

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ

Расчетно-графическое задание (РГЗ) включает 3 задачи по разделам: интерференция света, дифракция света и/или поляризация света. Задачи выбираются согласно номеру варианта в соответствии с таблицей. Номер варианта соответствует номеру студента в журнале группы, который ведет староста группы.

Таблица

Номер варианта	Номера задач		
1.	1.1	4.28	2.14
2.	1.2	4.27	5.1
3.	1.3	4.26	2.15
4.	1.4	4.25	5.2
5.	1.5	4.24	2.16
6.	1.6	4.23	5.3
7.	1.7	4.22	2.17
8.	1.8	4.21	5.4
9.	1.9	4.20	2.18
10.	1.10	4.19	5.5
11.	1.11	4.18	2.19
12.	1.12	4.17	4.6
13.	1.13	4.16	2.20
14.	1.14	4.15	5.6
15.	1.15	4.14	2.21
16.	2.1	4.13	4.7
17.	2.2	4.12	2.22
18.	2.3	4.11	5.7
19.	2.4	4.10	4.1
20.	2.5	4.9	5.8
21.	2.6	4.8	4.2
22.	2.7	3.1	5.9
23.	2.8	3.2	4.3
24.	2.9	3.3	5.10
25.	2.10	3.4	4.4
26.	2.11	3.5	5.11
27.	2.12	3.6	4.5
28.	2.13	3.7	5.12

Содержание отчета по РГЗ. Отчет по РГЗ включает краткие теоретические сведения и решения задач в соответствии с методическими указаниями, приведенными ниже.

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Интерференция света - особый случай сложения волн, при котором в одних точках волны усиливают друг друга, а в других точках волны гасят друг друга. Интерферируют только когерентные волны.

Условие когерентности: $\omega_1 = \omega_2$; $\Delta\varphi = \text{const}$, частоты колебаний равны, а разность фаз слагаемых волн постоянна.

Интерференционная картина – чередование максимумов (max) и минимумов (min) освещенности (светлых и темных полос). Положение светлых и темных полос определяется условиями:

$$\text{максимума } \Delta l = \pm k\lambda = \pm \frac{2k\lambda}{2} \quad \text{и} \quad \text{минимума } \Delta l = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta l = l_2 - l_1 = n_2 r_2 - n_1 r_1$ – разность оптического хода волн, λ – длина волны, $k=0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок максимума (минимума).

При двулучевой интерференции (опыты Юнга, Френеля) *координата k-ой светлой полосы:*

$$y_k = \frac{kL\lambda}{d},$$

где L - расстояние от источников когерентных волн до экрана, d – расстояние между источниками когерентных волн. Расстояние между соседними интерференционными полосами (ширина полосы) $\Delta y = L\lambda / d$.

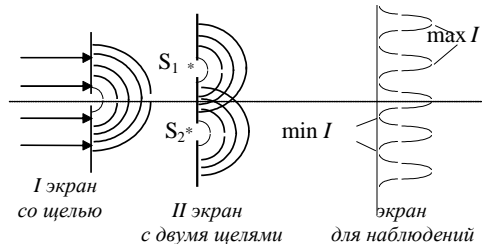
Примеры решения задач.

Задача 1. Определите расстояние между когерентными источниками в опыте Юнга, если на экране на протяжении 10,8 мм лежит шесть интерференционных полос. Расстояние от источников до экрана 3 м. Длина волны монохроматического света 6000 \AA .

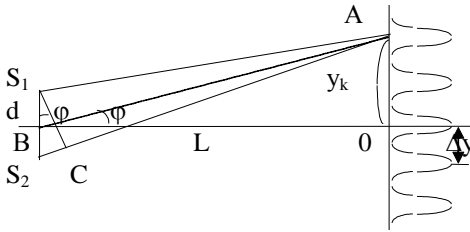
Дано: $b = 10,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $N = 6$, $L = 3 \text{ м}$, $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Найти: d – ?

Решение.



В опыте Юнга источниками когерентных волн являются щели в экране II (по принципу Гюйгенса).



Пусть $S_1S_2=d$; $OB=L$. В точке А наблюдается k -ый максимум. $OA=y_k$ – координата максимума, $\Delta l = l_2 - l_1$ – разность хода волн от источников S_1 и S_2 , встречающихся в точке А. Из рисунка

$$\Delta l = S_2C = d \sin \varphi,$$

где $\angle \varphi = \angle S_2S_1C$. $\Delta l = k\lambda$ – по условию максимума. Следовательно $d \sin \varphi = k\lambda$.

