

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

**В.А.Курочкин**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА  
ПО ФИЗИКЕ В - 4**

**ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА**

Москва 2010

ББК 53

К

Рецензент д.ф-м н . Козлов В.Д.

Курочкин В.А.

Физика. Пособие по выполнению лабораторной работы В – 4. Дифракция Фраунгофера. – М.: МГТУ ГА, 2010.- 16 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины ЕН.Ф.03 «Физика» по Учебному плану всех специальностей, утвержденному в 2007 г, для студентов 1 курса всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры . .10 г. и методического совета . .10 г.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА В – 4 ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА

### 1. Цель работы

Изучение явления дифракции света, экспериментальное исследование дифракционной картины от узкой щели, опытное определение длины волны лазерного излучения.

### 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по учебникам [1]-[3]: явление дифракции, особенности дифракции Фраунгофера и Френеля, принцип Гюйгенса-Френеля, метод зон Френеля, условия минимумов и максимумов интенсивности на дифракционной картине от узкой щели. Ознакомьтесь с устройством лабораторной установки. Подготовьте ответы для допуска к лабораторной работе.

### 3. Краткая теория

**Дифракция света** - совокупность явлений, наблюдаемых при распространении световых волн в среде с резкими неоднородностями.

При падении плоской монохроматической волны на **узкую щель** в непрозрачной преграде на удалённом экране наблюдается **дифракционная картина** с характерным чередованием светлых и тёмных полос - **максимумов** и **минимумов** интенсивности  $I$  - при этом свет как бы **огibt** края щели, проникая в область геометрической тени (рис. 1).

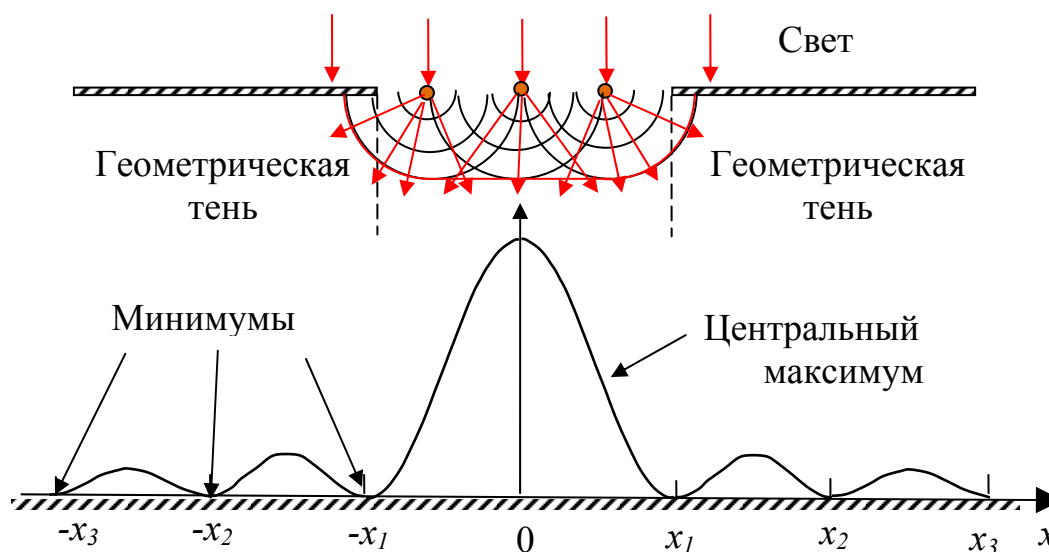


Рис. 1

При достаточно больших расстояниях  $L$  от щели до экрана лучи, идущие в определённую точку экрана, можно считать **параллельными** – в этом случае говорят о **дифракции Фраунгофера**; дифракция в **непараллельных** лучах носит название **дифракции Френеля**.

Условия дифракции Фраунгофера можно также выполнить, поместив за щель собирающую линзу и разместив экран в её фокальной плоскости (рис. 2). В этом случае каждой точке экрана будет соответствовать система параллельных лучей, падающих на линзу под определённым углом  $\varphi$  к её оптической оси (этот угол называют **углом наблюдения**;  $F$  – фокусное расстояние линзы). Для анализа явления дифракции используется **принцип Гюйгенса-Френеля**.

