

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Лабораторная работа №4.3.1
Излучение дифракционного света

Работу выполнил
Лохматов Арсений Игоревич
Б03-303



Долгопрудный, 2025

1 Теоретическая часть

Цель работы: исследовать явление дифракции Френеля и Фраунгофера на одной и двух щелях, изучить дифракции на разрешающую способность оптических инструментов; проверить теоретические соотношения для положения максимумов при дифракции Френеля и Фраунгофера.

Оборудование: оптическая скамья, ртутная лампа, светофильтр, щели с регулируемой шириной, рамка с вертикальной нитью, экран с двойной щелью, микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом, зрительная труба.

Схема установки для наблюдения дифракции Френеля представлена на рисунке 1. Свет от ртутной лампы Л, пропущенной через оранжевый светофильтр Ф со средней длиной волны $\lambda = 578$ нм, падает на входную щель S_1 . Щель S_1 находится в фокусе коллиматора - собирающей линзы O_1 . Коллиматор создаёт параллельный пучок монохроматического света, освещающий щель S_2 , на которой и происходит дифракция. Дифракционная картина рассматривается с помощью микроскопа М, сфокусированного на некоторую плоскость наблюдения П.

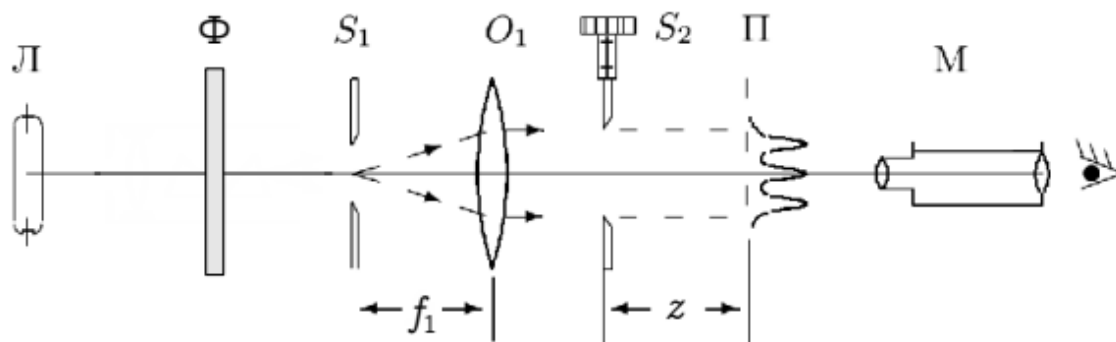


Рис. 1: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

Распределение интенсивности света в плоскости наблюдения П проще всего рассчитывать с помощью зон Френеля (для щели их так же называют зонами Шустера). При освещении щели S_2 параллельным пучком лучей (плоская волна) зоны Френеля представляют собой полосы, параллельные краям щели (рисунок 2).

Результирующая амплитуда в точке наблюдения определяется суперпозицией колебаний от тех зон Френеля, которые не перекрыты створками щели. Границы зон Френеля/Шустера ξ_m определяются соотношением

$$\xi_m = \pm \sqrt{mz\lambda}, \quad m \in \mathbb{N},$$

где ξ отсчитывается от центра щели, z - расстояние от центра щели до плоскости наблюдения П, а λ - длина волны. При ширине щели b ($-b/2 < \xi < b/2$) полное число открытых зон для точки наблюдения на оси равно

$$m = \frac{b^2}{4\lambda z}.$$

По определению, разделение волнового фронта на зоны Френеля производится так, чтобы излучение от соседних зон находилось в противофазе. Иными словами, разность хода (от поверхности фронта до точки наблюдения) между краями соседних зон равна $\lambda/2$. Поэтому,

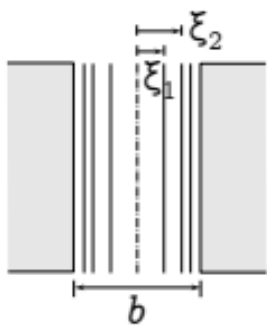


Рис. 2: Зоны Шустера в плоскости щели

когда открыто чётное число зон Френеля, на оси системы наблюдается минимум дифракционной картины (тёмная полоса). Если число открытых зон нечётно, в центре картины - максимум (светлая полоса).

