

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА
ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ДИФРАКЦИЯ

*Методические указания к расчетно-графической работе для
студентов бакалавриата направления 150400*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016

УДК 537.1/2(073)

Физика. Физическая оптика. Дифракция: Методические указания к расчётно-графическим работам. / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Сост.: *А.Б. Федорцов, А.С. Иванов*. СПб, 2016. 17 с.

Изложены требования к содержанию и рекомендации к подготовке, выполнению и защите отчетов по расчётно-графическим работам. Приведены основные понятия и расчетные формулы, пример решения и оформления задания, даны ссылки на учебную литературу. Предложено 5 заданий по 60 вариантов в каждом.

Методические указания предназначены для студентов бакалавриата направления 150400 Горного университета.

Табл. 2. Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

Научный редактор проф. *Н.С. Пцелко*

© Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Расчётно-графические работы являются важнейшим инструментом, направленным на формирование необходимых для будущих выпускников компетенций у студентов, изучающих курс «Физика». Как оценочное средство они позволяют оценить знания, умения и уровень приобретенных компетенций.

Выполнение студентами расчётно-графической работы (РГР) способствует наиболее глубокому усвоению всех разделов курса физики. Лучшей оценкой степени освоения материала учебной программы является умение студента использовать приобретённые теоретические знания в решении конкретных задач. Уровень подготовки будущего специалиста зависит от способности студента выполнять самостоятельно задания различного уровня.

При выполнении РГР студенты получают знания по физике в процессе самостоятельной творческой работы, сочетая изучение физики с прикладными возможностями математики и информатики.

При этом формируется умение определить, описать и объяснить физические понятия, явления, процессы и величины.

В соответствии с требованиями программы курса студенты приобретают навыки:

- проводить самостоятельный поиск необходимой информации с использованием различных источников (учебных, справочных и научно-популярных изданий, ресурсов интернета);
- применять математический аппарат для аналитического решения физических задач;
- анализировать, выполнять сравнительную оценку и делать выводы по результатам работы;
- использовать в решениях и представлении результатов (в виде рисунков, схем, таблиц и графиков) основные программные средства.

1. РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Выполнение расчётно-графической работы предполагает достаточно большой объём самостоятельной работы студента. Перед ее выполнением рекомендуется изучить лекционный курс, познакомиться с темой “Дифракция” раздела “Физическая оптика” в рекомендованных учебниках физики. Если при самостоятельном изучении теоретического материала возникли вопросы, желательно обсудить их на практических занятиях. Если и после этого остались неясные моменты, необходимо получить индивидуальную консультацию у преподавателя.

При изучении такого физического явления как дифракция света, прежде всего, следует выяснить сущность этого явления и понять, как дифракция связана с другими явлениями и каковы возможности её применения. При изучении закономерностей обратите внимание на границы их применимости, уточните их формулировку и математическое выражение.

Расчётно-графическая работа оформляется на компьютере и распечатывается на формате А4. На титульном листе необходимо указать: название факультета, номер группы, наименование дисциплины, название работы, фамилию, инициалы студента и преподавателя, год выполнения работы. Необходимо полностью переписать задание своего варианта, а заданные физические величины выписать отдельно. Все числовые значения должны быть переведены в СИ. При применении расчётной формулы требуется привести её вывод. Математическое решение должно сопровождаться пояснениями. Расчёт рекомендуется провести сначала в общем виде (в буквенных обозначениях), поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения, и только после этого подставить в выведенную формулу.

Перед построением графиков необходимо получить аналитическое выражение функциональной зависимости, выбрать удобный масштаб и указать на осях координат физические величины и единицы их измерения.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА ПО РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

К защите допускаются студенты, подготовившие отчет в соответствии с требованиями кафедры ОТФ и сдавшие его на проверку в установленные сроки. После проверки преподавателем содержания отчёта, при наличии ошибок и недочетов, работа возвращается студенту на доработку. При соблюдении всех требований к оформлению отчёта, правильном выполнении задания и решении соответствующих задач студенту назначается аудиторная защита.

Для успешной защиты отчета необходимо изучить теоретический материал по теме работы, а так же освоить математический аппарат, необходимый для решения задач расчетно-графической работы. При подготовке к защите, помимо данного методического указания, необходимо использовать учебники и другие учебные пособия, рекомендованные министерством образования и науки к учебному процессу. Во время защиты студент должен уметь ответить на вопросы преподавателя в полном объёме теоретического и методического содержания данного РГР, уметь самостоятельно вывести необходимые расчетные формулы, выполнить анализ полученных зависимостей и прокомментировать полученные результаты.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Титульный лист.
2. Теоретическая часть:
 - 2.1. Определения физических явлений, законов и величин, встречающихся в данной работе.
 - 2.2. Основные расчётные формулы с пояснениями.
3. Расчётная часть:
 - 3.1. Задание с исходными данными своего варианта.
 - 3.2. Расчёт с пояснениями.
 - 3.3. Графическое построение.
4. Заключение (выводы).

4. ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА РЕШЁТКЕ

Дифракция - это совокупность явлений, сопровождающихся нарушением законов геометрической оптики при распространении волн в средах с явно выраженными неоднородностями. Дифракция, в частности, приводит к проникновению световых волн в область геометрической тени. Дифракция присуща не только световым волнам, но и волнам другой природы. Благодаря дифракции, электромагнитные волны могут проникать за горизонт, что используется в некоторых радиотехнических системах. На явлении дифракции основано действие направленных антенн, а также ряда других устройств. В основе расчёта дифракционных явлений лежит принцип, предложенный Гюйгенсом в 1678 г. и дополненный Френелем в 1815 г.

Принцип Гюйгенса гласит: каждая точка волновой поверхности служит центром вторичных полусферических волн, огибающая которых даёт положение волновой поверхности в последующий момент времени.

Дополнение Френеля состоит в следующем: вторичные волны являются когерентными, а амплитуда и фаза волны в некоторой точке вблизи волновой поверхности – это результат интерференции вторичных волн.

Принцип Гюйгенса даёт возможность определения формы волновой поверхности. Дополнение Френеля позволяет определить амплитуду в заданной точке.

На рис. 1 приведен пример построения плоской волновой поверхности в момент времени $(t + \Delta t)$ по её известному положению в предыдущий момент времени t .



Рис. 1. Построение плоской волновой поверхности при помощи вторичных полусферических волн

Для этого строятся вспомогательные сферические поверхности радиуса $v\Delta t$ (v - фазовая скорость волны) с центром на исходной поверхности. Огибающая полученных сферических поверхностей даёт положение волновой поверхности в момент времени $t + \Delta t$.

Поясним математическую формулировку принципа Гюйгенса - Френеля. Рассмотрим волновую поверхность S , созданную в некоторый момент времени источником света. Элемент dS этой поверхности, излучает в пространство перед собой элементарную вторичную волну (рис.2). Вектор n представляет собой нормаль к поверхности dS .

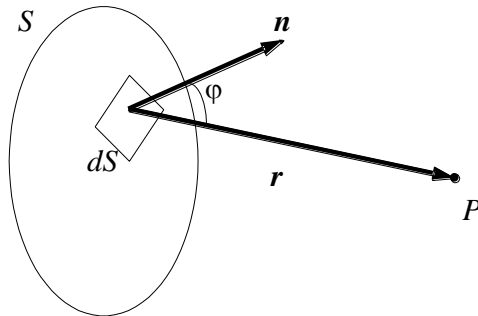


Рис. 2. К математической трактовке принципа Гюйгенса – Френеля

Амплитуда вторичной волны dE в точке P равна

$$dE = K(\varphi) \frac{a_0 ds}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0), \quad (1)$$

где a_0 - константа, определяемая амплитудой колебания на волновой поверхности S ; r - величина радиус-вектора, проведенного из элемента поверхности dS в точку P ; k - волновое число; t - время; φ_0 - начальная фаза; φ - угол, образованный радиус-вектором r с нормалью n элемента поверхности dS ; $K(\varphi)$ - угловой коэффициент, уменьшающийся с ростом φ , (т.е. $K(\varphi) = 0$ при $\varphi \rightarrow \pi/2$).

Результирующая напряжённость электрического поля волны в точке P представляет собой суперпозицию элементарных вторичных волн

$$E = \int_S K(\varphi) \frac{a_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0) dS \quad (2)$$

Дифракционная решётка, работающая на пропускание, представляет собой ряд параллельных прозрачных щелей шириной a , разделённых между собой непрозрачными промежутками шириной b (рис.3).

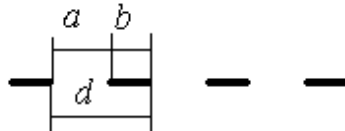


Рис.3. Структура дифракционной решетки

Обычно это хорошо отполированная стеклянная пластина, на которую нанесён ряд непрозрачных параллельных штрихов. Периодом, или постоянной, решётки d называют промежуток, включающий штрих и просвет, т.е. период d равен $a + b$ (a – ширина щели; b – ширина непрозрачного штриха).

