МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

# Лабораторная работа 4.3.1

Дифракция света

Выполнили:

Гисич Арсений

Айрапетян Микаел

Б03-102

Долгопрудный

2023

# 1 Аннотация

В данной работе были исследованы явления дифракции Френеля и Фраунгофера на щели; было изучено влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов.

# 2 Теоретические сведения

## 2.1 Дифракция Френеля на щели

Распределение интенсивности света в плоскости наблюдения (см. рис. 3) проще всего рассчитывать с помощью зон Шустера. При освещении щели $S_2$ параллельным пучком лучей зоны Шустера представляют собой полоски, параллельные краям щели, изображённые на рис. 1.

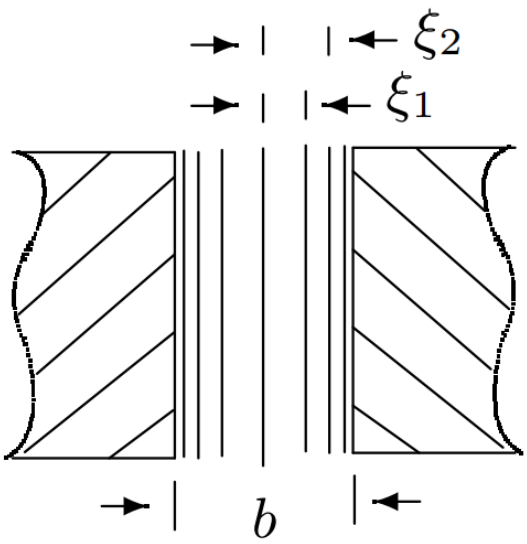


Рис. 1: Зоны Шустера, наблюдаемые при дифракции Френеля на щели

Суммарная ширина $n$ зон Шустера определяется соотношением:

$$\xi_n = \sqrt{nz\lambda}, \tag{1}$$

где $\lambda$ – длина волны; $z$ – расстояние между щелью и экраном.

Наблюдаемая на экране картина определяется волновым параметром:

$$p = \frac{z\lambda}{b}, \tag{2}$$

где $b$ – толщина щели $S_2$. При $p \ll 1$ дифракция отсутствует (действует приближение геометрической оптики). При $p \simeq 1$ возникает дифракция Френеля с числом тёмных полос $m$, тогда число зон на полуширине щели $n = m + 1$.

Также можно ввести число Френеля, как число открытых зон на всей ширине щели:

$$C = \frac{b^2}{z\lambda} = \frac{1}{p^2}.$$

## 2.2 Дифракция Фраунгофера на щели

При $C \ll 1$ наблюдается дифракция Фраунгофера с характерным распределением интенсивностей (см 4).

В центре поля зрения наблюдается дифракционный максимум. При малых углах $\theta$ положение минимумов определяется соотношением:

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{b}.$$

Тогда расстояние от тёмной полосы до оптической оси $O_2$ равно:

$$x_m = m\frac{\lambda}{b}f_2, \tag{3}$$

где $f_2$ – фокус объектива.

## 2.3 Дифракция Фраугофера на двух щелях

Угловая координата $\theta_m$ интерференционного максимума $m$-го порядка определяется соотношением:

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{d},$$

где $d$ – расстояние между щелями. Тогда линейное расстояние между соседними интерференционными полосами равно:

$$\delta x = \frac{\lambda}{d}f_2. \tag{4}$$

Оценим число интерференционных полос в главном максимуме из соображений, что распределение интенсивностей такое же, как у одиночной щели (изображено пунктирной линией на рис. 2):

$$n = \frac{2\lambda f_2}{b}\frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{b}.$$