Зафиксируем размер щели b и проанализируем, как меняется картина в зависимости от расстояния до плоскости наблюдения z . Если число открытых зон Френеля велико, $m \gg 1 (z \rightarrow 0)$, мы приходим к пределу геометрической оптики. В нём дифракционная картина отсутствует, а размер изображения щели совпадает с шириной самой щели b . Дифракционная картина наблюдается только в узкой полосе вблизи границ щели (дифракция на краю экрана). При удалении от плоскости геометрического изображения эти две группы полос постепенно расширяются, заполняя всё изображение щели. При $m \sim 1$ на щели наблюдается сложная картина из небольшого числа дифракционных полос. При дальнейшем удалении ($m \ll 1, z \rightarrow \infty$) дифракционная картина начинается упрощаться и расширяться, переходя в режим Фраунгофера - затухающие по интенсивности эквидистантные полосы с характерным угловым размером центральной полосы λ/b .

Амплитуду света в произвольной точке плоскости наблюдения можно определить графически с помощью векторной диаграммы - спирали Корню.

Распределение амплитуд в режиме дифракции Френеля ($m \sim 1$) довольно сложное. Однако если число открытых зон Френеля больше единицы и близко к целому ($m = 2.3\dots$), то в картине можно довольно чётко выделить $m - 1$ тёмных полос, заполняющих изображение щели. Так можно по виду дифракционной картины оценить число зон Френеля на полуширине щели.

2 Практическая часть

2.1 Дифракция Френеля

Предлагается исследовать дифракцию Френеля на узкой щели, на краю экрана, на тонкой нити.

1. Подготовили приборы к работе:

- (a) настроили зрительную трубу на бесконечность;
- (b) определили нуль микрометрического винта щели S_2 . Получили $b_0 \approx (54.0 \pm 1.0)$ мкм;
- (c) собрали схему согласно рисунку 1;
- (d) проверили, что при небольшом удалении микроскопа от щели на ярком фоне геометрического изображения щели появляются узкие тёмные дифракционные полосы, количество которых уменьшается по мере удаления микроскопа;
- (e) Улучшили контрастность картины.

2. Добившись наибольшей чёткости и контрастности дифракционной картины, снова нашли резкое изображение щели. Начальное положение микроскопа составляет $l = (68.2 \pm 0.1)$ см..

3. Постепенно отодвигая микроскоп от щели S_2 , замеряем по шкале положение микроскопа, при котором на фоне щели видна одна тёмная полоса ($n = 1$). Смещение микроскопа от первоначального положения даёт величину z - расстояние от щели до плоскости наблюдения ($m = n + 1$).

4. Приближая микроскоп к щели, измеряем зависимость координаты микроскопа z от числа n наблюдаемых минимумов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

n	0	5	4	3	2	1
m	1	6	5	4	3	2
l , см	68.2	66.9	66.6	66.3	65.5	64.5
z , см	0	1.3	1.6	1.9	2.7	3.7

Таблица 1: Результаты измерений

5. Измерим ширину b щели S_2 . Учитывая начальную толщину щели b_0 , получили $b \approx (402.0 \pm 1.0)$ мкм.
6. Качественные наблюдения:
 - (а) При небольшом удалении микроскопа от щели у её краёв появляются узкие частые полосы. Это дифракция на краю экрана. Возле границы располагалась самая яркая светлая полоса.
 - (б) для исследования дифракции Френеля на препятствии мы поставили вместо щели S_2 рамку с тонкой вертикальной нитью. Настроили микроскоп на резкое изображение нити. Наблюдаем характерную светлую полосу посередине.
7. Обработка результатов:
 - (а) Подобрали координаты так, чтобы зависимость расстояния до щели z от числа открытых зон Френеля m была линейной. Построили график зависимости и с помощью аппроксимации убедились в том, что экспериментальные точки лежат на одной прямой. График представлен на рисунке 3.