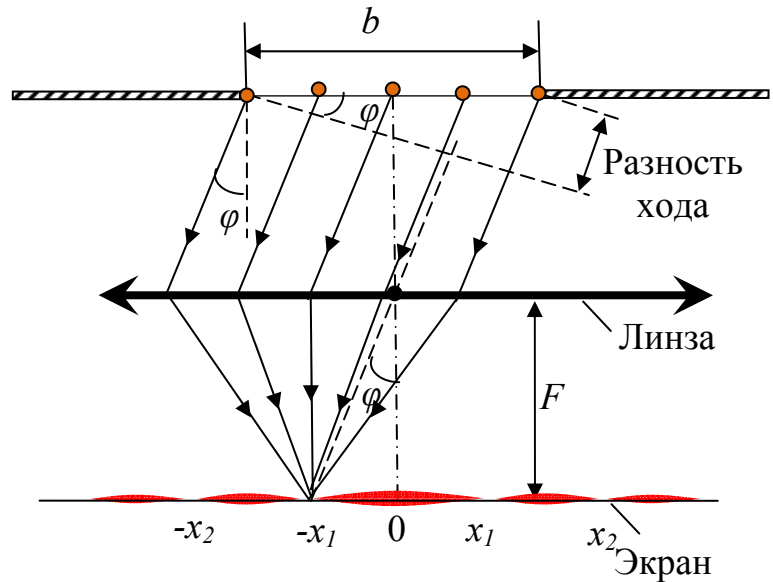


Рис. 2

Согласно этому принципу:

1. Открытый участок волнового фронта представляется в виде множества малых элементов - **вторичных когерентных источников**.
2. Волновой фронт за препятствием является поверхностью, огибающей волновые фронты вторичных волн.
3. Распределение интенсивности света в зоне дифракции является результатом **интерференции** вторичных волн, приходящих от вторичных источников в точки наблюдения.

Полный расчёт функции  $I(x)$  вдоль экрана требует сложения волн от большого (в пределе – бесконечного) количества вторичных источников. В случае, если нас интересуют только положения максимумов и минимумов на дифракционной картине – эти расчёты можно упростить, воспользовавшись методом **зон Френеля**.

Согласно этому методу открытую часть волнового фронта в плоскости щели следует разбить на **зоны** (по сути – группы вторичных источников) в виде полос, параллельных краям щели. При заданном угле наблюдения  $\varphi$  ширина каждой зоны  $a$  выбирается так, чтобы разность хода лучей, приходящих в точку наблюдения от краёв зоны, равнялась  $\lambda/2$ . При таком выборе колебания, возбуждаемые на экране вторичными волнами от краёв двух соседних зон, оказываются в противофазе и гасят друг друга.

На рис.3 показан случай, когда на ширине зоны укладываются две зоны Френеля-  $AB$  и  $BC$ . Согласно методу Френеля разности хода лучей, идущих от краёв зон в точку наблюдения под углом  $\varphi$ , равны:

$$BF = CG = a \sin \varphi = \lambda/2. \quad (1)$$

Условие (1) выполняется также для любых пар вторичных источников, отстоящих от точек  $A$  и  $B$  (например, для середин зон  $D$  и  $E$ ). В итоге две соседние зоны, показанные на рис. 3, дадут на экране интенсивность света  $I=0$ . Очевидно, что таким же будет результат и для любого **чётного** количества  $N$  зон Френеля:  $N=2m$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ).