Из $\triangle OAB$: $y_k = L \operatorname{tg} \varphi$. Угол φ мал, так как $d \ll L$. Тогда $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$. $y_k = L \operatorname{tg} \varphi = L \sin \varphi = \frac{Lk\lambda}{d}$. $y_{k+1} = \frac{L(k+1)\lambda}{d}$ – координата $(k+1)$ -го максимума. $\Delta y = y_{k+1} - y_k = L\lambda/d$ – расстояние между соседними интерференционными полосами. По условию задачи $\Delta y = b/N$. Поэтому $\frac{L\lambda}{d} = \frac{b}{N}$; $d = \frac{L\lambda N}{b}$; $d = 10^{-3} \text{ м} = 1 \text{ мм}$. *Ответ: $d=1 \text{ мм}$.*

Задача 2. В точках А и В находятся когерентные источники световых волн ($\lambda=550 \text{ нм}$). На сколько изменится разность хода и разность фаз колебаний, приходящих в точку О, если на пути АО поместить мыльную пленку толщиной 1 мкм ? Показатель преломления $1,33$.

Дано: $\lambda=5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, $d=10^{-6} \text{ м}$, $n=1,33$

Найти: Δl -? $\Delta l'$ -? $\Delta \varphi$ -?

Решение.

$\Delta l = l_2 - l_1$ – разность оптического хода волн, встречающихся в точке О, где $l_2=BO$, $l_1=AO$, l_1, l_2 – оптические длины путей лучей в воздухе.

$\Delta l' = l_2' - l_1'$ – разность оптического хода лучей с мыльной пленкой.

$l_1' = l_1 - d + dn = l_1 + d(n-1)$ – оптическая длина пути луча АО, $\Rightarrow \Delta l' = l_2 - l_1 - d(n-1)$.

Поэтому разность оптического хода меняется на величину:

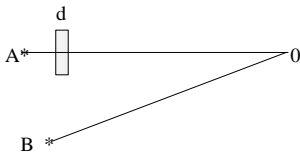
$$\Delta l - \Delta l' = l_2 - l_1 - l_2 + l_1 + d(n-1) = d(n-1).$$

$$\Delta l - \Delta l' = d(n-1) = 10^{-6}(1,33-1) = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Разность фаз связана с разностью хода

волн соотношением: $\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda}$. Поэтому изменение разности фаз :

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot 3,3 \cdot 10^{-7}}{5,5 \cdot 10^{-7}} = 1,2\pi.$$



Задача 3. Угол между зеркалами Френеля $\alpha=10^\circ$. На зеркала падает свет от щели, находящейся на расстоянии 10 см от линии пересечения зеркал. Длина световой волны источника $\lambda=600$ нм. Отраженный от зеркал свет дает интерференционную картину на экране, расположенном на расстоянии $L=270$ см от линии пересечения зеркал. определите расстояние между интерференционными полосами на экране.

Дано: $\alpha=10^\circ$, $r=0,1$ м, $\lambda=600$ нм= $6 \cdot 10^{-7}$ м, $L=2,7$ м

Найти: Δx - ?

Решение. В опыте с зеркалами Френеля (угол между ними близок к 180°) мнимые изображения источника S_1, S_2 в зеркалах играют роль когерентных источников. При отражении света от двух зеркал на экран падают два световых пучка (см. рис.) Так как эти пучки идут от одного и того же источника, то они когерентны и, перекрываясь, дают на экране интерференционную картину.

Расстояние между интерференционными полосами на экране (ширина интерференционной полосы) может

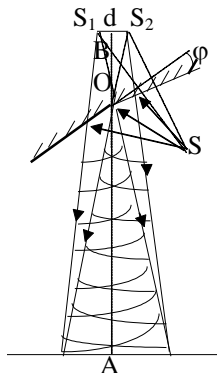
быть рассчитана по формуле: $\Delta x = \frac{\lambda D}{d}$, где D

$=OB+OA=OB+L$, $\angle S_2OS_1=2\alpha$. Тогда $OB = r \cos \alpha$. След-

овательно, $D = L + r \cos \alpha$. $d = S_1S_2 = 2r \sin \alpha$. Отсюда

$$\Delta x = \lambda \frac{L + R \cos \alpha}{2r \sin \alpha}. \quad \alpha=10^\circ, \text{ поэтому } \cos \alpha \approx 1, \sin \alpha \approx 0,0029. \quad \Delta x = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ = 2,9 \text{ мм.}$$

Анализируя данный результат, легко заметить, что d должно быть малым, чтобы интерференционные полосы можно было различать. Следовательно, и угол α должен быть мал (порядка нескольких минут). Если $\alpha=3^\circ$, то $\Delta x = 10^{-7}$ м, то есть полосы такой ширины недоступны наблюдению.



Задачи для самостоятельного решения.

1.1. Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ($\lambda=5 \cdot 10^{-5}$ см) заменить красным ($\lambda=6,5 \cdot 10^{-5}$ см)?

1.2. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом длиной волны $\lambda=6 \cdot 10^{-5}$ см, расстояние между отверстиями 1 мм и расстояние от отверстий до экрана 3 м. Найти положение трех первых светлых полос.

1.3. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей помещалась тонкая стеклянная пластинка, вследствие чего центральная светлая полоса смещалась в положение, первоначально занятое пятой светлой полосой (не считая центральной). Луч падает на пластинку перпендикулярно.