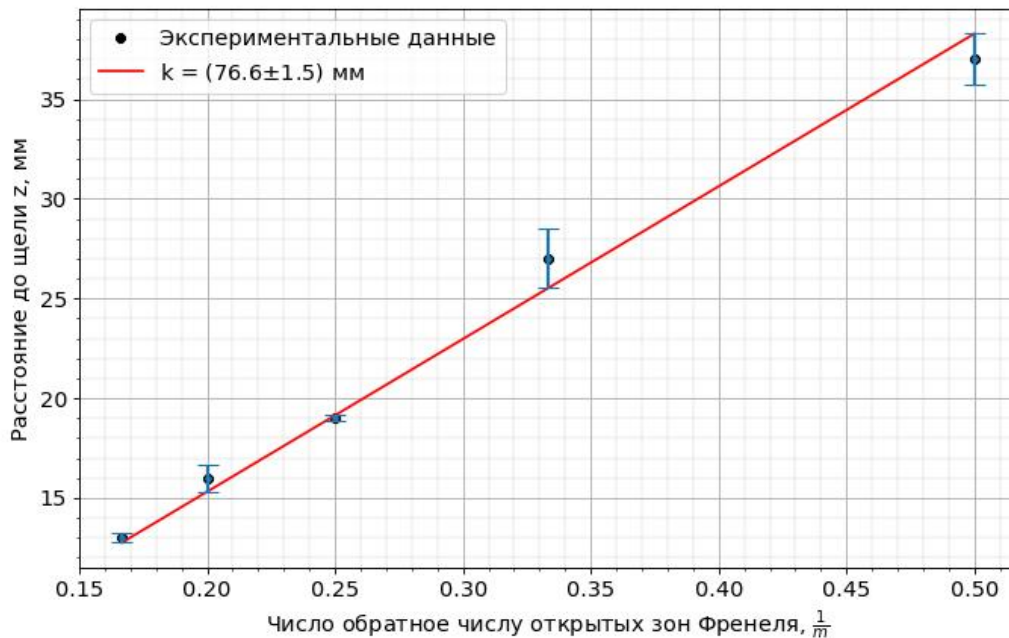


Рис. 3: График зависимости $z\left(\frac{1}{m}\right)$

По наклону прямой определим ширину щели b .

$$y = z; \quad x = \frac{1}{m}; \quad m = \frac{b^2}{4\lambda z} \implies y = \frac{b^2}{4\lambda} x \implies k = \frac{b^2}{4\lambda} \Leftrightarrow b = 2\sqrt{k\lambda},$$

где $\lambda = 58 \cdot 10^{-5}$ мм - длина волны жёлтого света.

$$b = 2\sqrt{76.551 \cdot 58 \cdot 10^{-5}} = 0.420 \text{ мм.}$$

$$\sigma_b = b\sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_k}{k}\right)^2} \Rightarrow \sigma_b = 0.420 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{1.493}{76.552}\right)^2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм, } \varepsilon = 0.97\%.$$

$$b = (420 \pm 4) \text{ мкм, } (\varepsilon = 0.97\%)$$

(b) Сравнили результат с прямым измерением по микрометрическому винту.

$$\text{Отклонение составляет } \Delta = \frac{420-402}{402} \cdot 100\% \approx 4\%.$$

2.2 Дифракция Фраунгофера на щели

На значительном удалении от щели, когда выполнено условие $m \ll 1$ (то есть ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля $b = \sqrt{\lambda z}$), изображение щели размывается и возникает дифракционная картина, называемая дифракцией Фраунгофера.

Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать на той же установке, что и дифракцию Френеля (1). Однако при обычных размерах установки дифракцию Фраунгофера возникает только при очень узких щелях. Поскольку работать с тонкими щелями неудобно, для наблюдения дифракции Фраунгофера к схеме добавляется объектив O_2 (4).

