

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра физики

С.К. Камзолов

## ФИЗИКА

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению лабораторной работы В–5  
«Измерение ширины с помощью дифракции света»

*для студентов I курса  
всех направлений и специальностей  
всех форм обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2021

УДК 535.42  
ББК 53  
К18

Рецензент:

*Новиков С.М.* – канд. техн. наук, доцент

**Камзолов С.К.**

К18      Физика [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы В-5 «Измерение ширины с помощью дифракции света» / С.К. Камзолов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов I курса всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 10.03.2021 г. и методического совета 16.03.2021 г.

**УДК 535.42**  
**ББК 53**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 18.05.2021 г.  
Формат 60x84/16 Печ. л. 0,75 Усл. печ. л. 0,7  
Заказ № 751/0330-УМП11 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А  
Тел.: (495) 973-45-68  
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический  
университет гражданской авиации, 2021

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА В-5 «ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЩЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИИ СВЕТА»

## Введение

Явление дифракции света широко используется в науке и на практике, начиная со спектрального анализа излучения (что позволяет, например, определять химический состав материала излучающих тел) до применения в медицине. Мы же рассмотрим применение дифракции для прецизионных измерений, в частности, для точного измерения ширины тонких зазоров, узких щелей.

## 1. Цель работы

Изучение явления дифракции света, экспериментальное определение ширины щели с помощью дифракции Фраунгофера. Калибровка дифракционной щели с изменяемой шириной.

## 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебнику [1,2], а именно: явление дифракции, принцип Гюйгенса-Френеля, метод зон Френеля, дифракция Фраунгофера на узкой щели. Изучите также раздел 3 методического описания. Ознакомьтесь с конструкцией лабораторного стенда, методикой эксперимента, порядком проведения измерений и обработки их результатов (разделы 4, 5, 6 данного методического описания). Подготовьте проект отчета по лабораторной работе, а также ответы на вопросы из раздела 7.

## 3. Краткая теория

Общее определение *дифракции света*: это совокупность явлений, наблюдаемых при прохождении световых волн в среде с резкими неоднородностями, приводящих к отклонениям от законов геометрической оптики. Например, попадание света в область геометрической тени около границ непрозрачных тел, разложение белого света в спектр при прохождении сквозь малые отверстия и т.п.

При падении плоской световой монохроматической волны на узкую щель в непрозрачной преграде свет явно проникает в область геометрической тени, и на удалённом экране наблюдается дифракционная картина с характерным чередованием светлых и тёмных полос (максимумов и минимумов интенсивности, рис. 1). В случае дифракции Фраунгофера плоская волна падает нормально на преграду со щелью, а экран находится на достаточно большом удалении от щели, так что падающие на него лучи можно считать параллельными. Чтобы выполнить второе условие, экран просто помещают в фокальной плоскости собирающей линзы (рис. 2).

На рис. 2 также изображено наблюдаемое на экране чередование максимумов и минимумов интенсивности света. Чтобы определить на экране координаты и тех, и других, воспользуемся методом зон Френеля.

Рассмотрим

для примера точку

первого левого минимума. В ней сойдутся те лучи от находящихся в щели вторичных источников излучения (вспомним принцип Гюйгенса), которые параллельны лучу, проходящему через оптический центр тонкой линзы без преломления. Т.е. в этом случае пучок лучей падает на линзу под углом  $\varphi$  к главной оптической оси (рис. 2). Этот угол будем далее называть углом наблюдения.

Согласно методу Френеля поверхность вторичных источников в плоскости щели разбивают на **зоны** (по сути – группы вторичных источников) плоскостями, нормальными оси пучка, т.е. под тем же углом  $\varphi$  к плоскости щели (рис. 3). Расстояние между плоскостями выбирается равным полудлине волны излучения. В таком случае лучи от вторичных источников каждой пары соседних зон приходят в точку наблюдения в противофазе и гасят друг друга.

При чётном числе зон Френеля на экране под углом  $\varphi$  будет наблюдаться минимум интенсивности света. В частности, для первого левого минимума (рис. 2), т.е. для точки с координатой  $(-x_1)$ , число таких зон равно двум (рис. 3).