Показатель преломления пластинки 1,5. Длина волны $\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м. Какова толщина пластинки?

1.4. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света было равно 0,55 мм, расстояние до экрана 5 м. В зеленом свете получились интерференционные полосы на расстоянии 5 мм друг от друга. Найти длину волны зеленого света?

1.5. От узкой щели при помощи бипризмы Френеля с преломляющим углом $\varphi=20^\circ$ получают на экране интерференционную картину. Щель расположена на расстоянии $r=25$ см от бипризмы, а экран на расстоянии $L=100$ см. Определите длину волны света, освещающего щель, если ширина интерференционных полос на экране $\Delta x=0,55$ мм.

1.6. На пути одного луча в опыте Юнга поставлена трубка с плоскопараллельными стеклянными основаниями длиной $l=2$ см. При заполнении трубки хлором вся интерференционная картина на экране смещалась на $N=20$ полос. Вычислите показатель преломления хлора, считая, что показатель преломления воздуха $n_v=1,000276$, длина волны света, даваемого источником, $\lambda=589$ нм.

1.7. Свет прошел в сероуглероде 20 см. Какой путь пройдет свет за то же время в воде? Чему равняется оптическая длина пути света в воде и в сероуглероде? Показатель преломления сероуглерода 1,63, показатель преломления воды 1,33.

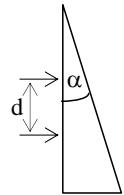
1.8. Два точечных когерентных источника света находятся в спирте ($n=1,36$) на расстоянии 1 см друг от друга. Определить оптическую разность хода для точки, лежащей на расстоянии 20 см от одного из источников по направлению нормали к прямой, соединяющей источники.

1.9. Два когерентных источника, находящихся в воздухе на расстоянии 20 мм, испускают световые волны в одинаковой фазе с частотой $5 \cdot 10^{11}$ Гц. Чему равняется разность фаз колебаний, приходящих в точку, удаленную на 50 см от одного из источников в направлении нормали к прямой, соединяющей источники?

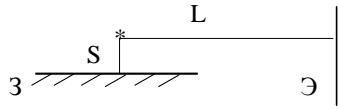
1.10. Определите длину отрезка l_1 , на котором укладывается столько же длин волн монохроматического света в вакууме, сколько их укладывается на отрезке $l_2 = 5$ мм в стекле. Показатель преломления стекла $n=1,5$.

1.11. Два параллельных световых пучка, отстоящих друг от друга на расстоянии $d = 5$ см, падает на кварцевую призму ($n=1,49$) с преломляющим углом $\alpha = 25^\circ$. Определите оптическую разность хода Δ этих пучков на выходе из призмы.

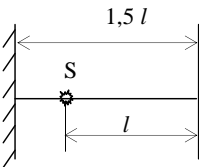
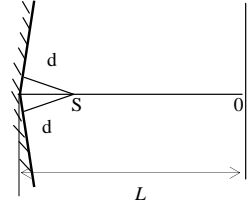
1.12. В опыте Юнга расстояние l от щелей до экрана равно 3 м. Определите угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на 4,5 мм.



1.13. Точечный источник монохроматического света находится на расстоянии $S=1$ мм от большого плоского зеркала Z на расстоянии $L=4$ м от экрана \mathcal{E} , перпендикулярного зеркалу (см. рис.). Каково расстояние x между соседними максимумами освещенности на экране, если длина волны $\lambda=600$ нм.



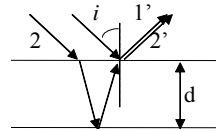
1.14. Два плоских зеркала образуют двугранный угол $\alpha=179,5^\circ$ (см. рис.) На одинаковых расстояниях $d=10$ см от каждого из зеркал расположен точечный источник A монохроматического света с длиной волны $\lambda=600$ нм. Найдите расстояние x между серединами соседних светлых интерференционных полос на экране, расположенном на расстоянии $L=3$ м от линии пересечения зеркал. Свет непосредственно от источника на экран не попадает.



1.15. Точечный источник монохроматического света с длиной волны $\lambda=500$ нм расположен на расстоянии $l=50$ см от экрана, а на расстоянии $1,5 l$ от экрана находится параллельное экрану плоское зеркало (см. рис.). Какой вид имеет интерференционная картина на экране? Темная или светлая интерференционная полоса проходит на расстоянии 2 мм от точки O на экране.

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ И ПЛАСТИНКАХ. ПРИМЕНЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

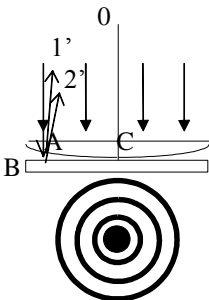
При освещении тонких пленок и пластинок когерентные волны образуются за счет отражения и преломления света на обеих поверхностях пленки. $1'$, $2'$ – когерентные лучи в отраженном свете.