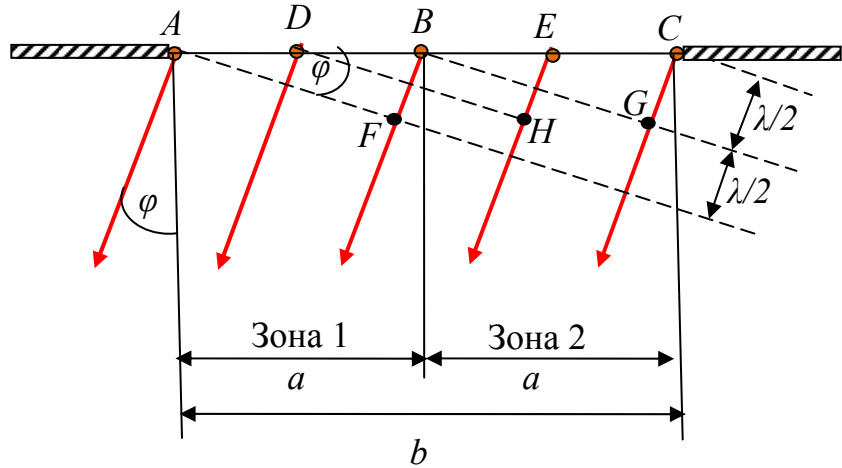


Рис. 3

Умножая обе части равенства (1) на  $2m$  и учитывая, что  $Na=b$  ( $b$ -ширина щели), получим следующее **условие минимумов интенсивности** на дифракционной картине:

$$b \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}. (m=1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

В формуле (2) число  $m$  носит название **порядка минимума**, а знаки  $+$  и  $-$  отражают симметричность расположения минимумов относительно центра дифракционной картины (точки  $\pm x$ ; на рис. 2).

В случае, если общее количество зон Френеля на ширине щели будет **нечётным** ( $N=2m+1$ ;  $m=1, 2, 3, \dots$ ), то одна из зон окажется некомпенсированной. Этот случай соответствует **условию максимума**:

$$b \cdot \sin \varphi = \pm (2m+1) \frac{\lambda}{2} (m=1, 2, 3, \dots). \quad (3)$$

В центральной точке дифракционной картины, наблюдаемой под углом  $\varphi=0$ , располагается наиболее интенсивный **центральный максимум**, соответствующий взаимному усилению всех вторичных волн с нулевым сдвигом по фазе.

Необходимо подчеркнуть, что размеры зон Френеля и их количество на ширине зоны зависят от угла наблюдения  $\varphi$ ; при этом число  $N$  будет целым (чётным или нечётным) только для точек минимумов или максимумов.

При удалении от центра дифракционной картины интенсивность  $I$  резко па-

дает. В связи с этим реально удаётся наблюдать минимумы сравнительно невысоких порядков, для которых углы  $\varphi$  очень малы. Учитывая это, можно записать (см. рис. 2):

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{|x_m|}{F}, \quad (4)$$

где  $|x_m|$  - модуль координаты минимума порядка  $m$  в фокальной плоскости линзы,  $F$  - фокусное расстояние линзы. Тогда условие минимумов (2) для  $|x_m|$  приобретает вид:

$$|x_m| = \lambda F \frac{m}{b}. \quad (5)$$

#### 4. Описание установки и методика проведения эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис.4. Источником монохроматической световой волны служит полупроводниковый лазер 1. Излучение лазера направляется на узкую щель 2, снабжённую барабаном 3 для регулировки ширины щели  $b$ . Лучи, идущие от щели, попадают на собирающую линзу 4, в фокальной плоскости 5 которой образуется дифракционная картина. Плоскость 5 одновременно является предметной плоскостью микропроектора 6. Микропроектор увеличивает дифракционную картину и с помощью поворотного зеркала 7 переносит её на экран 8. С помощью барабана 9 можно перемещать входную линзу микропроектора вдоль дифракционной картины на предметной плоскости 5. Эти перемещения наблюдаются на экране 8 как горизонтальные смещения дифракционной картины относительно условной отметки «0». Для