Оптическая разность хода Δ двух волн, идущих от соответственных точек двух соседних щелей (рис. 4) равна

$$\Delta = d \cdot \sin \varphi = (a + b) \cdot \sin \varphi. \quad (3)$$

В направлении угла φ будет наблюдаться максимум света в том случае, если в данном направлении возникнет разность хода, равная целому числу длин волн

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4)$$

Приравнивая (3) и (4), получим условие возникновения максимума при прохождении света через дифракционную решётку

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (5)$$

Выражение (5) определяет положение главных максимумов для данной длины волны.

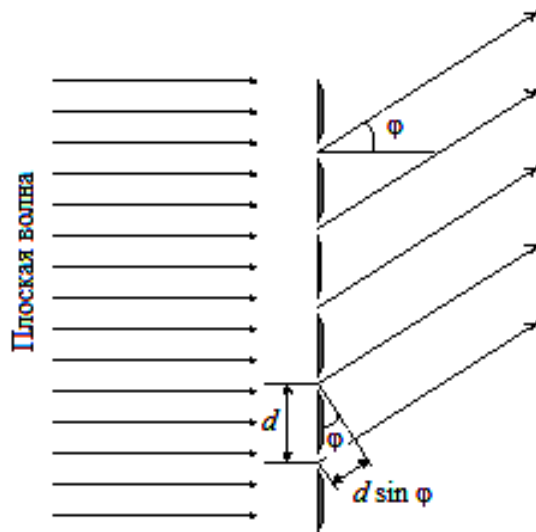


Рис.4. Возникновение оптической разности хода от двух соседних прозрачных областей дифракционной решетки

Следует отметить, что от периода решётки зависит угол дифракционного максимума для данной длины волны, но не разрешающая способность всей решетки, которая зависит от общего числа щелей решетки.

На рис. 5 представлены две дифракционные картины от решеток с одинаковыми периодами, но с разным количеством штрихов. На рис. 5 (а) можно видеть дифракционную картину, которая получается от решетки с общим числом щелей, равным 20, а на рис. 5 (б) – от решетки с 6 щелями.

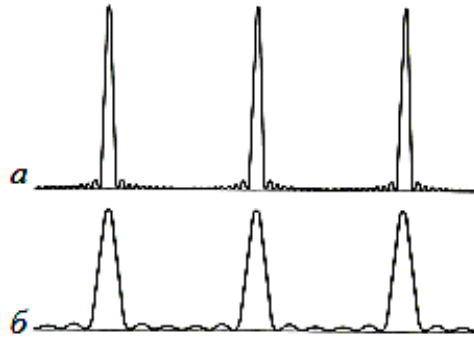


Рис.5. Дифракционная картина от двух решеток с одинаковыми периодами и разным количеством штрихов

Если на решётку поступает излучение разных длин волн ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и т.д.), то дифракционные максимумы для каждой волны получаются под разными углами φ . На экране возникает дифракционный спектр источника света.

Дифракционная решетка является весьма совершенным спектральным прибором. С её помощью можно определить длину волны, измерив угол дифракции φ . Анализ спектров излучения материалов позволяет изучать их состав и строение.

5. ПОЯСНЕНИЯ К ЗАДАНИЮ

Дифракционной решеткой называется система из N параллельных непрозрачных штрихов, нанесенных на прозрачную пластинку.

Основными характеристиками решетки являются: общее число штрихов N , густота штриховки n (число штрихов на одном миллиметре длины) и период решетки $d = 1/n$ (иначе – постоянная решетки). Период решётки делается сопоставимым с длинами волн исследуемого диапазона.

Поскольку решетка освещается одним источником, то её N прозрачных полосок можно рассматривать как N вторичных когерентных источников, излучающих волны во все стороны. Причем по

некоторым направлениям эти вторичные волны усиливают друг друга, а по другим ослабляют.

Условие максимального взаимного усиления волн, идущих из разных щелей, имеет вид

$$\sin \varphi_m = m\lambda, \quad (6)$$

где d – период решетки; λ – длина волны излучения; m – целое число – порядок интерференции (причем, $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$); φ_m – угол между нормалью (перпендикуляром) к решетке и лучом, соответствующим данному значению m .

Например, если $d = 1/600$ мм; $\lambda = 600$ нм = $6 \cdot 10^{-4}$ мм, то первый максимум ($m = 1$) получится при условии: $\sin \varphi_1 = \lambda d = 6 \cdot 10^{-4} \text{ мм} \cdot 600 \text{ мм}^{-1} = 0,36$. Так как $\arcsin 0,36 = 21^\circ$, это означает, что именно на такой угол от нормали отклонится луч с длиной волны 600 нм, соответствующий первому максимуму.

