

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ
ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ**

Методические указания к виртуальной лабораторной работе по физике

Екатеринбург

Авторы: Михельсон А.В., Папушина Т.И.
Научный редактор: проф. д.ф.м.н. А.А. Повзнер

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Методические указания к виртуальной
лабораторной работе по курсу «Физика»
для студентов для студентов всех форм
обучения всех специальностей.

Екатеринбург: УрФУ, 12 с.

Методические указания содержат описание лабораторной работы
студенческого практикума по физике, выполняемой в компьютерном
варианте. Описанию работы предшествует краткое рассмотрение дифракции
в параллельных лучах и возможностей ее применения.

Подготовлено кафедрой физики.

© ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»

1. ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Среди разнообразных оптических приборов широкое распространение получили так называемые спектральные приборы.

Спектральные приборы служат для получения и наблюдения оптических спектров.

Принципиальная оптическая схема всех спектральных приборов одинакова и включает в себя следующие элементы (рис. 1).

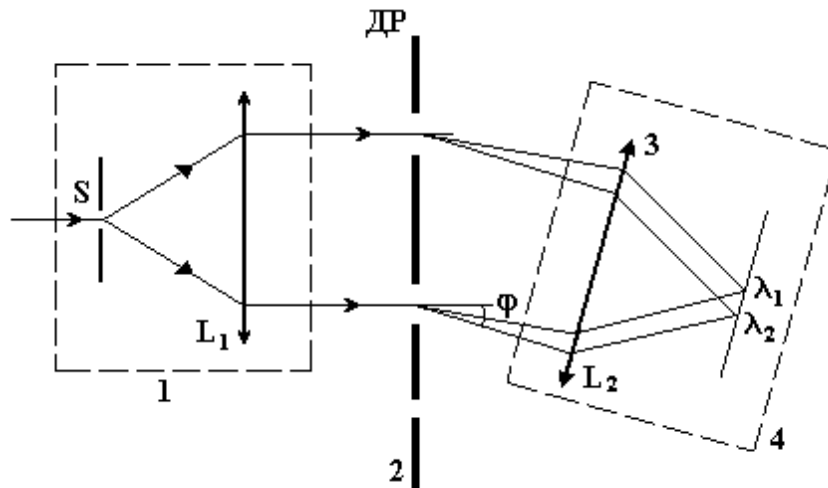


Рис. 1

1. Коллиматор. Предназначен для формирования параллельных пучков света. Узкая вертикальная входная щель S коллиматора преобразует расходящиеся от каждой точки щели лучи в параллельный пучок света. (Щель расположена в фокальной плоскости объектива L_1 ; от каждой точки щели формируется свой параллельный пучок, идущий под определенным углом к главной оптической оси объектива L_1 ; пучок, в целом, выходящий из коллиматора, имеет значительную расходимость (угол между крайними лучами) в вертикальном продольном сечении и очень малую - в горизонтальном).

2. Дифракционная решетка или призма. Отклоняют (вследствие дифракции или преломления) лучи с разной длиной волны λ на веер плоских монохроматических пучков.

3. Фокусирующий объектив. Собирает на своей фокальной поверхности монохроматические пучки и создает на ней ряд цветных изображений щели, то есть спектр исследуемого излучения.

4. Устройство для визуального наблюдения, фотографирования или фотометрирования спектра. Для этой цели, в зависимости от назначения спектрального прибора, используется линза (окуляр), фото пленка, фотометр. В настоящей работе применяется спектральный прибор с дифракционной решеткой и визуальным наблюдением исследуемого спектра.

2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция света – огибание светом встречающихся на его пути препятствий, сопровождающееся пространственным перераспределением энергии световой волны - интерференцией.

Расчет распределения интенсивности света в дифракционной картине может быть осуществлен с помощью принципа Гюйгенса-Френеля.

Согласно этому принципу каждая точка фронта световой волны, т.е. поверхности, до которой распространился свет, является источником вторичных когерентных световых волн (начальные фазы их и частоты одинаковы); результирующее колебание в любой точке пространства обусловлено интерференцией всех вторичных волн, приходящих в эту точку, с учетом их амплитуд и фаз.