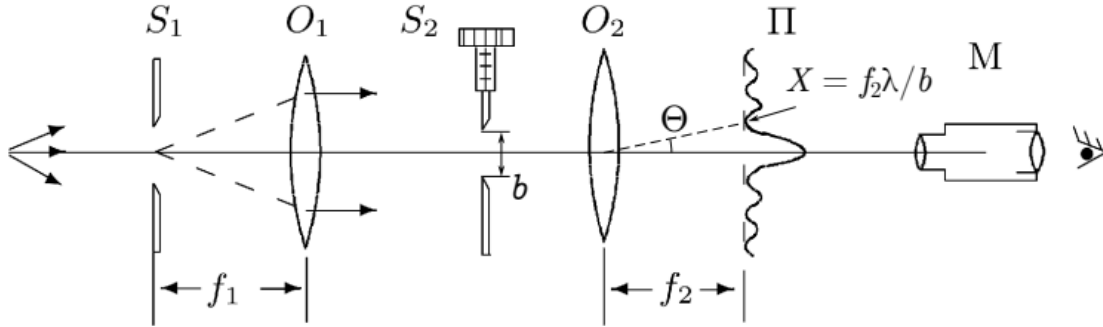


Рис. 4: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

Дифракционная картина наблюдается в фокальной плоскости объектива O_2 . Поскольку объектив не вносит дополнительной разности хода между интерферирующими лучами (таутохронизм тонкой линзы), в его фокальной плоскости наблюдается неискажённая дифракционная картина Фраунгофера, соответствующая бесконечно удалённой плоскости наблюдения.

При дифракции Фраунгофера в центре поля зрения наблюдается дифракционный максимум (светлая полоса). Сбоку от неё наблюдается чередующиеся минимумы и максимумы с довольно быстро затухающей интенсивностью. Направление на минимумы (тёмные полосы) при малых углах Θ определяется соотношением

$$\Theta_n^{min} = n \frac{\lambda}{b}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где b - ширина щели. Каждому значению угла Θ соответствует точка в плоскости объектива с фокусным расстоянием f_2 , отстоящая от оптической оси на расстоянии

$$X_n = f_2 \tan \Theta_n \approx f_2 \Theta_n.$$

Измеряя зависимость X от m или расстояние между полосами ΔX , можно определить ширину щели S_2 .

1. Настроили установку:

- (a) не разбирая схемы из предыдущего упражнения, добавили к ней линзу O_2 (см. рисунок 4);
- (b) настроили микроскоп на фокальную плоскость П линзы, закрепили его на скамье;
- (c) подобрали ширину щели S_2 так, чтобы в поле зрения микроскопа появилась дифракционная картина;
- (d) изменили ширину входной щели S_1 , добившись наибольшей контрастности картины.

2. Провели измерения:

- (a) С помощью окулярной шкалы микроскопа измерили координаты x_m нескольких дифракционных минимумов в обе стороны от центра. Измерения проводили по нижней шкале, цена деления которой составляет $\sigma_x = 0.04$ мм. Результаты измерений представлены в таблице 2.

n	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
x_m	1.44	1.52	1.64	1.72	1.8	1.92	2.0	2.08	2.16	2.28	2.36	2.48

Таблица 2: Результаты измерений

- (b) Записали ширину b щели S_2 и фокусное расстояние f_2 линзы O_2 . Учитывая ноль микрометрического винта, получили, что $b = (443.5 \pm 1.0)$ мкм, $f_2 = 9$ см.

3. Провели качественные наблюдения. Можно заметить, что:

- (a) смещение щели S_2 в боковом направлении приводит к сдвигу дифракционной картины. Этот эффект может быть не сильно заметен, если система отцентрирована не точно;
- (b) при уменьшении ширины b щели S_2 дифракционная картина растягивается.