Второй максимум возникает при выполнении условия $d \sin \varphi_2 = 2 \lambda$, т.е. при угле $\varphi_2 = 46^\circ$. Максимумы более высоких порядков ($m \geq 3$) не возникнут при данных λ и d , так как это соответствовало бы значениям $\sin \varphi_m > 1$. Отметим, что нулевой максимум, соответствующий $m = 0$, для всех длин волн находится по одному направлению $\varphi_0 = 0$, т.к. $\sin \varphi_0 = 0$ независимо от значений λ и d .

Дифракционная решетка осуществляет спектральное разложение, т.к. свет с разной длиной волны отклоняется на разные углы в любом максимуме, кроме нулевого. Если решетка освещается светом, содержащим несколько спектральных линий, то только нулевой максимум будет общим для всех длин волн. При других значениях m лучи, имеющие различающиеся длины волн, т.е. разные цвета, будут отклоняться на разные углы при одном и том же значении m . Совокупность лучей, соответствующих одному m называется спектром m -ого порядка.

Например, при условии $d = 1/600$ мм в первом максимуме ($m = 1$) красные лучи ($\lambda_k = 760$ нм) отклонятся на угол $\varphi_k = 27^\circ$, а фиолетовые ($\lambda_\phi = 440$ нм) – на угол $\varphi_\phi = 14^\circ$.

Картина спектрального разложения света сложного состава дифракционной решёткой симметрична относительно нулевого мак-

симума, так как $\sin \varphi = \sin (-\varphi)$, а общее число максимумов $M = (2m + 1)$.

При выполнении РГР рекомендуется следующий порядок действий:

1. По заданной густоте линий n рассчитываем величину периода (постоянной) дифракционной решетки по формуле $d = 1/n$.
2. Определяем цвета линий для изображения лучей, имеющих различную длину волны, по таблице соответствия, которая приведена ниже.

Таблица 1.

Название цвета	Границы спектрального диапазона, нм
Красный	620 – 780
Оранжевый	585 – 620
Желтый	570 – 585
Зеленый	510 – 570
Голубой	480 – 510
Синий	450 – 480
Фиолетовый	380 – 450

3. Определяем максимально возможный для наблюдения порядок дифракции m для каждой из трех заданных длин волн. Этот порядок равен целой части отношения d/λ .

4. Для каждой длины волны и всех возможных для этой волны значений m рассчитываем углы дифракции по формуле

$$\varphi_m = \arcsin(d / m\lambda) \quad (7)$$

5. На отдельном листе в альбомном расположении строим веер расходящихся лучей разного цвета в количестве $M = 2m + 1$ для каждой составляющей в соответствии с рассчитанными углами дифракции

6. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА

Исходные данные.

На прозрачную (т.е. работающую на пропускание света) дифракционную решетку, имеющую частоту штрихов $n = 500$ штр/мм, падает нормально (т.е. перпендикулярно её поверхности) узкий параллельный пучок света, имеющий три спектральных составляющих

$$\lambda_1 = 650 \text{ нм};$$

$$\lambda_2 = 550 \text{ нм};$$

$$\lambda_3 = 450 \text{ нм}.$$

Рассчитать максимально возможный порядок m и углы дифракции φ для каждой спектральной составляющей. Построить ход лучей разного цвета после прохождения дифракционной решетки на расстояниях до 70 мм (по радиусу) от места выхода луча из решетки.

Решение.

1. Определяем период решётки

$$d = 1/n = 1/500 \text{ мм} = 2 \text{ мкм} = 2000 \text{ нм}.$$

2. Определяем цвета составляющих

$$\lambda_1 = 650 \text{ нм} - \text{красный},$$

$$\lambda_2 = 550 \text{ нм} - \text{зелёный},$$

$$\lambda_3 = 450 \text{ нм} - \text{синий}.$$

3. Рассчитываем максимальные порядки дифракции для каждой составляющей

$$m_1 = [d / \lambda_1] = [2000 \text{ нм} / 650 \text{ нм}] = 3;$$

$$m_2 = [d / \lambda_2] = [2000 \text{ нм} / 550 \text{ нм}] = 3;$$

$$m_3 = [d / \lambda_3] = [2000 \text{ нм} / 450 \text{ нм}] = 4.$$

4. Рассчитываем углы дифракции для красной составляющей

Первый порядок дифракции ($m = 1$)

$$\sin \varphi_1 = 1 \cdot \lambda / d = 1 \cdot 650 \text{ нм} / 2000 \text{ нм} = 0,325,$$