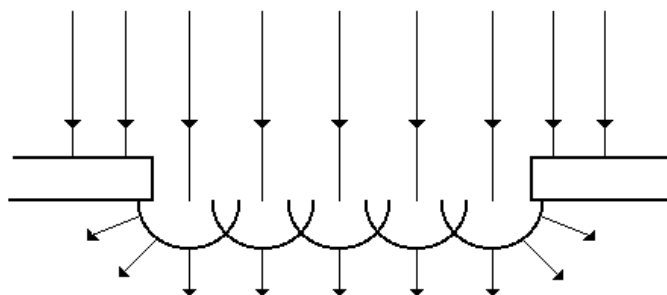


Рис. 2

Положение фронта световой волны в любой момент времени определяет огибающая всех вторичных волн; любая деформация фронта волны (она обусловлена взаимодействием света с препятствиями) приводит к отклонению световой волны от первоначального направления распространения - свет проникает в область геометрической тени (рис. 2).

3. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Дифракционная решетка - это прибор, предназначенный для разложения света в спектр. Она представляет собой плоскую стеклянную или металлическую поверхность, на которой через строго определенные расстояния специальным резцом нарезаны узкие шероховатые бороздки (штрихи), не пропускающие свет (рис. 3.). Сумма ширины ненарушенного промежутка и ширины бороздки называется постоянной решетки d (или периодом решетки). На стеклянных

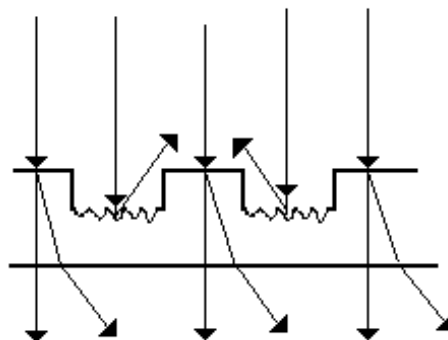


Рис. 3

решетках наблюдения можно производить как в проходящем, так и в отраженном свете, на металлических - только в отраженном. Наиболее типичные дифракционные решетки, которые используются для работы в видимом диапазоне спектра ($\lambda = 390 - 780$ нм) имеют от 300 до 1600 штрихов/мм. Дифракционные решетки изготавливают также, делая фотокопии и голограммы с решетки - оригинала.

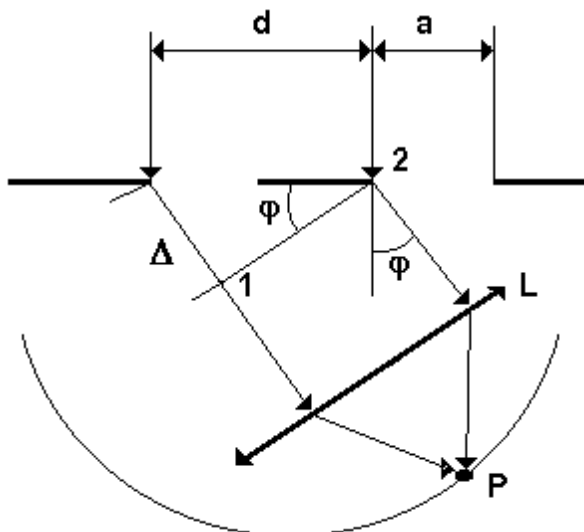


Рис. 4

Рассмотрим простейшую дифракционную решетку, на которую нормально падает монохроматическая световая волна с длиной волны λ (рис. 4). Каждая точка прозрачных промежутков решетки, до которой дойдет волна, согласно принципу Гюйгенса, становится источником вторичных волн. За решеткой эти волны распространяются по всем направлениям, в том числе и по изображенному на рисунке направлению. Угол отклонения света от нормали к решетке называется углом дифракции.

Поместим на пути вторичных волн собирающую линзу. Она сфокусирует в соответствующем месте своей фокальной поверхности все вторичные волны, распространяющиеся под одним и тем же углом дифракции.