Общее условие для углов, под которыми мы видим **минимумы интенсивности**, будет выглядеть так:

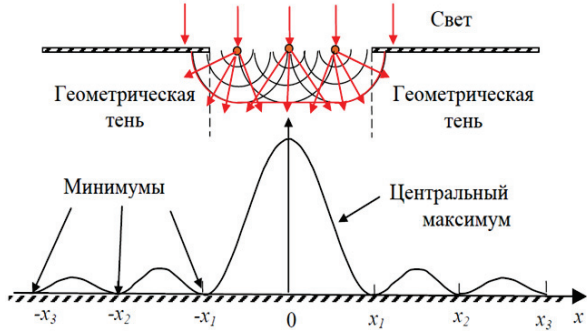


Рис. 1.

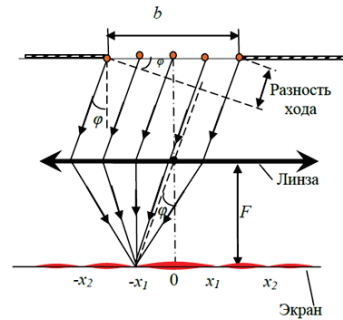


Рис. 2.

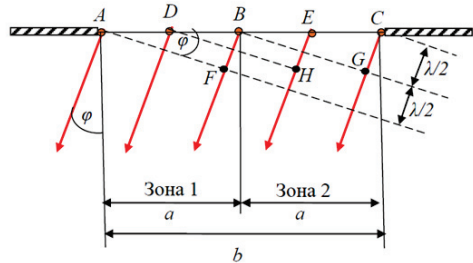


Рис. 3.

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

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $m$  – порядок минимума (точки  $x_1, x_2, \dots$  на рис. 2).

При нечётном числе зон Френеля в точке наблюдения будет виден **максимум интенсивности**, поскольку вторичные источники одной из зон окажутся нескомпенсированными, что соответствует условию:

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

Заметим, что в центре дифракционной картины (т.е. при  $\varphi = 0$ ) располагается наиболее интенсивный центральный максимум, поскольку в эту точку излучение всех вторичных источников приходит синфазно (с нулевым сдвигом по фазе).

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

Определить ширину щели можно, используя как уравнение (1), так и уравнение (2) при известной длине волны излучения  $\lambda$ . Для этого необходимо определить положение либо минимума, либо, соответственно, максимума интенсивности. Но «поймать» точку максимума светлого участка спектра визуально сложнее, чем точку минимума. Поэтому будем использовать уравнение (1).

Поскольку при удалении от центра дифракционной картины интенсивность резко падает, реально удаётся наблюдать минимумы сравнительно невысоких порядков. В этих случаях число зон Френеля невелико, и при условии  $b \gg \lambda$  углы  $\varphi$  очень малы (рис. 3). Учитывая это, можно записать (см. рис. 2):

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{|x_m|}{F}, \quad (3)$$

где  $x_m$  – координата минимума порядка  $m$  на экране,  $F$  – фокусное расстояние линзы. Подставляя значение  $\sin \varphi$  из уравнения (3) в выражение (1), получим:

$$b = \frac{m\lambda F}{|x_m|}. \quad (4)$$

Схема 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 обра-

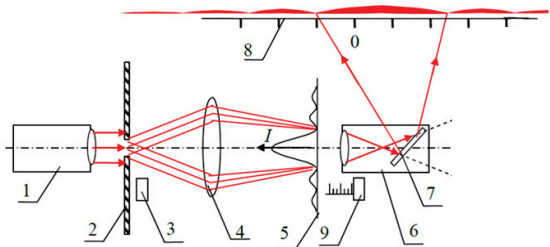


Рис. 4.

зуется 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 6 вдоль дифракционной картины на предметной плоскости 5. Эти перемещения наблюдаются на экране 8 как горизонтальные смещения дифракционной картины относительно условной отметки «0».

Для определения координат минимумов барабан 9 снабжён специальным отсчётным устройством. Это устройство (рис. 5) состоит из основной горизонтальной шкалы с миллиметровыми делениями (0 – 6 мм) и вспомогательной шкалы (нониуса) для отсчёта десятых и сотых долей мм на ручке барабана. При этом градуировка шкалы такова, что отсчеты по ним соответствуют действительным расстояниям на предметной плоскости 5. На рис. 5, вверху приведён пример записи отсчёта, взятого по основной шкале и шкале нониуса.

Координаты начала отсчёта «0» горизонтальной шкалы 8 на экране не соответствует нулевому показанию барабана 9. В связи с этим, расстояние от центра картины до рассматриваемого минимума порядка  $m$  определяется как половина расстояния между двумя симметрично расположенными минимумами:

$$|x_m| = \frac{s_2 - s_1}{2}. \quad (5)$$

Здесь  $s_1$  и  $s_2$  – результаты отсчетов по шкале микропроектора соответственно для левого и правого минимума выбранного порядка  $m$ .