Разность хода лучей в **отраженном** свете $\Delta l = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$;

разность хода лучей в **проходящем** свете $\Delta l = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}$, где d – толщина пленки, n – показатель преломления пленки, i – угол падения.

Если $d=\text{const}$, $i \neq \text{const}$ – наблюдается интерференционная картина в виде **полос равного наклона**. Если $d \neq \text{const}$, $i = \text{const}$ – наблюдается интерференционная картина в виде **полос равной толщины**.



Кольца Ньютона (полосы равной толщины) – интерференционная картина, наблюдаемая на установке, состоящей из линзы с большим радиусом кривизны и стеклянной пластинки.

Интерференция происходит на зазоре (в виде клина) между линзой и пластинкой. Интерференционные полосы имеют форму концентрических колец.

$\Delta l = 2d + \frac{\lambda}{2}$ – разность хода для лучей 1', 2' в отраженном свете, d – толщина воздушного зазора.

$\Delta l = 2d$ – разность в проходящем свете.

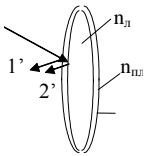
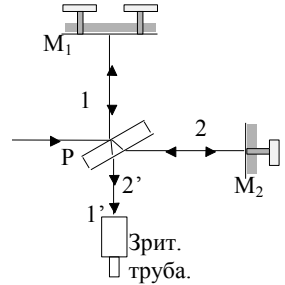
$r_k = \sqrt{kR\lambda}$ – радиус k -го темного кольца в отраженном свете (светлого в проходящем свете);

$r_k = \sqrt{(2k-1)R\frac{\lambda}{2}}$ – радиус k -го светлого кольца в отраженном свете (темного в проходящем свете).

Интерферометры – приборы, действие которых основано на явлении интерференции.

Интерферометр Майкельсона. Лучи от источника S разделяются на два (1 и 2) с помощью полупрозрачной пластинки P . Отражаясь от зеркал M_1 и M_2 и проходя через пластинку P , они дают когерентные лучи 1' и 2'. Наблюдение ведем через зрительную трубу. $\Delta l = 2(l_2 - l_1)$ – разность хода лучей, l_1, l_2 – длины плеч интерферометра.

При смещении любого зеркала на x разность хода меняется на величину $2x$, а интерференционная картина смещается на N полос: $2x = N\lambda$.



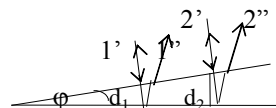
“Просветление оптики” – улучшение качества оптических приборов на основе явления интерференции. Поверхность линз, используемых в объективах оптических приборов, покрывают тонкой пленкой с $n_1 > n_{пл} > 1$. За счет отражения на обеих поверхностях пленки образуются когерентные лучи 1' и 2'. Если $\Delta l = 2dn_{пл} = \frac{\lambda}{2}$ – лучи гасят друг друга.

Примеры решения задач.

Задача 1. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин вследствие стекания жидкости. Наблюдая интерференционные полосы в отраженном свете ртутной дуги ($\lambda=546$ нм), находим, что расстояние между пятью полосами равно 2 см. Найти угол клина в секундах. Свет падает перпендикулярно к поверхности пленки. Показатель преломления мыльной воды 1,33.

Дано: $\lambda=546$ нм= $5,46 \cdot 10^{-7}$ м, $N=5$, $l=2$ см= $2 \cdot 10^{-2}$ м, $n=1,33$, $i=0^\circ$

Найти: φ -?



Решение. Так как пленка расположена вертикально, она имеет форму клина.

За счет отражения от верхней и нижней поверхности пленки образуются когерентные лучи $1', 1'', 2', 2''$ в отраженном свете. Разность хода для этих лучей:

$$\Delta l = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}. \quad \text{Т.к. } i=0^\circ, \text{ то } \Delta l = 2dn + \frac{\lambda}{2}.$$

Пусть на толщине d_1 -наблюдается k -ая темная полоса: $2d_1n + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$. Отсюда $2d_1n = k\lambda$. $\Rightarrow d_1 = \frac{k\lambda}{2n}$ – толщина пленки, где наблюдается k -ая темная интерференционная полоса.

Тогда $d_2 = \frac{(k+N)\lambda}{2n}$ – толщина пленки, где наблюдается $(k+N)$ -ая темная полоса. Следовательно, на длине пленки l наблюдается N интерференционных полос. Из рисунка $\frac{d_2 - d_1}{l} = \sin \varphi$. Так как φ мал, то

$$\sin \varphi \approx \varphi. \quad \varphi = \frac{N\lambda}{2nl}; \quad \varphi = 5,13 \cdot 10^{-3} \text{ рад. } 1 \text{ рад} = 57,3^\circ = 57,3 \cdot 3600''$$

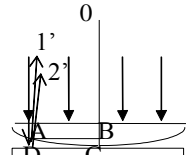
$$\varphi = 5,13 \cdot 10^{-5} 57,3 \cdot 3600'' \approx 10,6'' \approx 11''. \quad \text{Ответ: } \varphi \approx 11''.$$

Задача 2. Найти показатель преломления жидкости, заполняющей пространство между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой, если при наблюдении в отраженном свете ($\lambda=0,6$ мкм) радиус 10-го темного кольца Ньютона оказался равным 2,1 мм. Радиус кривизны линзы 0,1 м.