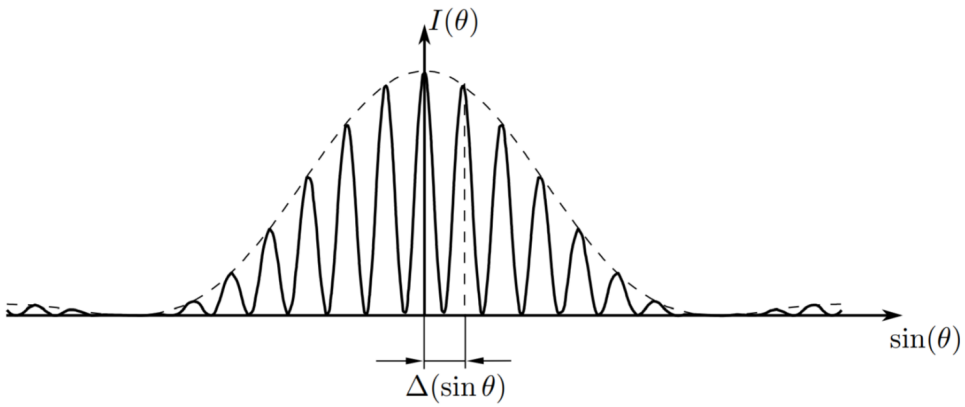


Рис. 2: Распределение интенсивностей в опыте с двумя щелями

Для наблюдения интерференции требуется выполнение условия:

$$d \leq \rho_{ког} = \frac{\lambda}{b}f_1,$$

где $\rho_{ког}$ – радиус когерентности, $b/f_1$ – угловая ширина входной щели $S_1$.

### 2.4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Установку на рис. 6 можно рассматривать как оптический прибор. Для выявления его предельной разрешающей способности (ограниченной дифракцией на щели $S_2$) применяют критерий Рэлея:

$$\frac{\lambda}{D_0} = \frac{l}{f_2} = \frac{d}{f_1}, \tag{5}$$

где $D_0$ – ширина щели $S_0$, $l$ – расстояние между изображениями щелей, $d$ – расстояние между щелями.

## 3 Используемое оборудование

1. Микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом: $\Delta_{винта} = 1 мкм; \Delta_{шкалы} = 0.02 мм$
2. Светофильтр: $\lambda = 5461$Å
3. Щели с регулируемой шириной: $\Delta = 1 мкм$
4. Оптическая скамья;
5. Ртутная лампа;
6. Рамка с вертикальной нитью;
7. Двойная щель;
8. Зрительная труба

Установки, применяемые в опыте, изображены на рис. 3, 4, 5, 6. Различия между установками для исследования дифракции Френеля и Фраунгофера состоят в том, что во втором случае необходимо поставить объектив $O_2$, чтобы приблизить исследуемую плоскость, на которой происходит дифракция.

