания) выведите регулятор накала в крайнее левое положение.**
5. Включите осветитель и ручкой (9) регулировки накала лампы осветителя установите мощность освещения фотокатода  $\Phi_1$ .
6. Медленно увеличивайте анодное напряжение  $U_a$ , наблюдайте изменение напряжения на образцовом сопротивлении  $U_\phi$ , (фототока). Зафиксируйте 7-8 значений  $U_a$  и  $U_\phi$ , в том числе не менее трёх точек на участке насыщения фототока. Запишите результаты в **таблицу 2**.
7. Опять установите нулевое анодное напряжение. Ручкой (9) регулировки накала лампы осветителя установите мощность освещения фотокатода  $\Phi_2 > \Phi_1$ .
8. Снимите вторую вольтамперную характеристику, повторив действия, описанные в п. 6.
9. Снимите третью вольтамперную характеристику при мощности освещения  $\Phi_3 > \Phi_2$ , повторив операции пп. 7, 6.

**Таблица 2.** Зависимость фототока от анодного напряжения при различных интенсивностях освещения.

№ п/п	$\Phi_1$			$\Phi_2$			$\Phi_3$		
	$U_a$ , В	$U_\phi$ , мВ	$I$ , мкА	$U_a$ , В	$U_\phi$ , мВ	$I$ , мкА	$U_a$ , В	$U_\phi$ , мВ	$I$ , мкА
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									

## Обработка результатов измерений.

1. Постройте вольтамперные характеристики для трех разных значений мощности светового излучения на одной координатной плоскости.
2. Определите и запишите в протокол значения фототоков насыщения.
3. Используя формулу (1) теоретического введения, по значениям токов насыщения рассчитайте для каждого случая  $n$  – количество возникающих в секунду фотоэлектронов.
4. Используя значение длины волны света  $\lambda$ , количество возникающих в секунду фотоэлектронов  $n$  и формулу (3), определяющую энергию фотона, рассчитайте (оцените) мощность излучения, вызывающего фотоэффект в каждом опыте:

$$\Phi \approx n \varepsilon$$

## Литература

1. Под ред. Пинского А.А. Физика – 11, М., Просвещение, 1995, §§ 58-59.
2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Физика – 11. Оптика. Квантовая физика, М., Дрофа, 2002, §§ 5.2,5.3,5.5.

## Контрольные вопросы к лабораторным работам № 11 и 12

1. Нарисуйте принципиальную схему установки для исследования фотоэффекта.
2. Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику фотоэлемента.
3. Сформулируйте законы фотоэффекта.
4. Напишите и поясните уравнение Эйнштейна.
5. В чем состоит корпускулярное представление о природе света?
6. В чем волновые представления о природе света не согласуются с законами фотоэффекта?
7. Объясните законы фотоэффекта.
8. Объясните различие и сходство вольтамперных характеристик № 1 и 2 на рис. 3 в теоретическом введении.

9. Объясните различие и сходство вольтамперных характеристик № 2 и 3 на рис. 3 в теоретическом введении.
10. Объясните различие вольтамперных характеристик, полученных при разных яркостях лампы.
11. Зачем в лабораторной работе № 11 используются светофильтры?
12. Для чего меняют накал лампы, используемой в работе № 12?
13. Что такое задерживающий потенциал? Для чего его измеряют?
14. Что такое красная граница фотоэффекта? Как ее определить?
15. Что такое работа выхода? От чего она зависит?
16. Справедлив ли для фотоэлемента закон Ома?
17. Что такое ток насыщения? Как объяснить явление насыщения?
18. Каков характер движения фотоэлектронов в режиме тормозящего напряжения?

# Приложение

## Нахождение физических величин по графику

Часто графики строятся с целью нахождения различных физических величин. Проще всего это сделать, если искомая физическая величина является коэффициентом пропорциональности в линейной функции  $y = k \cdot x + y_0$  (например, жесткость пружины является коэффициентом пропорциональности между значениями силы упругости пружины и деформации). Рекомендуемая последовательность действий:

- 1) нанести на график точки, соответствующие измеренным значениям;
- 2) провести оптимальную прямую через эти точки, таким образом, чтобы количество экспериментальных точек, расположенных выше и ниже оптимальной прямой, было примерно равным (см. рис. 1);
- 3) ограничить полосу, в которой находятся точки, прямыми, параллельными оптимальной линии и проходящими через наиболее удаленные от оптимальной прямой точки (на рис. 1 – штриховые линии);
- 4) определить тангенс угла наклона оптимальной прямой по формуле

$$k = \operatorname{tg}\alpha = \frac{y_m - y_0}{x_0} \text{ в соответствующих единицах измерения.}$$

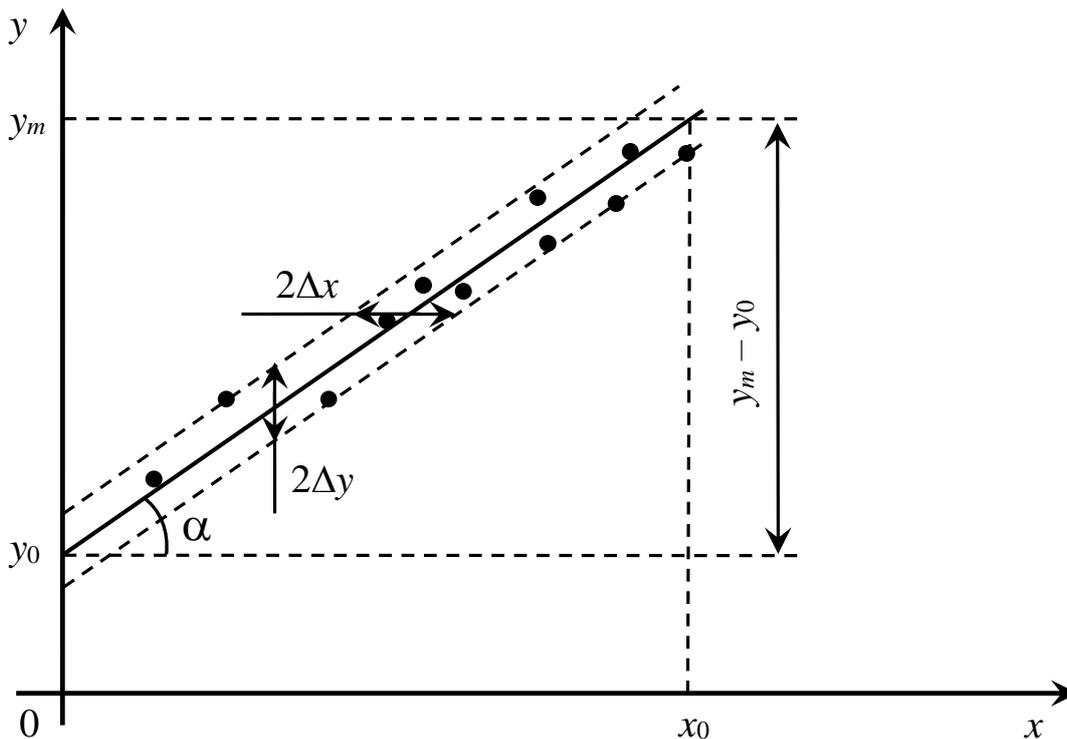


рис. 1

Погрешность искомой физической величины определяется по формулам

$$\delta k = \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{y_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x_0}\right)^2}, \Delta k = k \cdot \delta k.$$

Абсолютные погрешности  $\Delta y$  и  $\Delta x$  определяются из графика, как показано на рис. 1, по соответствующим расстояниям между вспомогательными штриховыми линиями.