Дано: $\lambda=6 \cdot 10^{-6}$ м, $k=10$, $r_k=2,1 \cdot 10^{-3}$ м, $R=1$ м

Найти: n -?

Решение. $AB=r_k$, $OA=OC=R$, $AD=d$ – толщина жидкости, где наблюдается 10-е темное кольцо.



Разность хода для лучей 1 и 2: $\Delta l = 2dn + \frac{\lambda}{2}$. условие минимума для

интерференции этих лучей $\Delta l = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$. Отсюда: $2dn = k\lambda$ (1).

$$\text{Из } \triangle OAB \quad r_k^2 = R^2 - (R-d)^2 \approx 2Rd \quad (2),$$

т.к. $d^2 \ll 2Rd$. Подставим (1) в (2) и получим: $r_k^2 = kR\lambda/n$. Отсюда $n = kR\lambda/r_k^2$; $n=1,36$

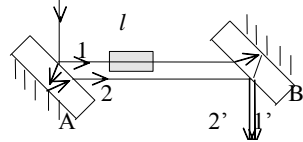
Задача 3. На пути одного из лучей интерферометра Жамена поместили откачанную трубку длиной 10 см. при заполнении трубки хлором ин-

терференционная картина сместилась на 131 полосу. Длина волны монохроматического света в этом опыте была равна $5,9 \cdot 10^{-5}$ см. Найти показатель преломления хлора.

Дано: $l=0,1$ м, $N=131$, $\lambda=5,9 \cdot 10^{-7}$ м

Найти: n_{Cl} -?

Решение. В интерферометре Жамена используют две толстые пластины А и В, у которых одна из поверхностей зеркальна. За счет отражения и преломления образуются когерентные лучи 1', 2'. Если на пути одного из лучей (1) поместить трубку длиной l , заполненную хлором, разность хода лучей 1', 2' изменится на $\Delta l = ln - l = l(n_{Cl} - 1)$. Это приводит к смещению интерференционной картины на N полос. Следовательно, $l(n_{Cl} - 1) = N\lambda$. Отсюда:



$$n_{Cl} = 1 + \frac{N\lambda}{l}; \quad n_{Cl} = 1,000773.$$

Задачи для самостоятельного решения.

2.1. На мыльную пленку падает белый свет под углом 45° . При какой наименьшей толщине пленка будет казаться желтой ($\lambda_{ж}=6 \cdot 10^{-7}$ м), если наблюдение ведется в отраженном свете. Показатель преломления мыльной воды $n=1,33$.

2.2. Мыльную пленку, расположенную вертикально, наблюдают в отраженном свете через красное стекло ($\lambda_{к}=6,31 \cdot 10^{-7}$ м). Расстояние между соседними темными полосами получилось равным 3 мм. Затем эту же пленку наблюдают через синее стекло ($\lambda_{с}=4 \cdot 10^{-7}$ м). Найдите новое расстояние между соседними темными полосами (считать, что за время измерений форма пленки не изменилась).

2.3. На стеклянный клин падает нормально пучок света ($\lambda=5,82 \cdot 10^{-7}$ м). Угол клина $\varphi = 20''$. Какое число темных интерференционных полос приходится на единицу длины клина?

2.4. Определите расстояние между двадцатым и двадцать первым кольцом Ньютона, если расстояние между вторым и третьим светлыми кольцами 1 мм, а кольца наблюдаются в отраженном свете.

2.5. Найдите фокусное расстояние плосковыпуклой линзы, примененной для получения колец Ньютона, если радиус третьего темного кольца 1,1 мм, $n=1,6$, $\lambda = 589$ нм. Кольца наблюдаются в отраженном свете.

2.6. На поверхности воды находится тонкая пленка метилового спирта. При рассматривании в отраженном свете под углом 45° к пленке она кажется черной. Оценить наименьшую возможную толщину пленки, если

она освещается излучением паров натрия ($\lambda = 589$ нм). Показатель преломления воды $n_{\text{в}} = 1,333$, показатель преломления метилового спирта 1,33.

2.7. Тонкая проволока лежит между двумя стеклянными плоскопараллельными пластинками параллельно линии соприкосновения пластин, вследствие чего в отраженном свете наблюдается интерференционная картина с расстоянием между полосами в 1,5 мм. Проволока расположена на расстоянии 7,5 см от линии соприкосновения пластин и имеет диаметр 0,01 мм. Определить длину волны падающего света.

2.8. Оптическая сила плосковыпуклой линзы ($n=1,5$) равна 0,5 диоптрий. Линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определить радиус седьмого темного кольца Ньютона в проходящем свете ($\lambda = 0,5$ мкм).