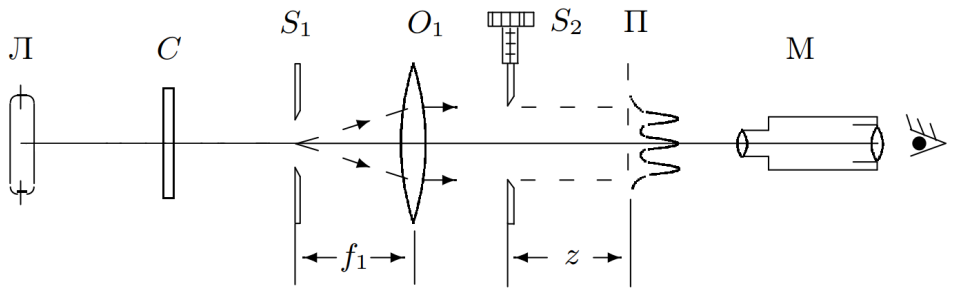


Рис. 3: Установка для наблюдения дифракции Френеля на щели

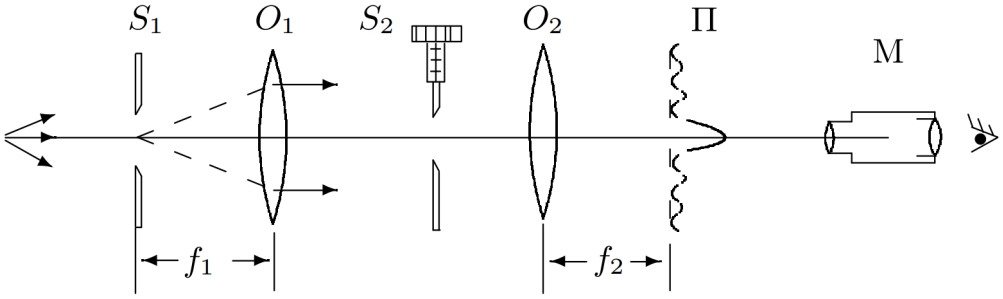


Рис. 4: Установка для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

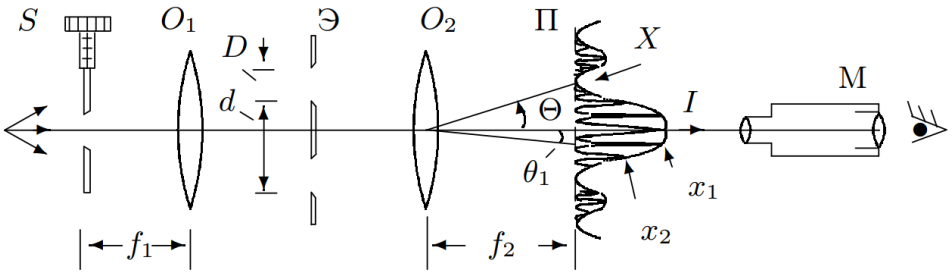


Рис. 5: Установка для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях

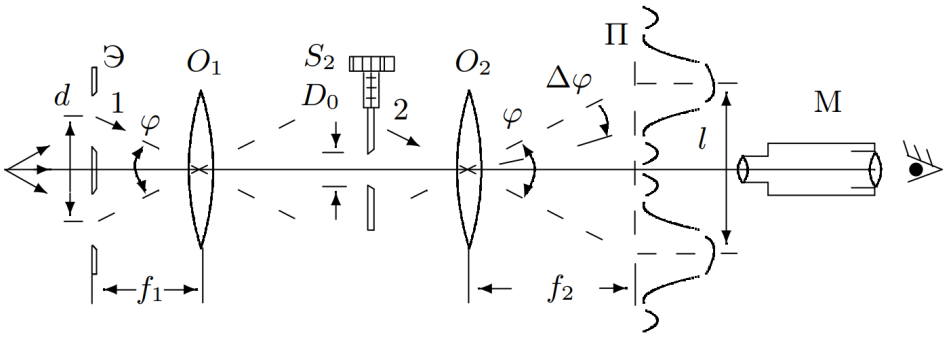


Рис. 6: Установка для исследования влияния дифракции на характеристики оптических приборов

# 4 Результаты измерений и обработка данных

## 4.1 Дифракция Френеля на щели и препятствии

**Настройка.** Найдём нуль микрометра на щели:

$$b_0 = 0,81 \pm 0,001 \text{ мм}.$$

Ширина щели по микрометрическому винту:

$$b = 0.315 \pm 0.001 \text{ мм}.$$

Методом последовательных приближений получим по возможности контрастную картину.

**Измерения.** Найдём начальное положение микроскопа (без дифракции):

$$L_0 = 624 \pm 2 \text{ мм}.$$

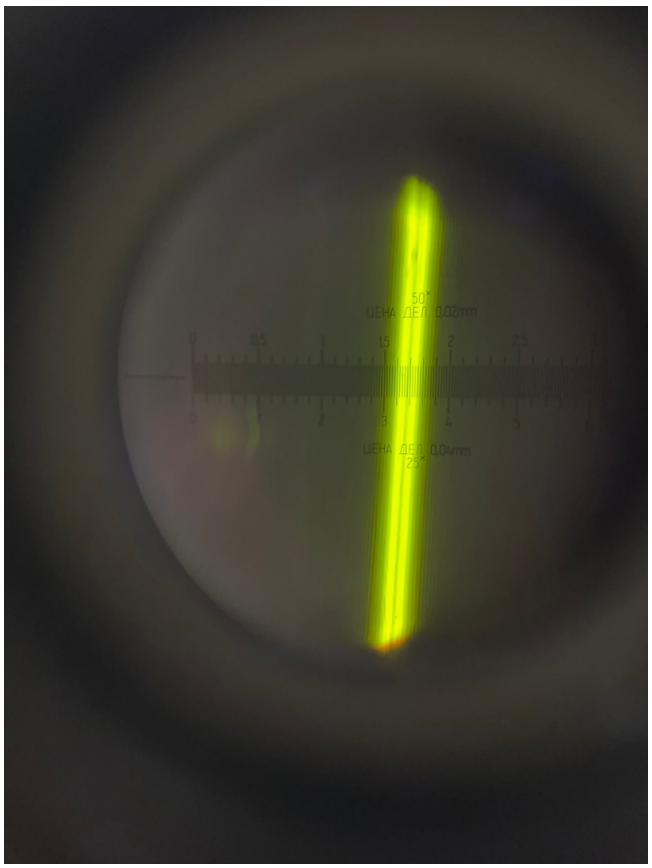

Рис. 7: Наблюдение тёмной полосы на фоне щели

Получим зависимость количества полос от расстояния в табл. 1. По формуле (1) рассчитаем величину $2\xi_n$, где $n = m + 1$.