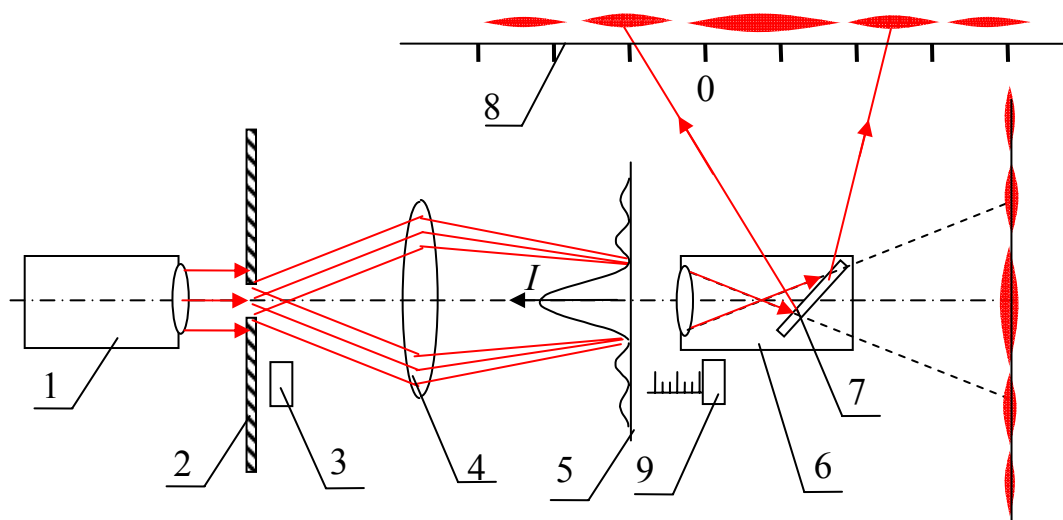


Рис. 4

определения координат минимумов  $|x_m|$  барабан 9 снабжён специальным отсчётным устройством. Это устройство состоит из горизонтальной шкалы с

миллиметровыми делениями и нониуса для отсчёта десятых и сотых долей мм, при этом и шкала и нониус проградуированы в действительных расстояниях на предметной плоскости 5 .

В связи с тем, что начало отсчёта шкалы барабана 9 не совпадает с центром дифракционной картины, для отсчётов по шкале и нониусу используется специальный символ  $S$ . Пример определения величины  $S$  показан в верхней части рис. 5.

С целью снижения систематических погрешностей величин  $|x_m|$  последние определяются как половины расстояний между двумя симметрично расположенными минимумами порядка  $m$ , то есть,  $|x_m| = \frac{S_2 - S_1}{2}$ . Последнее соотношение графически иллюстрируется в нижней части рис.5.

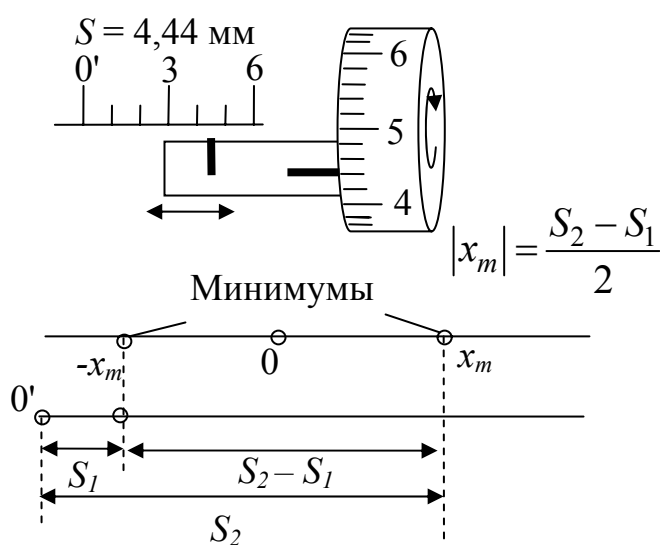


Рис. 5

Следует отметить, что на экране установки вместо дифракционных полос, параллельных краям щели, наблюдается система светлых пятен, вытянутых в направлении, поперечном щели, как показано в нижней части рис. 2. Это явление можно объяснить следующим образом. Учтём, что длина освещаемого участка вдоль щели значительно превышает ширину щели  $b$  (несмотря на относительно малую площадь сечения лазерного пучка). При этих условиях дифракция должна проявляться только в направлении, поперечном щели, в то время как вдоль щели (в вертикальном направлении на экране) должны «работать» законы геометрической оптики. В результате линза выполняет двойную роль: формирует дифракционную картину в поперечном (горизонтальном) направлении и фокусирует эту картину в продольном (вертикальном) направлении, сокращая дифракционные полосы до размеров пятен.

Будем предполагать, что фокусировка линзой дифракционных полос не нарушает теоретических закономерностей дифракции Фраунгофера, выражаемых формулой (5). Эту гипотезу можно проверить экспериментально, сравнивая известную величину  $\lambda = 0,635$  мкм для применяемого в установке лазера с опытным значением  $\lambda$ , получаемым из измерений зависимостей  $|x_m|(b, m)$ . При близости этих значений  $\lambda$  в пределах погрешностей измерений можно будет считать принятую гипотезу достоверной.