2.9. Во сколько раз изменится радиус колец Ньютона, если пространство между плосковыпуклой линзой и плоскопараллельной пластинкой заполнить сероуглеродом с показателем преломления 1,6?

2.10. Линза из кронгласа (показатель преломления 1,51) лежит на плоскопараллельной пластинке из флинтгласа (показатель преломления 1,8). Пространство между ними заполнено бензолом (показатель преломления 1,6). При наблюдении в отраженном монохроматическом свете ($\lambda = 590$ нм) радиус шестого светлого кольца оказался равным 5 мм. Определить радиус кривизны линзы.

2.11. Длина волны света, падающего на просветленную линзу оптического прибора, равна 600 нм. Показатель преломления стекла для желтых лучей 1,58. Вычислить, какова может быть наименьшая толщина просветленной пленки.

2.12. Интерферометр Майкельсона был применен для определения длины световой волны. Для этой цели измерялось расстояние, на которое необходимо передвинуть одно из зеркал для того, чтобы сместить интерференционную картину на 100 полос. Это расстояние оказалось равным $2,94 \cdot 10^{-2}$ мм. Определить длину световой волны.

2.13. Монохроматический свет падает нормально на поверхность воздушного клина, причем расстояние между интерференционными полосами $\Delta x_1 = 0,4$ мм. Определите расстояние Δx_2 между интерференционными полосами, если пространство между пластинками, образующими клин, заполнить прозрачной жидкостью с показателем преломления $n=1,33$

2.14. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=0,6$ мкм, падающим нормально. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью, и наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы $R=4$ м. Определите показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца $r=1,8$ мм.

2.15. Спектр натрия в видимой области состоит из двух линий с длинами волн 589 и 589,6 нм. Какое по счету темное кольцо Ньютона соответ-

ствующее одной из линий совпадает со следующим по счету темным кольцом, соответствующим другой линии? Наблюдение проводится в отраженном свете.

2.16. Определите минимальную толщину пленки с показателем преломления $n=1,33$, при которой свет с длиной волны $0,64 \text{ мкм}$ испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны $0,4 \text{ мкм}$ не отражается совсем. Угол падения света равен 30° .

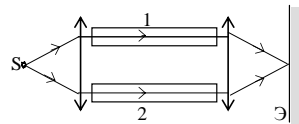
2.17. Две одинаковые плосковыпуклые линзы из крон гласа ($n=1,51$) соприкасаются своими сферическими поверхностями. Определите оптическую силу такой системы, если в отраженном свете с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$ диаметр пятого кольца, если пространство между линзами заполнено сероуглеродом ($n_c=1,63$)

2.18. Несимметричная долго выпуклая линза лежит одной из своих поверхностей на плоскопараллельной пластинке. При наблюдении колец Ньютона в отраженном свете с $\lambda=589 \text{ нм}$ радиус 20-го темного кольца оказался равным 2 мм . Когда линзу положили на пластинку другой поверхностью, то радиус того же темного кольца стал 4 мм . Определите фокусное расстояние линзы, если показатель преломления стекла, из которого она изготовлена, $1,5$.

2.19. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в отраженном свете. Радиусы двух соседних темных колец равны 4 мм и $4,38 \text{ мм}$. Радиусы кривизны линзы $R=6,4 \text{ м}$. Найти порядковые номера колец и длину волны λ падающего света.

2.20. Установка для получения колец Ньютона освещается светом от ртутной дуги, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в проходящем свете. Какое по порядку светлое кольцо, соответствующее линии $\lambda_1=579,1 \text{ нм}$ совпадает со следующим светлым кольцом, соответствующим линии $\lambda_2=577 \text{ нм}$?

2.21. На рисунке показана схема интерференционного рефрактометра, применяемого для измерения показателя преломления прозрачных веществ. S – узкая щель, освещаемая монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 589 \text{ нм}$; 1 и 2 кюветы длиной $l = 10 \text{ см}$, которые заполнены воздухом ($n=1,000277$). При замене в одной из кювет воздуха на аммиак интерференционная картина на экране сместилась на $m = 17$ полос. Определить показатель преломления аммиака.



2.22. На поверхность объектива нанесена «просветляющая» пленка толщиной $h = 300 \text{ нм}$. Показатель преломления пленки $n_f = \sqrt{n}$, где n – показатель преломления стекла. На объектив падает нормально пучок белого света. Какой оттенок будет иметь свет, прошедший через объектив? Отразившийся от объектива?

3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА (ФРЕНЕЛЯ)

Дифракция света – это огибание световыми волнами препятствий. При этом размеры препятствий должны быть сравнимы с длиной волны $d \approx \lambda$. Это явление можно объяснить, пользуясь принципом Гюйгенса-Френеля.

Принцип Гюйгенса-Френеля: любая точка пространства, до которой дошло колебание, становится источником вторичных волн. Эти волны когерентны и при наложении интерферируют.