| $m$ | $L$, см | $z$, см | $n$ | $\xi_n$, мм |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 62,4 | 0,0 | 1 | 0,00 |
| 1 | 63,0 | 0,6 | 2 | 0,08 |
| 2 | 63,9 | 1,5 | 3 | 0,16 |
| 3 | 64,2 | 1,8 | 4 | 0,20 |
| 4 | 64,4 | 2,0 | 5 | 0,23 |
| 5 | 64,6 | 2,2 | 6 | 0,27 |
| 6 | 64,7 | 2,3 | 7 | 0,30 |

Таблица 1: Зависимость количества тёмных полос от расстояния

В этой таблице возьмём инструментальную погрешность $\Delta = 2$ *мм*. При помощи микрометрического винта на микроскопе и шкалы на окуляре найдём ширину щели:

$$b^{микроскоп} = 0.30 \pm 0.02 \text{ мм}.$$

По микрометру на щели,

$$b^{микрометр} = 0.315 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

Значит, люфтом можно пренебречь.

**Качественные наблюдения.** При уменьшении щели уменьшается количество дифракционных полос. Это согласуется с теорией и обусловлено возрастанием волнового параметра (2).

Для дифракции Френеля на препятствии в виде тонкой вертикальной нити при удалении микроскопа – чётное число тёмных полос.