4. Обработали результаты:

- (a) Построили график зависимости положения x_m экстремумов дифракционной картины от их номера m . Результат представлен на рисунке 5. Видно, что зависимость может быть аппроксимирована прямой линией.
- (b) По наклону прямой определим ширину щели b . Оценим погрешность результата.

$$y = x_m; \quad x = m; \quad x_m = f_2 \frac{\lambda}{b} m \implies y = f_2 \frac{\lambda}{b} x \implies k = f_2 \frac{\lambda}{b} \Leftrightarrow b = \frac{f_2 \lambda}{k},$$

где $\lambda = 58 \cdot 10^{-5}$ мм - длина волны жёлтого света.

$$b = \frac{90 \cdot 58 \cdot 10^{-5}}{0.093} = 0.561 \text{ мм.}$$

$$\sigma_b = b \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_k}{k}\right)^2} \implies \sigma_b = 0.561 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{0.001}{0.093}\right)^2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мм, } (\varepsilon = 0.54\%).$$

$$b = (561 \pm 3) \text{ мкм, } (\varepsilon = 0.54\%)$$

- (c) Сравнили результат с прямым измерением по микрометрическому винту. Отклонение составляет $\Delta = \frac{561-498}{498} \cdot 100\% \approx 12\%$.

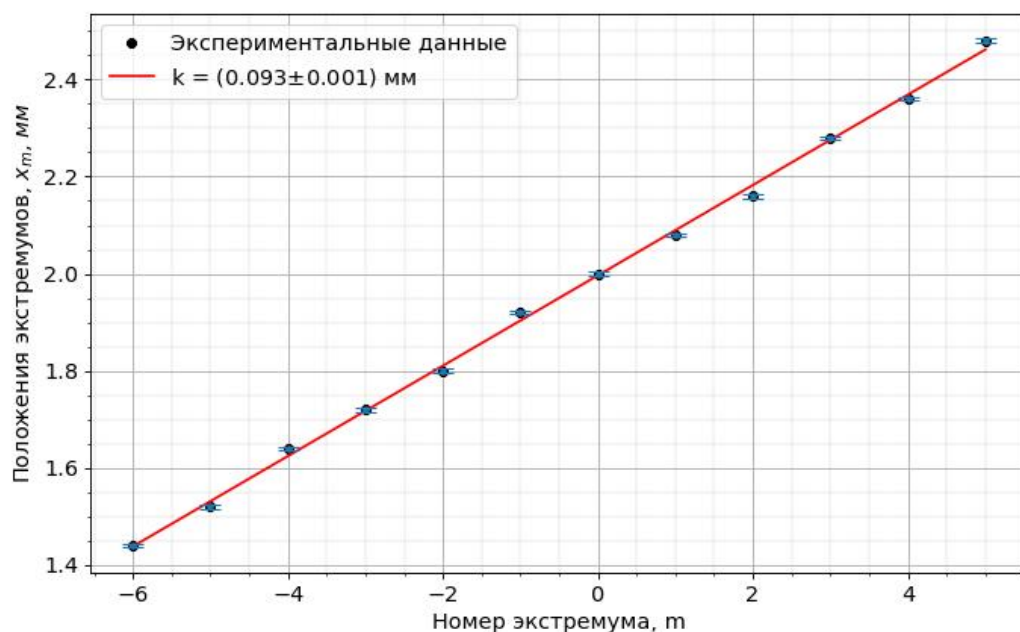


Рис. 5: График зависимости $x_m(m)$

2.3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Схема для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях изображена на рисунке 6. По сравнению с рисунком 4 в ней щель S_2 заменена на экран \mathcal{E} с двумя щелями. При этом щель S_2 (с микрометрическим винтом) установлена вместо входной щели S_1 (для измерения влияния ширины источника на чёткость картины).

Результат дифракции на двух щелях можно представить как интерференцию дифракционных картин от каждой щели.