Первый отсчёт  $s_1$  снимают, установив с помощью барабана 9 минимум рассматриваемого порядка дифракционной картины (например, третьего порядка, левый от центра, рис. 6) напротив «0» шкалы 8 на экране. (*Примечание:* в качестве нуля может быть принята любая удобная точка на шкале экрана 8. Поэтому назовём эту точку «условный 0».)

Далее, вращая барабан микропроектора, совмещают с выбранной отметкой «0» на экране 8 правый минимум того же порядка и снимают отсчёт  $s_2$ .

В работе предлагается выполнить два упражнения:

1) измерить ширину щели при заданном делении на барабане щели 3 (задаётся таблицей 1);

2) откалибровать барабан 3, сопоставив его деления соответствующим значениям ширины щели.

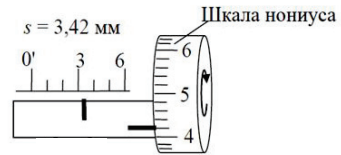


Рис. 5.

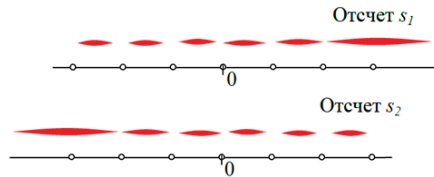


Рис. 6.

В первом упражнении ширина определяется путем измерения положения нескольких максимумов, что позволяет добиться повышенной точности результата. Согласно формуле (4) зависимость  $|xm| = f(m)$  линейна и на графике этой зависимости имеет коэффициент наклона

$$a = \frac{\Delta|x_m|}{\Delta m} = \frac{\lambda F}{b},$$

измерив который, можно определить искомую ширину щели:

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

## 5. Порядок выполнения работы

**5.1.** Подготовка установки к работе (выполняется под руководством преподавателя или лаборанта).

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 с помощью листа белой бумаги (в качестве экрана), 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.

5.2.1. Установить барабан щели 3 на деление «3». Освободив нижний винт 8 модуля линзы и перемещая модуль вдоль оптической скамьи, получить чёткое, сфокусированное изображение дифракционной картины на экране 8 установки (см. рис. 4). 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 с учётом *Примечания*).

### 5.3. Измерение зависимости координат минимумов от их порядков.

5.3.1. Установить барабан щели 3 в положение, заданное таблицей 1.

Таблица 1

№ бригады	1; 5	2; 6	3; 7	4; 8
Деление $N$ шкалы барабана щели	1	1,5	2	2,5

5.3.2. Вращая барабан 9 микропроектора и перемещая таким образом дифракционную картину по горизонтали, совместить **левый** минимум первого порядка ( $m = 1$ ) с условной отметкой «0» на экране 8 (см. верхнюю часть рис. 6). Показание  $s_1$  шкалы с нониусом барабана микропроектора в мм (см. рис. 5) занести в табл. 2.

5.3.3. Вращая барабан микропроектора, совместить с отметкой «0» на экране 8 **правый** минимум первого порядка (см. рис.6). Соответствующее показание  $s_2$  в мм записать в табл. 2.

5.3.4. Аналогичные измерения провести для минимумов следующих порядков:  $m = 2, 3, 4, 5$ . Соответствующие значения  $s_1$  и  $s_2$  в мм занести в табл.2.

### 5.4. Калибровка шкалы барабана щели с изменяемой шириной.

5.4.1. Установить барабан 3 щели в положение «1». Аналогично пунктам 5.3.2 и 5.3.3 зафиксировать показания шкалы с нониусом барабана микропроектора  $s_1$  и  $s_2$  в мм для минимумов четвёртого порядка ( $m = 4$ ). Записать данные в табл.3.

5.4.2. Устанавливая барабан 3 щели последовательно в положения 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4, провести аналогичные измерения также для минимума четвёртого порядка ( $m = 4$ ). Занести соответствующие величины  $s_1$  и  $s_2$  в мм в табл.3.

## 6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

**6.1. и 6.2.** По п.п. 5.1. и 5.2. дополнительная обработка не производится.

### 6.3. Определение ширины щели для заданного деления шкалы её барабана.

6.3.1. По данным таблицы 2, используя формулу (5), рассчитать модули координат минимумов  $|x_m|$  всех порядков  $m$ . Результаты записать в таблицу 2.