Для того, чтобы все эти волны при наложении максимально усиливали друг друга, необходимо, чтобы разность фаз волн, приходящих от соответствующих точек двух соседних щелей, т.е. точек, отстоящих на

одинаковых расстояниях от краев этих щелей, была равна четному числу π или разность хода этих волн была равна целому числу m длин волн λ . Из рис. 4 видно, что разность хода волн 1 и 2 для точки Р равна:

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

Следовательно, условие максимумов интенсивности результирующей световой волны при дифракции от дифракционной решетки можно записать следующим образом:

$$d \sin \varphi = m \lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

Максимумы, удовлетворяющие условию (2), называются главными, число m называется порядком главных максимумов или порядком спектра. Значению $m = 0$ соответствует максимум нулевого порядка (центральный максимум). Максимум нулевого порядка один, максимумов первого, второго и т.д. порядков по два слева и справа от нулевого.

Между двумя соседними главными максимумами лежат $N-1$ добавочных максимумов и $N-2$ слабых по интенсивности добавочных максимумов.

Условие добавочных минимумов:

$$d \sin \varphi = m \lambda + \frac{p \lambda}{N}, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad p = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm (N-1). \quad (3)$$

Условие добавочных максимумов:

$$d \sin \varphi = m \lambda + \left(q + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{N}, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; q = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm (N-2) \quad (4)$$

N – общее число щелей решетки, через которые проходит свет, создающий дифракционную картину. Главные максимумы некоторых порядков могут отсутствовать. Это имеет место для тех направлений φ , при которых ни одна из щелей решетки не посылает света, т.е. когда одновременно выполняются условия минимума от одной щели и максимума от решетки:

$$\begin{aligned} a \sin \varphi &= m_1 \lambda, \\ d \sin \varphi &= m_2 \lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где a – ширина одного прозрачного промежутка решетки (ширина одной щели).

Из (5) следует:

$$\frac{d}{a} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (6)$$

т.е. особенно много главных максимумов исчезает в случае, когда отношение периода решетки к ширине щели – целочисленное и выражается небольшим числом.

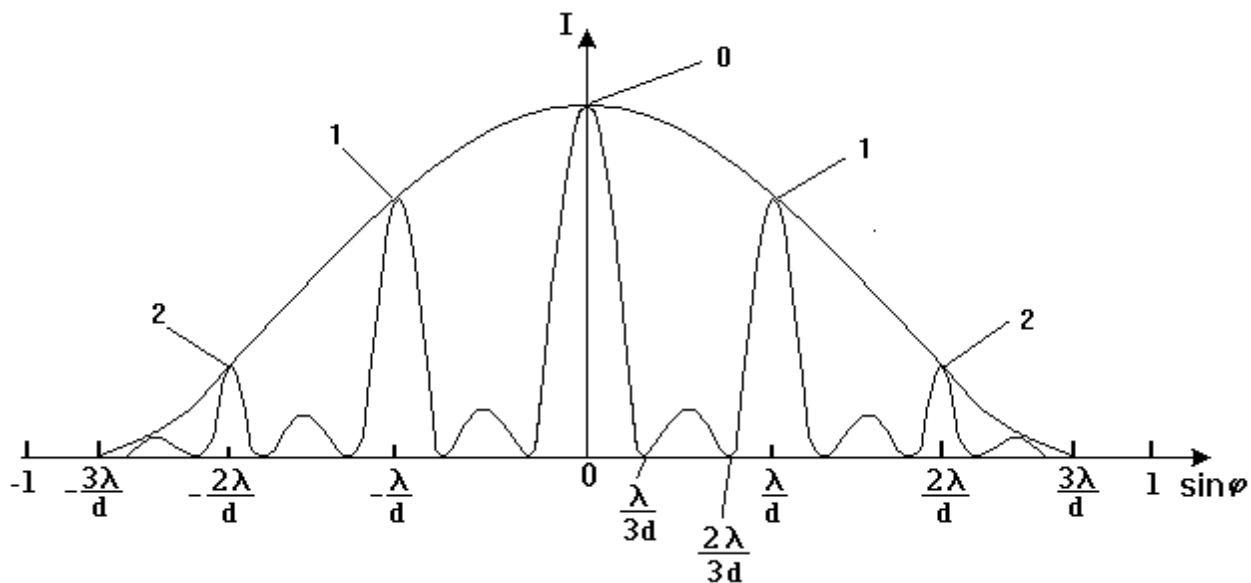


Рис. 5

На рис. 5 изображен примерный график распределения интенсивности монохроматического света в дифракционной картине с числом щелей $N = 3$ и $d/a = 3$. Пунктирная кривая изображает интенсивность от одной щели, умноженную на N^2 . Главный максимум третьего порядка отсутствует (в направлении φ , для которого ни одна из щелей не посылает света). Для этого угла выполняется условие:

$$\sin \varphi = \frac{3\lambda}{d} = \frac{\lambda}{a} \quad (7)$$

Таким образом, при дифракции монохроматического света от дифракционной решетки с большим числом щелей в фокальной плоскости фокусирующего объектива наблюдаются узкие яркие прямолинейные полосы (линии), разделенные широкими темными промежутками.