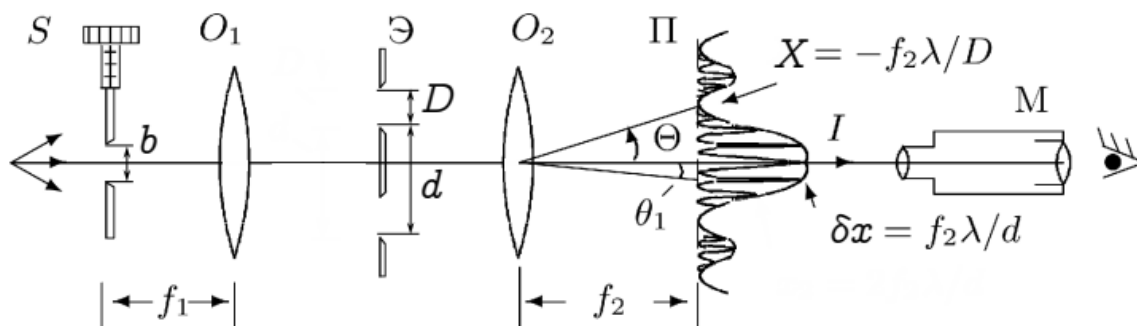


Рис. 6: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях

Если входная щель достаточно узка, то дифракционная картина в плоскости Π (рисунок 6) подобна той, что получалась при дифракции на одной щели, однако теперь вся картина испещрена рядом дополнительных узких полос. Наличие этих полос объясняется суперпозицией (интерференцией) световых волн, приходящих в плоскость наблюдения через разные щели экрана \mathcal{E} . В центре главного дифракционного максимума располагается светлая полоса (разность на оси, в силу симметрии, равна нулю). Светлая интерференционная полоса наблюдается также, когда разность хода кратна длине волны. Угловая координата Θ_n интерференционного

максимума n -ого порядка определяется соотношением

$$\Theta_n d = n\lambda, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где d - расстояние между щелями. Линейное расстояние δx между соседними интерференционными полосами в плоскости Π равно

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d}.$$

На рисунке 6 показано распределение интенсивности в фокальной плоскости объектива O_2 . Штриховой линией изображено распределение интенсивности при дифракции света на одиночной щели. Поскольку полная угловая ширина главного дифракционного максимума (от минимума до минимума) равна $2\lambda/D$, где D - ширина отдельной щели, то на нём укладывается $N = \frac{2d}{D}$ тёмных интерференционных полос (в центре картины максимум, поэтому светлых полос - на одну больше).

При дифракции света на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели S_2 , которую можно рассматривать как протяжённый источник света размером b . Для наблюдения интерференции необходимо, чтобы расстояние d между щелями не превышало радиуса когерентности:

$$d \leq \rho_{\text{ког}} \approx \frac{\lambda}{b} f_1.$$

Таким образом, по рамытию интерференционной картины можно оценить размер источника b . Этот метод используется в звёздном интерферометре при изменении угловых размеров звёзд.

1. Подготовили установку:

- (a) Не перемещая линз и микроскопа в установке, убрали входную щель S_1 и на её место установили щель с микрометрическим винтом S_2 . Слегка передвигая щель S_2 вдоль скамьи, нашли в микроскопе резкое изображение новой входной щели. Закрепили щель.
- (b) Между линзами поставили экран \mathcal{E} с двойной щелью. В области главного дифракционного максимума появилась система равноотстоящих тёмных и светлых полос (рисунок 6). Центрировкой системы и подбором ширины входной щели добились наибольшей чёткости дифракционной картины.