6.3.2. Построить график экспериментальной зависимости  $|x_m| = f(m)$ . Для этого следует использовать специальную программу компьютерной обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов (МНК). Программа находится на рабочем столе лабораторного ПК в папке «Обработка результатов ЛР», войдя в которую, необходимо открыть файл «МНК  $y = ax$ ». При



введении данных из таблицы 2 координаты минимумов лучше выразить в метрах. Формат вводимых чисел должен соответствовать требованиям программы, указанным в верхней части её окна.

Результаты компьютерного расчёта коэффициента наклона  $a$  графика зависимости  $|xm| = f(m)$  и стандартной погрешности коэффициента наклона  $\sigma_a$  записать в таблицу 2.

6.3.3. По полученному значению коэффициента наклона  $a$  и формуле (6) рассчитать ширину щели (длина волны излучения используемого в работе лазера  $\lambda = 0,635$  мкм, величина фокусного расстояния линзы  $F = 0,106$  м). Результат записать в таблицу 2.

6.3.4. Определить абсолютную погрешность  $\Delta b$  полученной ширины щели. Для этого сначала следует вычислить абсолютную  $\Delta a$  и относительную  $\delta a$  погрешности определения коэффициента наклона прямой. Если принять величину доверительной вероятности (надежности измерения)  $P = 0,7$ , а коэффициент Стьюдента  $t_P \approx 1,0$ , то  $\Delta a \approx \sigma_a$ . Далее, пренебрегая ошибками в определении длины волны излучения и фокусного расстояния линзы (т.е. считая относительные ошибки для углового коэффициента  $a$  и ширины щели  $b$  равными:  $\delta a = \delta b$ ), определить абсолютную ошибку  $\Delta b$ . Окончательный результат расчёта в стандартной форме записать в таблицу 2.

#### 6.4. Калибровка шкалы барабана щели.

6.4.1. По данным таблицы 3, используя формулу (5), рассчитать модули координат минимумов  $|x_m|$  для всех делений  $N$  барабана щели. Результаты записать в таблицу 3.

6.4.2. По полученным данным, используя формулу (4), рассчитать ширину щели  $b$  для каждого деления  $N$  шкалы её барабана. Результаты записать в таблицу 3.

6.4.3. Используя Программу «МНК  $y = ax + b$ » (находится на рабочем столе лабораторного ПК в папке «Обработка результатов ЛР»), построить зависимость ширины щели  $b$  от деления  $N$  шкалы её барабана.

6.4.4. В таблицу 3 записать полученную в виде полинома зависимость  $b(N)$ .

#### 6.5. Сделать выводы по лабораторной работе.

## 7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

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

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

7.3. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля?

7.4. Какими средствами в лабораторной установке обеспечиваются условия наблюдения дифракции Фраунгофера?

7.5. Какую роль в установке играет микропроектор?

7.6. В каких ценах делений проградуирован нониус на барабане микропроектора?

7.7. Какие зависимости между параметрами дифракционной картины измеряются в первом эксперименте?

7.8. Каким образом на основе этих измерений определяется ширина щели?

7.9. Как определяется погрешность полученного значения ширины щели?

## 8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Издат. центр «Академия», 2014.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика. – М.: Астрель АСТ, 2016.

## 9. Таблицы измерений и результатов

Таблица 2

Деление шкалы барабана щели		$N = \dots$	$\lambda = 0,635 \text{ мкм}$		$F = 0,106 \text{ м}$	
$m$	1	2	3	4	5	
$S_1, \text{ мм}$						
$S_2, \text{ мм}$						
$ x_m , \text{ мм}$						
$a = \dots \text{ м}$		$\sigma_a = \dots \text{ м}$		$\delta_b = \delta_a = \dots \%$		
$b = \dots \text{ мм}$		$\Delta b = \dots \text{ мм}$		$b = (\dots \pm \dots) \text{ мм}$		

Таблица 3

$m = 4$							
$N$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$S_1, \text{ мм}$							
$S_2, \text{ мм}$							
$ x_m , \text{ мм}$							
$b, \text{ мм}$							
$b = \dots N + \dots, \text{ мм}$							

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение.....	3
1. Цель работы.....	3
2. Подготовка к работе.....	3
3. Краткая теория.....	3
4. Описание установки и методика проведения эксперимента.....	5
5. Порядок выполнения работы.....	7
6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта.....	8
7. Вопросы для допуска к лабораторной работе.....	10
8. Литература.....	10
9. Таблицы измерений и результатов.....	11