Дифракционная картина – результат интерференции вторичных когерентных волн, т.е. чередование светлых и темных полос (максимумов и минимумов освещенности).

Зоны Френеля – участки волновой поверхности, которые служат источниками вторичных когерентных волн. Расстояние от двух соседних зон до точки наблюдения отличаются на $\lambda/2$. Следовательно, волны от соседних зон отличаются по фазе на π и, встречаясь, гасят друг друга.

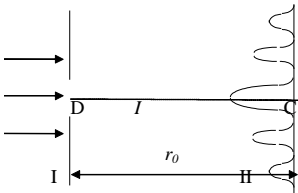
Радиус k -ой зоны Френеля: $\rho_k = \sqrt{\frac{kRr_0\lambda}{R+r_0}}$ – для сферической волны,
 $\rho_k = \sqrt{kr_0\lambda}$ – для плоской волны.

Примеры решения задач.

Задача 1. Свет от монохроматического источника ($\lambda=0,6$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием. Диаметр отверстия 6 мм. За диафрагмой на расстоянии 3 м от нее находится экран. 1) Сколько зон Френеля укладывается в отверстии диафрагмы? 2) Каким будет центр дифракционной картины на экране: темным или светлым?

Дано: $\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м, $D=6 \cdot 10^{-3}$ м, $r_0=3$ м

Найти: k - ?



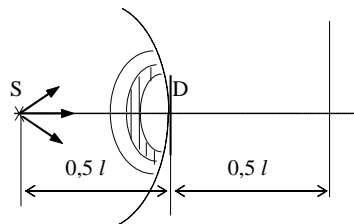
Решение. Так как размер круглого отверстия мал, то на нем происходит дифракция света. Используем метод зон Френеля. Разбиваем мысленно волновой фронт, дошедший до диафрагмы с отверстием, на зоны Френеля.

Тогда при $\frac{D}{2} = \rho_k$ - отверстие оставляет открытым k зон Френеля, т.к. ρ_k - радиус k -ой зоны. Действие этих зон и определяет освещенность экрана II. $\rho_k = \sqrt{kr_0\lambda}$ - для плоского фронта.

Отсюда $\frac{D}{2} = \sqrt{kr_0\lambda}$; $k = \frac{D^2}{4r_0\lambda}$, $k \approx 5$. Так как число открытых зон нечет-

ное (5), то в центре дифракционной картины (в точке С) будет наблюдаться светлое пятно (волны от соседних зон, встречаясь в точке С, гасят друг друга). Дифракционная картина представляет собой чередование темных и светлых полос в виде concentric rings. *Ответ: $k = 5$.*

Задача 2. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см). На расстоянии $0,5l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 1 см. Чему равно расстояние l , если преграда закрывает только центральную зону Френеля?



Дано: $R=r_0=l/2$, $\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м, $D=10^{-2}$ м

Найти: l - ?

Решение. Так как непрозрачная преграда закрывает первую зону

Френеля, то $\rho_1 = \frac{D}{2}$. $\rho_1 = \sqrt{\frac{kRr_0\lambda}{R+r_0}}$ – радиус первой зоны Френеля, так

как волна сферическая; $k=1$.

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{0,5l \cdot 0,5l}{l}} = \frac{D}{2}; \quad 0,25l\lambda = \frac{D^2}{4}; \quad l = \frac{D^2}{\lambda}; \quad l = 166,6 \text{ м} \approx 167 \text{ м}.$$

Задачи для самостоятельного решения.

3.1. Экран находится на расстоянии $L=40$ м от точечного монохроматического источника света ($\lambda=5 \cdot 10^{-4}$ мм). На расстоянии $a=20$ м от источника света помещен экран с ирисовой диафрагмой. При каком радиусе отверстия диафрагмы центр дифракционного изображения отверстия будет: а) наиболее темным; б) наиболее светлым?

3.2. Точечный источник света ($\lambda=550$ нм) находится на расстоянии $L=11$ м от экрана. Между источником света и экраном на расстоянии $b=5$ м от экрана помещена ширма с круглым отверстием, диаметр которого $d=4,2$ мм. Как изменится освещенность в точке, находящейся в центре дифракционной картины, если ширму убрать?

3.3. На расстоянии 2 м от точечного источника света ($\lambda=5 \cdot 10^{-7}$ м) находится экран. Посередине между источником и экраном расположена непрозрачная ширма с отверстием радиусом 1 мм. Ширму перемещают к экрану на расстоянии 0,75 м. Сколько раз при ее перемещении будет наблюдаться темное пятно в центре дифракционной картины на экране?

3.4. Вычислить радиусы первых пяти зон Френеля, если расстояние от источника света до волновой поверхности равно 1 м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения также равно 1 м и $\lambda=5 \cdot 10^{-7}$ м.

3.5. Вычислить радиусы первых пяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1 м. Длина волны $\lambda=5 \cdot 10^{-7}$ м.