2. Измерения:

- (a) Подсчитали число тёмных интерференционных полос в пределах главного (центрального) дифракционного максимума: $N = 10$.
- (b) Измерили расстояние δx между минимумами интерференционной картины: $\delta x = \frac{0.2}{9} = (0.022 \pm 0.002)$ мм.
- (c) Исследовали влияние размера источника на контрастность интерференционной картины. Для этого, расширяя входную щель S , выбрали такую её ширину $b_0 = 25.5$ мкм, при которой наступает первое исчезновение интерференционных полос.
- (d) При дальнейшем увеличении входной щели картина вновь появляется, но заметно менее контрастна. Соответствующая ширина входной щели равна $b_1 = (36.5 \pm 3)$ мкм.
- (e) Фокусные расстояния линз равны $f_1 = 12.5$ см, $f_2 = 9$ см.
- (f) С помощью микроскопа измерили ширину двойных щелей D и расстояние между ними. Для этого поставили двойную щель непосредственно перед микроскопом:

$$D_{11} = 79 \cdot 0.04 = 3.16 \text{ мм}, \quad D_{12} = 92 \cdot 0.04 = 3.68 \text{ мм}, \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow D_1 &= |D_{11} - D_{12}| = (0.52 \pm 0.02) \text{ мм} - \text{ширина первой щели;} \\ D_{21} &= 155 \cdot 0.04 = 6.2 \text{ мм}, D_{22} = 162 \cdot 0.04 = 6.48 \text{ мм}, \Rightarrow \\ \Rightarrow D_2 &= |D_{21} - D_{22}| = (0.28 \pm 0.02) \text{ мм} - \text{ширина второй щели.} \\ d &= D_{21} - D_{12} = (2.52 \pm 0.04) \text{ мм.}\end{aligned}$$

3. Обработали результаты:

- (а) По расстоянию δx между полосами, рассчитали расстояние между щелями d :

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \Leftrightarrow d = f_2 \frac{\lambda}{\delta x} \Rightarrow d = 90 \cdot \frac{58 \cdot 10^{-5}}{0.022} = (2.37 \pm 0.21) \text{ мм.}$$

Полученное значение совпадает по порядку с измеренным. Отклонение составляет $\Delta = \frac{2.52-2.37}{2.52} \cdot 100\% \approx 6\%$.

- (b) Сравнили наблюдаемое число полос в главном максимуме с теоретическим:

$$N_1^{theor} = \frac{2d}{D_1} = \left[\frac{2 \cdot 2.37}{0.52} \right] = 9, \quad N_2^{theor} = \frac{2d}{D_2} = \left[\frac{2 \cdot 2.37}{0.28} \right] = 16.$$

Измеренное число наблюдаемых полос в главном максимуме лежит в диапазоне полученных значений для каждой щели в отдельности. Более точно мы не можем сравнить, так как на это влияет юстировка системы, то есть какая щель даёт больший вклад.

- (с) Сравнили измеренную ширину b_0 входной щели S с теоретическим расчётом:

$$d \leq \rho_{\text{ког}} \approx \frac{\lambda}{b_0} f_1 \Leftrightarrow 2.52 \leq \frac{28 \cdot 10^{-5}}{25.5 \cdot 10^{-3}} \cdot 125 = 2.84 - \text{верно!}$$

- (d) Рассчитаем ширину b_1 , при котором изображение должно опять появиться. Для этого рассмотрим предельный случай:

$$d = \frac{\lambda}{b_1} f_1 \Leftrightarrow b_1 = \frac{\lambda}{d} f_1 \Rightarrow b_1 = \frac{58 \cdot 10^{-5}}{2.52} \cdot 125 = 28.8 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Полученное значение совпадает по порядку величины с измеренным.

3 Подведение итогов и выводы

В данной лабораторной работе мы исследовали явление дифракции Френеля и Фраунгофера на одной и двух щелях, проверили теоретические соотношения для положения максимумов при дифракции Френеля и Фраунгофера.

В ходе работы мы научились юстировать сложные оптические системы, работать с линзами и дифракционными щелями, фильтром света.

Исследовали зависимость расстояния до щели z от числа открытых зон Френеля m (рисунок 3), с помощью графика определили размер щели b ; исследовали зависимость положения экстремумов x_m от их номера m (рисунок 5), с помощью графика определили размер щели b .

Полученные значения совпадают по порядку величины с теоретическими, и во всяком случае не противоречат здравому смыслу. Отклонения могут быть связаны с неточной юстировкой системы.