Опытное значение  $\lambda$  определяется следующими двумя способами:

1. Измеряется зависимость модуля координаты минимума определённого порядка  $m$  от величины, обратной ширине щели  $b$ . Согласно формуле (5) зависимость  $|x_m|(1/b)$  линейна и имеет коэффициент наклона

$$a = \frac{\Delta|x_m|}{\Delta(1/b)} = \lambda Fm,$$

откуда

$$\lambda = \frac{a}{Fm}. \quad (6)$$

Среднеквадратическая погрешность  $\lambda$  рассчитывается в этом случае по формуле

$$\sigma_\lambda = \frac{\sigma_a}{Fm}, \quad (7)$$

где  $\sigma_a$  - среднеквадратическая погрешность коэффициента наклона  $a$  (погрешность  $F$  при этом считается пренебрежимо малой).

2. Измеряется зависимость модулей координат минимумов от их порядков  $m$  при фиксированной ширине щели  $b$ , после чего длина волны  $\lambda$  определяется на основе равенства (5) по формуле:

$$\lambda = \frac{b|x_m|}{Fm}. \quad (8)$$

В этом случае среднеквадратическая погрешность  $\sigma_\lambda$  рассчитывается не из графика, а по совокупности опытных значений  $\lambda_i$ .

## **5. Порядок выполнения работы**

5.1. Подготовка установки к работе (выполняет лаборант).

5.1.1. Освободить оптическую скамью от всех модулей, кроме лазера. Ручку «ток» перевести в крайнее левое положение. Тумблеры «сеть» и «лазер» установить в положение «выключено». Включить установку в сеть. Перевести тумблер «сеть» в положение «включено», а затем включить тумблер «лазер». Ручку «ток» установить в крайнее правое положение.

5.1.2. Пользуясь регулировочными винтами на корпусе лазера, установить светящееся пятно в центр кругового углубления на правой боковой стенке установки.

5.1.3. Вращая выходной окуляр лазера и пользуясь листом белой бумаги, добиться постоянства формы и размеров светового пятна на всей длине оптической скамьи.



5.1.4. С помощью регулировочных винтов установить положение собирающей линзы по центру металлической оправы модуля. Установить на оптическую скамью: модуль щели на деление оптической скамьи «20», модуль линзы – на деление «35», модуль микропроектора – на деление «45». Закрепить положения модулей нижними винтами.

5.1.5. Пользуясь регулировочными винтами на корпусе лазера, откорректировать положение освещаемого лазером участка по центру щели.

5.2. Получение дифракционной картины и регулировка её расположения на экране установки.

5.2.1. Установить барабан щели 3 на деление «3». Освободив нижний винт модуля линзы и перемещая модуль вдоль оптической скамьи, получить чёткое, сфокусированное изображение дифракционной картины на экране 8 установки (см. рис. 2). Зафиксировать положение модуля линзы нижним винтом.

5.2.2. Отрегулировать положение дифракционной картины относительно экрана 8:

- поворотом корпуса щели как целого вместе с барабаном 3 добиться горизонтального положения дифракционной картины на экране 8.

- вращая верхний регулировочный винт на модуле линзы, приблизить дифракционную картину к горизонтальной линии с отметкой «0» на экране 8 (см. рис. 6).

5.3. Измерение зависимости координат минимума первого порядка от ширины щели.

5.3.1. Установить барабан щели 3 в положение «2».

5.3.2. Вращая барабан 9 микропроектора и перемещая таким образом дифракционную картину по горизонтали, совместить левый минимум третьего порядка ( $m=3$ ) с отметкой «0» на экране 8 (см. верхний рис. 6). Показание  $s_1$  нониуса и барабана микропроектора в мм занести в табл.1 (пример записи показаний дан в верхней части рис. 5).

5.3.3. Вращая барабан микропроектора, совместить с отметкой «0» на экране 8 правый минимум третьего порядка (см. нижний рис.6). Соответствующее показание  $s_2$  нониуса и барабана микропроектора в мм записать в табл.1.