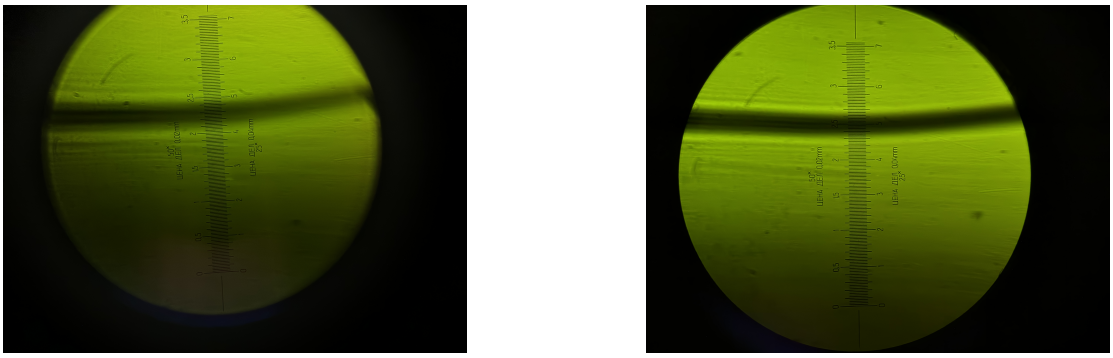

Рис. 8: Наблюдение тёмных полос на фоне нити

**Обработка данных.** Сравним размер зон Шустера с шириной щели $S_2$. Построим график на рис. 9.

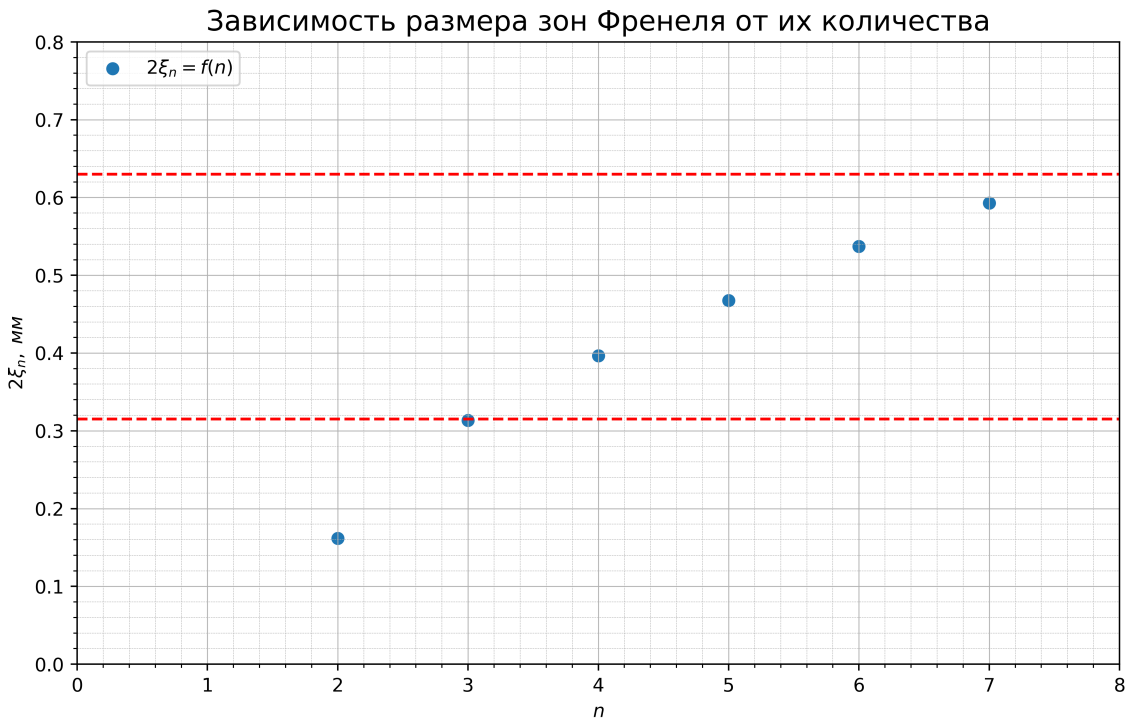


Рис. 9: Ширина зон Шустера

## 4.2 Дифракция Фраунгофера на щели

**Настройка.** Фокус линзы-объектива $O_2$ равен $12.8 \pm 0.1$ *см*. Получена дифракционная картина Фраунгофера на всё поле зрения микроскопа.

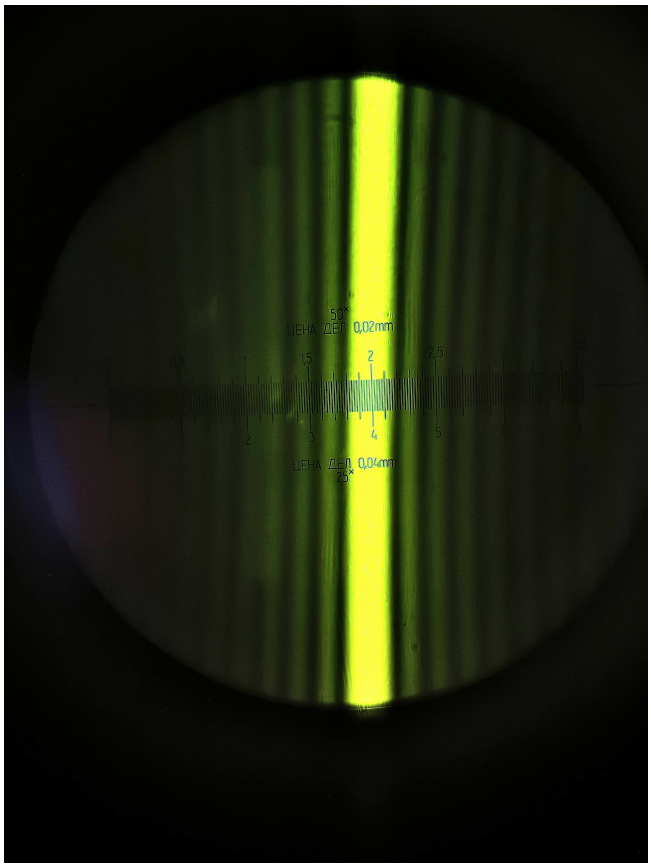


Рис. 10: Наблюдение дифракции Фраунгофера на щели

**Измерения.** Снимем значения координат нескольких дифракционных минимумов в табл. 4.2.

| $m$ | $X_m$, дел | $X_m$, мм |
|---|---|---|
| 1 | 2,21 | 0,004 |
| 2 | 2,41 | 0,008 |
| 3 | 2,62 | 0,012 |
| 4 | 2,83 | 0,017 |
| 5 | 3,09 | 0,022 |
| -1 | 1,75 | -0,005 |
| -2 | 1,54 | -0,009 |
| -3 | 1,34 | -0,013 |
| -4 | 1,13 | -0,017 |
| -5 | 0,93 | -0,021 |