Положение главных максимумов зависит от длины λ световой волны. Поэтому при освещении решетки белым светом максимумы всех порядков, кроме нулевого, соответствующие разным длинам волн, смещаются друг относительно друга, т.е. разлагаются в спектр. Фиолетовая (коротковолновая) граница этого спектра обращена к центру дифракционной картины, красная (длинноволновая) - к периферии.

4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа проводится на спектрогониометре ГС-5 с установленной на нем дифракционной решеткой. Гониометр - прибор, предназначенный для точного измерения углов. Внешний вид спектрогониометра ГС-5 изображен на рис. 6.

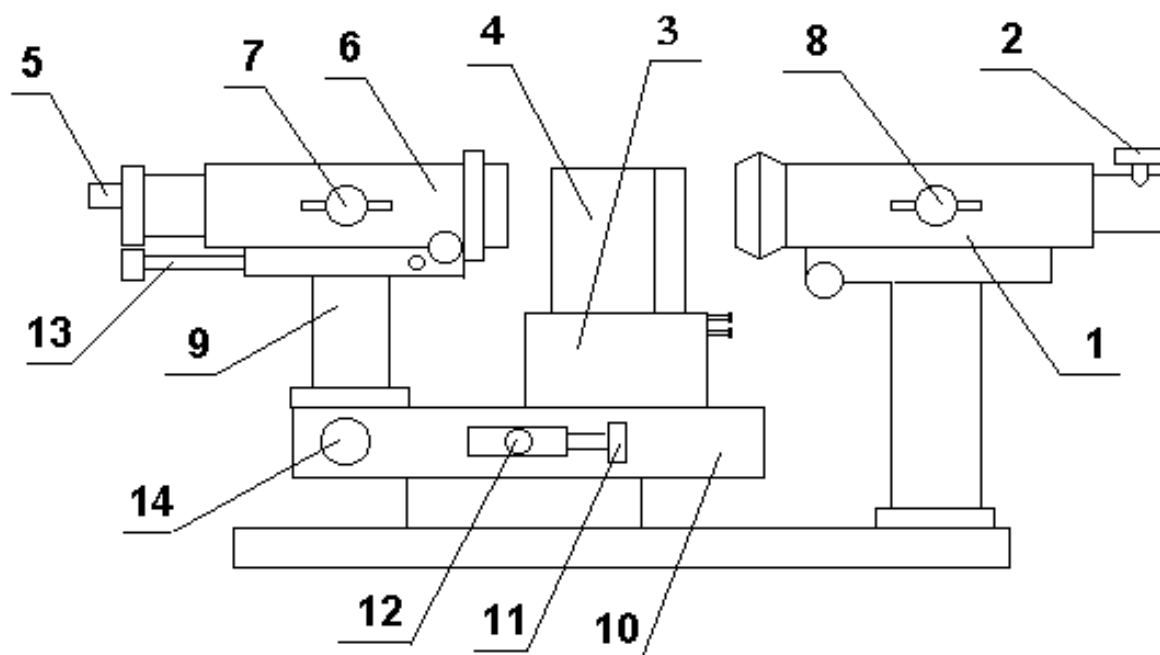


Рис. 6

Коллиматор 1, снабженный регулируемой микрометрическим винтом 2 спектральной щелью, крепится на неподвижной стойке. Щель обращена к источнику света (ртутной лампе). На предметном столике 3 устанавливается прозрачная дифракционная решетка 4. Наблюдение дифракционной картины производится через окуляр 5 зрительной трубы 6. Фокусировка дифракционной картины осуществляется маховиками 7 и 8. Зрительная труба 6, в которую вмонтирован микроскоп, крепится с помощью стойки 9 к алидаде 10. Алидада может поворачиваться вокруг вертикальной оси прибора: грубо от руки при отжатом винте 12 и точно микрометрическим винтом 11 при зажатом винте 12. Положение зрительной трубы фиксируется через окуляр 13 микроскопа. Отсчет положения спектральной линии производится после точной установки алидады со зрительной трубой при зажатом винте 12 следующим образом. В окуляре 13 микроскопа наблюдается поле зрения изображенное на рис. Как видно из рис. 7, в поле зрения окуляра видны две шкалы.