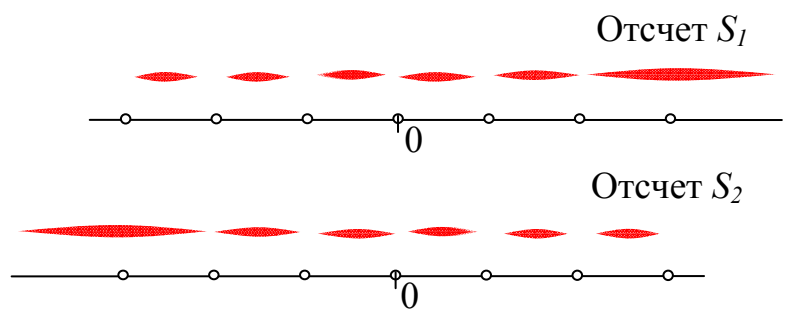


Рис. 6

5.3.4. Аналогичные измерения провести при пяти других положениях барабана щели: 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5. Соответствующие значения  $s_1$  и  $s_2$  в мм занести

в табл.1.

5.4. Измерение зависимости координат минимумов от их порядков.

5.4.1. Установить барабан щели 3 в положение «3,5». Аналогично пунктам 5.3.2 и 5.3.3 зафиксировать показания нониуса и барабана микропроектора  $s_1$  и  $s_2$  в мм для минимумов второго порядка ( $m = 2$ ). Записать данные в табл.2.

5.4.2. Не изменяя положения барабана щели (и, следовательно, ширины щели  $b$ ), аналогичные измерения провести для минимумов третьего ( $m = 3$ ) и четвёртого ( $m = 4$ ) порядков. Занести соответствующие величины  $s_1$  и  $s_2$  в мм в табл.2.

5.4.3. Установить барабан щели 3 в положение «4». Аналогично пунктам 5.4.1 и 5.4.2 зафиксировать и записать в табл.2 соответствующие показания нониуса и барабана микропроектора  $s_1$  и  $s_2$  в мм для минимумов порядков  $m = 3$  и  $m = 4$ .

## **6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта**

6.1. По данным табл. 1 и 2 рассчитать модули координат минимумов  $|x_m|$  как величины, равные половинам разностей соответствующих значений  $s_2$  и  $s_1$  (см. рис.5). Результаты в мм записать в табл. 1 и 2.

6.2. Для делений барабана щели, указанных в табл.1, рассчитать величины  $1/b$  в м, используя при этом соответствующие величины  $b$  в мм, указанные в табл.3.

6.3. Открыть на компьютере папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе лабораторного компьютера; выбрать файл для графической обработки данных методом наименьших квадратов (МНК) под названием «Расчёт  $y = ax$  МНК». Ввести в таблицу файла величины  $|x_m|$  и  $1/b$  из табл.1, выражая их в м.

6.4. Результаты компьютерного расчёта коэффициента наклона  $a$  графика  $|x_m|(1/b)$  и среднеквадратической погрешности наклона  $\sigma_a$  записать в табл.1. Ориентируясь на график, изображённый на компьютере, построить аналогичный график в тетради, отметив на нём все экспериментальные точки.

6.5. По полученному значению коэффициента наклона  $a$  и формулам (6) и (7) рассчитать длину волны лазерного излучения  $\lambda$  и среднеквадратическую погрешность  $\sigma_\lambda$  (величину фокусного расстояния линзы принять равной  $F = 0,106$  м). Принимая величину доверительной вероятности  $P = 0,68$ , и стандартные погрешности равными  $\Delta a \approx \sigma_a$  и  $\Delta \lambda \approx \sigma_\lambda$ , записать результат в табл.1 в стандартной форме  $\lambda = \dots \pm \Delta \lambda$  мкм

6.6. Для делений барабана щели 3, указанных в табл.2, записать соответствующие значения ширины щели  $b$ , используя при этом табл.3.

6.7. По данным табл.2 рассчитать (в мм) модули координат минимумов  $|x_m|$  соответствующих порядков  $m$  по формуле  $|x_m| = \frac{s_2 - s_1}{2}$ ; записать результаты в м в табл.2.