Таблица 2: $X_m(m)$ для опыта Фраунгофера

Погрешность $X_m$ в этой таблице считаем равной цене деления 0.02 *мм*. Ширина щели в этом опыте:

$$b = 0.350 \pm 0.001 \text{ мм}.$$

**Качественные наблюдения.** При смещении $S_1$ не происходит сдвига дифракционной картины. Это связано с тем, что картина находится в фокальной плоскости линзы $O_2$, куда приходят почти параллельные лучи.

При уменьшении ширины щели картина растягивается, что согласуется с формулой (3).

**Обработка данных.** Построим график зависимости координаты $X_m(m)$ на рис.11.

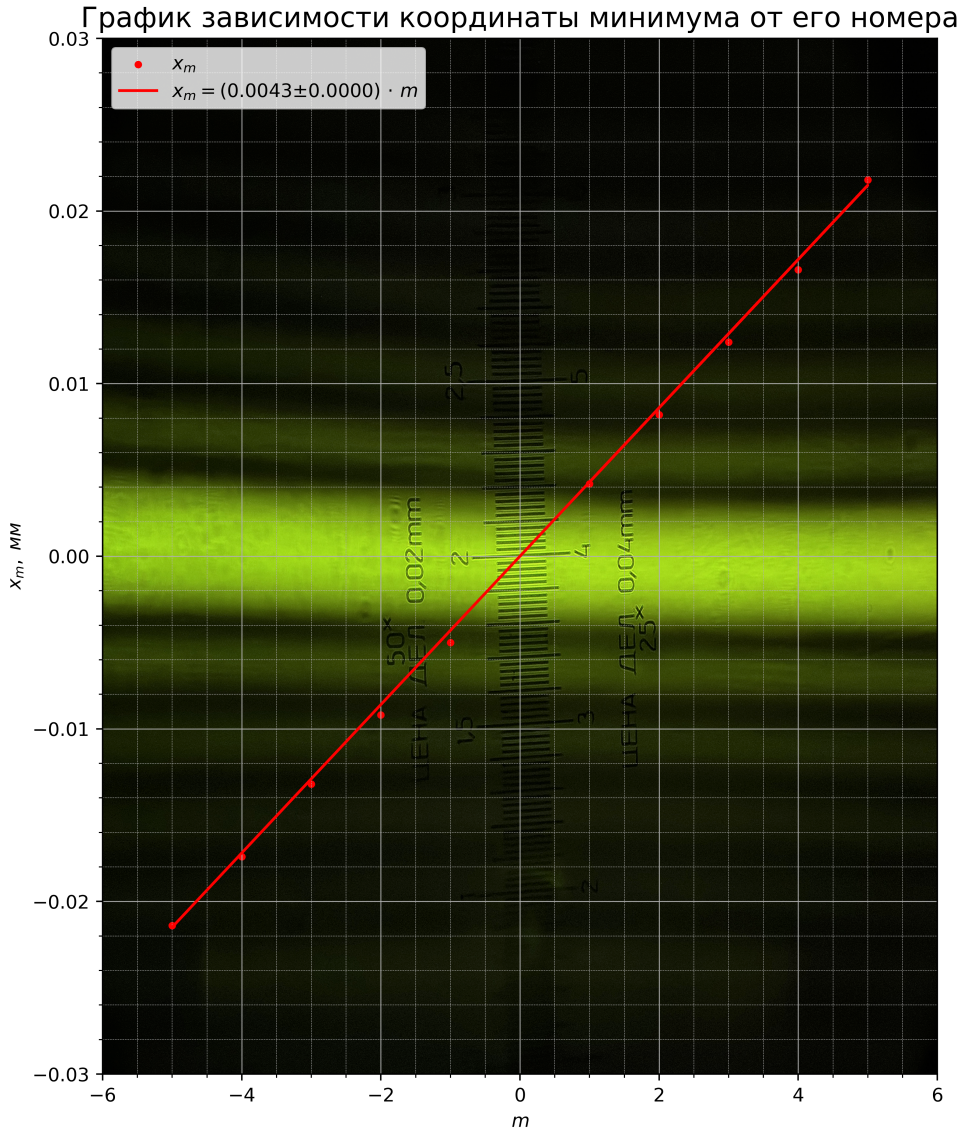


Рис. 11: Зависимость координаты минимума интенсивности от его номера

Получаем результат

$$\Delta X_m \approx (43 \pm 1) \cdot 10^{-4} \text{ мм}$$

По формуле (3) определяем

$$b = \frac{\lambda}{\Delta X_m} f_2 = 0,30 \pm 0,01 \text{ мм}$$

.

## 4.3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

**Настройка и измерения.** Получим по возможности чёткую дифракционную картину. Ширина центрального максимума при $b = 0.060 \pm 0.001$ *мм* равна

$$X = 0.01 \pm 0.001 \text{ мм},$$

и он включает в себя $n = 8$ светлых промежутков. Первое исчезновение интерференционных полос при

$$b_0 = 0.10 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

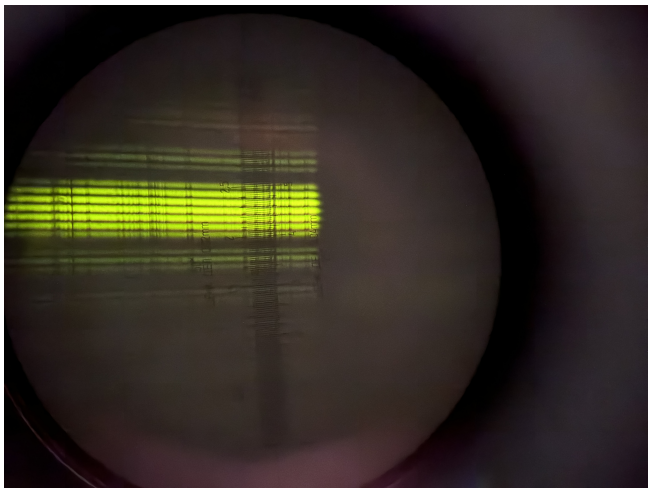

Рис. 12: Наблюдение дифракции Фраунгофера на двух щелях

**Обработка результатов.** Расстояние между минимумами равно:

$$\delta x \approx \frac{X}{n} = 0.119 \pm 0.003 \text{ мм}.$$

Из формулы (4):