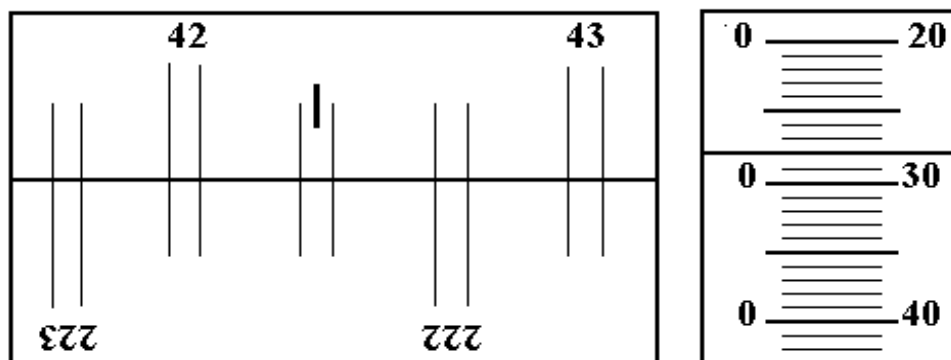


Рис. 7

По левой шкале делается отсчет числа градусов и десятков минут. Чтобы снять отсчет, необходимо повернуть маховик 14 оптического микрометра так, чтобы верхние и нижние изображения двойных штрихов лимба на левой шкале точно совместились. Число градусов определяется как ближайшая к вертикальному индексу левая верхняя цифра. Число десятков минут равно числу интервалов между верхним значением числа градусов и нижним значением, отличающимся от верхнего на 180^0 . Например, если число градусов было 42, то ищем число интервалов между 42^0 и 222^0 . На приведенном рисунке их два, что дает 20 минут. По левой шкале делается отсчет числа градусов и десятков минут. Чтобы снять отсчет, необходимо повернуть маховик 14 оптического микрометра так, чтобы верхние и нижние изображения двойных штрихов лимба на левой шкале точно совместились. Число градусов определяется как ближайшая к вертикальному индексу левая верхняя цифра. Число десятков минут равно числу интервалов между верхним значением числа градусов и нижним значением, отличающимся от верхнего на 180^0 . Например, если число градусов было 42, то ищем число интервалов между 42^0 и 222^0 . На приведенном рисунке их два, что дает 20 минут. Число единиц минут соответствует цифре, стоящей над горизонтальным индексом по левой стороне правой шкалы. Число секунд определяется положением горизонтального индекса по правой стороне этой же шкалы. Отсчет на рис. 7 - $42^0 20' 28''$. **Внимание! В виртуальной версии лабораторной работы цена одного деления по шкале секунд – 2 секунды.**

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ЗАДАЧА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

- 1) После запуска программы вы увидите спектрогониометр, настроенный на центральный максимум. Наведите указатель мыши на окуляр 13 – вы увидите шкалу, изображенную на рис. 7. Наведите указатель мыши на окуляр 5 – вы вновь увидите белую линию, соответствующую центральному максимуму.
- 2) С помощью кнопки «измерение левых максимумов» выберите измерение максимумов, находящихся слева от центрального максимума. Вы автоматически попадете в область спектра, где локализована фиолетовая линия, увидите её в окуляре.
- 3) Произведите настройку фиолетовой линии на визирную линию. Грубая регулировка (10 минут), соответствующая повороту алидады от руки, осуществляется с помощью нажатия кнопок "влево/вправо" на клавиатуре. Для произведения плавной регулировки (2 секунды) нужно зажать винт 12, для чего щелкнуть на изображении винта левой кнопкой мыши, затем произвести точную настройку микрометрическим винтом 11 (щелкнуть на винте левой кнопкой мыши и, удерживая её нажатой, производить движения вверх/вниз мышью).