Таблица 1

Деления барабана щели	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$S_1$ , мм						
$S_2$ , мм						
$ x_m  \cdot 10^{-4}$ , м						
$1/b \cdot 10^3$ , м <sup>-1</sup>						
$a = \dots \text{ м}^2$ ; $\sigma_a = \dots \text{ м}^2$ ; $\sigma_\lambda = \dots \text{ мкм}$ ; $\lambda = \dots \pm \Delta\lambda \text{ мкм}$						

Таблица 2

Деления барабана щели	3,5			4		
$b$ , мм						
$m$	2	3	4	2	3	4
$S_1$ , мм						
$S_2$ , мм						
$ x_m $ , мм						
$\lambda \cdot 10^{-7}$ , м						
$\bar{\lambda} = \dots \text{ мкм}$ ; $\sigma_{\bar{\lambda}} = \dots \text{ мкм}$ ; $\lambda = \dots \pm \Delta\lambda \text{ мкм}$						

Таблица 3

Деления барабана щели	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$b$ , мм	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45

6.8. По данным табл. 2 и формуле (8) рассчитать величины длины волны лазерного излучения  $\lambda$  в м и занести данные в табл.2.

6.9. В папке компьютера «Обработка результатов ЛР» выбрать файл «Расчёт стандартной ошибки». Ввести в таблицу файла величины  $\lambda$  в  $m$  из табл.2. Результаты компьютерного расчёта- среднее значение  $\bar{\lambda}$  и среднеквадратическую погрешность  $\sigma_{\bar{\lambda}}$  занести в табл.2. Принимая величину доверительной вероятности  $P=0,68$  и стандартную погрешность равной  $\Delta\lambda \approx \sigma_{\bar{\lambda}}$ , записать результат в табл.2 в стандартной форме  $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$  мкм.

6.10. Сравнить опытные значения  $\lambda$  в табл.1 и 2 с известной величиной  $\lambda=0,635$  мкм для применяемого в установке лазера. По итогам сравнения сделать выводы о достоверности теоретической гипотезы, принятой в разделе 4.

### **7. Вопросы для допуска к лабораторной работе**

7.1. При каких условиях распространения световых волн могут возникать явления дифракции? Каковы особенности дифракционной картины при падении плоской монохроматической волны на узкую щель бесконечной длины?

7.2. В чём заключается принцип Гюйгенса-Френеля? Как на основе этого принципа можно объяснить появление максимумов и минимумов интенсивности на экране за границами участка геометрической тени?

7.3. Поясните суть метода зон Френеля. Сколько зон Френеля уместится на ширине щели, если идущие от зон параллельные лучи сходятся в точке минимума третьего порядка?

7.4. Можно ли утверждать, что количество  $N$  зон Френеля, укладываемых на открытом участке щели, зависит только от ширины щели и длины волны излучения? Могут ли существовать на экране такие точки, для которых величина  $N$  не является целым числом?

7.5. Рассчитайте разность хода и разность фаз между двумя параллельными лучами, идущими от краёв щели (см. рис. 2 ) шириной  $b=0,5$  мм, если угол наблюдения  $\varphi = 10^{-3}$  рад , длина волны  $\lambda = 1,0$  мкм; принять  $\sin \varphi \approx \varphi$ .

7.6. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля? Какими средствами в лабораторной установке обеспечиваются условия наблюдения дифракции Фраунгофера?

7.7. Объясните, почему дифракционная картина на экране установки имеет вид не полос, а пятен, вытянутых в горизонтальном направлении? Какое теоретическое предположение относительно наблюдаемой картины подлежит экспериментальной проверке?

7.8. Какую роль в установке играет микропроектор? В каких делениях проградуированы нониус и барабан микропроектора? Какие изменения происходят

в наблюдаемой картине на экране при вращении барабана микропроектора?

7.8. Рассчитайте расстояние (в мм) между двумя минимумами второго порядка, если ширина щели  $b = 0,3$  мм, длина волны  $\lambda = 0,75$  мкм, фокусное расстояние собирающей линзы  $F = 0,2$  м.

7.9. Какие зависимости между параметрами дифракционной картины измеряются в эксперименте? Каким образом на основе этих измерений определяется длина волны лазерного излучения? Как определяются погрешности опытного значения длины волны?

## 8. Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.: Наука, 1988.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.