$$d = \frac{\lambda f_2}{\delta x} = 0.59 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

Это значение отличается от замеренного: фактическое расстояние между щелями около $0.77 \pm 0.01$ *мм*. Расхождение может быть связано с неодинаковым расстоянием между щелями.

### 4.4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

**Настройка и измерения.** Найдём минимальную ширину щели $S_2$, при которой изображения двух щелей ещё различимы:

$$b_0 = 0.13 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

Геометрические размеры щелей:

$$d_1 = 0.16 \pm 0.01 \text{ мм},$$

$$d_2 = 0.23 \pm 0.01 \text{ мм},$$

$$d = 0.77 \pm 0.01 \text{ мм},$$

где $d$ — расстояние между щелями.

**Обработка данных.** Оценим выполнение критерия Рэлея. Из (5),

$$b_0 = \frac{\lambda f_1}{d} = 0.09 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

Значительное расхождение, вероятно, связано с субъективностью оценки «щели всё ещё различимы».

## 5 Вывод

В данной работе изучались явления дифракции Френеля и Фраунгофера. Провели сравнение установок, применяемых в этих опытах. Выявили различия этих двух явлений. Провели ряд сравнений значений, полученных экспериментально, с расчётными. В нескольких случаях их несовпадения могут быть вызваны субъективностью визуальной оценки.

Исследовали влияние дифракции Фраунгофера на оптические приборы. Установили связь между уменьшением диафрагмы прибора и ухудшением разрешения, связанным с дифракцией.

С помощью качественных наблюдений установили ряд различий между исследуемыми явлениями и их особенности.