- 4) Произвести измерение углового положения фиолетовой линии так, как это описано в пункте «4.Описание установки». Для перехода к изображению шкал навести указатель мыши на окуляр 13. **Внимание:** в виртуальной версии данной работы реализовано следующее действие маховичка 14: для его поворота и совмещения двойных штрихов лимба необходимо перед измерением углового положения линии **щелкнуть один раз** левой кнопкой мыши по изображению маховичка.
- 5) Для перехода к грубой настройке ослабить винт 12, для чего щелкнуть на изображении винта левой кнопки мыши. Найти и измерить угловые положения зеленой и двух желтых спектральных линий аналогично тому, как вы измерили угловое положение фиолетовой линии.
- 6) С помощью кнопки «направо» перейдите к измерению максимумов, находящихся справа от центрального максимума. Измерьте угловые положения фиолетовой, зеленой и двух желтых спектральных линий по вышеописанному алгоритму.
Результаты всех измерений занесите в табл. 1 отчета.
- 7) Определить значения длин волн λ спектральных линий, используя формулу (2).

Постоянная решетки $d = 833,3$ нм, число штрихов $N = 12000$

- 8) Оценить погрешность измерений длин волн по формуле:

$$\Delta_{\lambda} = \lambda_{\text{табл}} - \lambda_{\text{эксн}} = \dots\dots\text{нм};$$

$$\gamma = \frac{|\Delta_{\lambda}|}{\lambda} = \dots\dots\%$$

ЗАДАЧА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИВЫСШЕГО ПОРЯДКА ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОВ, РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УГЛОВОЙ ДИСПЕРСИИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Максимальное значение порядка m_{max} дифракционных спектров может быть определено из условия (2) главных максимумов, записанного для нормального падения света на решетку:

$$m_{\text{max}} \leq \frac{d}{\lambda} \quad (8)$$

Разрешающая способность R дифракционной решетки характеризует ее способность разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. По определению

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (9)$$

где λ – длина волны, вблизи которой производится измерение;

$\delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, воспринимаемых в спектре отдельно.

Величина $\delta\lambda$ - обычно определяется критерием Рэлея: две спектральные линии λ_1 и λ_2 считаются разрешенными, если максимум порядка m одной из них

(с большей длиной волны), определяемый условием (2):

$$d \sin \varphi = m \lambda_2,$$

совпадает с первым добавочным минимумом в спектре этого же порядка m для другой линии λ_1 , определяемым условием (3):

$$d \sin \varphi = m \lambda_1 + \frac{\lambda_1}{N}.$$

Из этих уравнений следует, что

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = mN \quad (10)$$

и разрешающая способность решетки оказывается равной

$$R = mN. \quad (11)$$

Таким образом, разрешающая способность решетки зависит от порядка m спектра и от общего числа N штрихов рабочей части решетки, т.е. той части, через которую проходит исследуемое излучение и от которой зависит результирующая дифракционная картина.

Угловая дисперсия D дифракционной решетки характеризует угловое расстояние между близкими спектральными линиями. По определению

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (12)$$

где $d\varphi$ – угловое расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися по длинам волн на $d\lambda$.

Формула для D получается дифференцированием соотношения (2): левой части по углу дифракции φ , а правой - по длине волны λ :

$$d \cos \varphi \cdot d\varphi = m d\lambda,$$

откуда

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi} \quad (13)$$

Таким образом, угловая дисперсия решетки зависит от порядка m спектра, постоянной d решетки и от угла дифракции φ .

В данной работе значение m_{\max} определяется для второй желтой линии $\lambda_{ж2}$. Разрешающая способность R находится для спектра первого порядка ($m = 1$) по формуле (11).

Угловую дисперсию D находят для угла дифракции, соответствующего зелёной линии. Значение D принято измерять в "/мм - угловых секундах на нанометр.

В конце работы необходимо сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем состоит явление дифракции света?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Что такое разрешающая способность R дифракционной решетки и от чего она зависит?
4. Как экспериментально определить угловую дисперсию D дифракционной решетки?
5. Какой вид имеет дифракционная картина, полученная от прозрачной решетки?