$$\varphi_1 = \arcsin 0,35 = 18^\circ.$$

Второй порядок дифракции ($m = 2$)

$$\sin \varphi_2 = 2 \cdot \lambda / d = 2 \cdot 650 \text{ нм} / 2000 \text{ нм} = 0,65,$$

$$\varphi_2 = \arcsin 0,65 = 40,5^\circ.$$

Третий порядок дифракции ($m = 3$)

$$\sin \varphi_3 = 3 \cdot \lambda / d = 3 \cdot 650 \text{ нм} / 2000 \text{ нм} = 0,975,$$

$$\varphi_3 = \arcsin 0,975 = 77^\circ.$$

Аналогично рассчитываем углы для зелёной и синей составляющих.

5. Выполняем цветное графическое построение в соответствии с полученными данными.

6. Анализируем результаты расчёта и графического построения для формулирования выводов (заключения). В частности, следует обратить внимание на углы отклонения лучей разного цвета и объяснить, как это связано с их длиной волны; как от номера порядка зависит угловое расстояние между лучами разного цвета; какой порядок дифракции наиболее выгодно использовать для разрешения данной решёткой линий видимого спектра; возможно ли наложение спектров разного порядка друг на друга, и т.д.

7. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Таблица 2

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_1 , нм	579	577	706	700	656	645	605	587	660	653
λ_2 , нм	546	536	501	508	486	587	557	445	585	616
λ_3 , нм	408	405	471	477	410	445	442	428	483	540
N , штр/мм	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Продолжение табл. 2

Параметры	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
λ_1 , нм	650	640	579	577	706	700	656	645	605	587
λ_2 , нм	614	540	546	536	501	508	486	587	557	445
λ_3 , нм	534	483	408	405	471	477	410	445	442	428
N , штр/мм	300	300	400	400	400	400	400	400	400	400

Продолжение табл. 2

Параметры	Варианты									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
λ_1 , нм	660	653	650	640	579	577	706	700	656	645
λ_2 , нм	585	616	614	540	546	536	501	508	486	587
λ_3 , нм	483	540	534	483	408	405	471	477	410	445
N , штр/мм	400	400	400	400	500	500	500	500	500	500

Продолжение табл. 2

Параметры	Варианты									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
λ_1 , нм	605	587	660	653	650	640	579	577	706	700
λ_2 , нм	557	445	585	616	614	540	546	536	501	508
λ_3 , нм	442	428	483	540	534	483	408	405	471	477
N , штр/мм	500	500	500	500	500	500	600	600	600	600

Продолжение табл. 2

Параметры	Варианты									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
λ_1 , нм	656	645	605	587	660	653	650	640	579	577
λ_2 , нм	486	587	557	445	585	616	614	540	546	536
λ_3 , нм	410	445	442	428	483	540	534	483	408	405
N , штр/мм	600	600	600	600	600	600	600	600	700	700

Продолжение табл. 2

Параметры	Варианты									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
λ_1 , нм	706	700	656	645	605	587	660	653	650	640
λ_2 , нм	501	508	486	587	557	445	585	616	614	540
λ_3 , нм	471	477	410	445	442	428	483	540	534	483
N , штр/мм	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700

8. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. - СПб., М.: Лань, 2009.
2. *Детлаф А.А.* Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высшая школа, 2009.
3. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. - СПб., М.: Лань, 2009.
4. *Иродов И.Е.* Сборник задач. - СПб., М.: Лань, 2010.
5. *Рогачев Н.М.* Решение задач по курсу общей физики. - СПб., М.: Лань, 2008.
6. *Савельев И.В.* Курс физики: в 3 т. - СПб., М.: Лань, 2008. – Т. 3.
7. *Савельев И.В.* Сборник вопросов и задач по общей физике. - СПб., М.: Лань, 2007.
8. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: в 5 т. - М.: Наука, 2009.
9. *Трофимова Т.И.* Курс физики. - М.: Высшая школа, 2009.
10. *Трофимова Т.И.* Сборник задач по курсу физики с решениями. - М.: Высшая школа, 2009.
11. *Фриш С.Э.* Курс общей физики / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. - СПб., М.: Лань, 2008.
12. *Чертов А. Г.* Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. - М.: Физматлит, 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЁТНО- ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	4
2. РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА ПО РАСЧЁТНО- ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ	5
3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА.....	5
4. ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА РЕШЁТКЕ	6
5. ПОЯСНЕНИЯ К ЗАДАНИЮ	10
6. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА	13
7. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ.....	14
8. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .	16