3.6. На диафрагму с круглым отверстием падает нормально параллельный пучок монохроматического света ($\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м). На экране наблюдается дифракционная картина. При каком наибольшем расстоянии между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно?

3.7. Почему красный свет рассеивается туманом меньше, чем свет другого цвета?

4. ДИФРАКЦИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧАХ (ФРАУНГОФЕРА)

Дифракция на щели. При освещении щели пучком параллельных лучей, падающих нормально, каждая точка щели становится источником вторичных когерентных волн. Волны, идущие под углом φ к первоначальному направлению, собираются в точке Р в фокальной плоскости линзы L и интерферируют. Дифракционная картина от щели – чередование светлых и темных полос (максимумов и минимумов освещенности).

$$\text{Условие максимума} \quad b \sin \varphi = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2} .$$

$$\text{Условие минимума} \quad b \sin \varphi = \pm k \lambda .$$

Здесь b – ширина щели, φ – угол дифракции, $k = 1, 2, \dots$ – порядок максимума (минимума), λ – длина волны.

Интенсивность в точке экрана, положение которой определяется уг-

$$\text{лом дифракции } \varphi: \quad I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} \right)}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} \right)^2},$$

где I_0 – интенсивность света в центре дифракционной картины.

Дифракционная решетка – система узких параллельных щелей, разделенных непрозрачными промежутками. $b+c=d$ – период (постоянная) решетки; b - ширина щели, c - ширина непрозрачного промежутка.

Дифракционная картина от решетки – узкие яркие полосы на темном фоне (главные максимумы).

$$\text{Условие главного максимума} \quad d \sin \varphi = \pm m \lambda ,$$

где m – порядок главного максимума.

Характеристики решетки как спектрального прибора:

$$\text{угловая дисперсия } D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}; \quad [D] = \frac{\text{рад}}{\text{м}};$$

$d\varphi$ – угловое расстояние между двумя линиями в спектре данного порядка с разностью длин волн $d\lambda$.

$$\text{линейная дисперсия } D = \frac{dl}{d\lambda} = FD;$$

dl – линейное расстояние между двумя линиями в спектре данного порядка; F – фокусное расстояние линзы;

$$\text{разрешающая способность } R = \frac{\lambda}{d\lambda} = mN$$

$d\lambda$ – минимальная разность длин волн двух линий в спектре данного порядка при условии, что эти линии видны раздельно; N – число щелей в решетке;

Угловое расстояние $\Delta\varphi$ между двумя точками, разрешаемыми телескопом: $\Delta\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D}$, где D – диаметр объектива.

$$\text{Расстояние } d, \text{ разрешаемое объективом микроскопа: } d \geq \frac{0,61\lambda}{n \sin \alpha},$$

где λ – длина световой волны, n – показатель преломления среды (между предметом и объективом), α – половина угла между лучами, идущими от объекта к краям объектива.

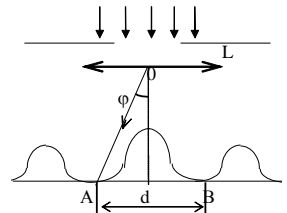
Примеры решения задач.

Задача 1. На щель шириной $2 \cdot 10^{-3}$ см падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $5 \cdot 10^{-5}$ см. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на расстоянии 1 м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.

Дано: $b=2 \cdot 10^{-5}$ м, $\lambda=5 \cdot 10^{-7}$ м, $l=1$ м.

Найти: d – ?

Решение. Дифракционная картина от щели – чередование максимумов и минимумов освещенности (светлых и темных полос). В центре картины – светлая полоса или расширенное изображение щели. $d=|AB|$ – ширина изображения щели. Точки А и В определяют положения минимума первого порядка, которые определяются



из условия: $b \sin \varphi = k\lambda$, где $k=1$. Отсюда: $\sin \varphi = \frac{\lambda}{b}$. Из $\triangle OAB$:

$\frac{d}{2} = l \operatorname{tg} \varphi$ или $d = 2 l \operatorname{tg} \varphi$, но для малых углов $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$, следова-

тельно: $d = 2l \frac{\lambda}{b}$; $d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ (м)} = 5 \text{ см}$. *Ответ:* $d = 5 \text{ см}$.

Задача 2. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, нормально падает белый свет. Непосредственно за решеткой помещена линза с фокусным расстоянием 2 м, проецирующая спектры на экран. Диапазон длин волн видимого спектра $\lambda_{\text{ф}} = 400 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{кп}} = 700 \text{ нм}$. а) Могут ли перекрываться спектры первого и второго порядка? б) Во сколько раз спектр второго порядка на экране длиннее спектра первого порядка? в) Какова разность углов отклонения конца первого и начала второго порядка?

Дано: $n = 500 \frac{1}{\text{мм}} = 5 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{м}}$, $F = 2 \text{ м}$, $\lambda_{\text{ф}} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, $\lambda_{\text{кп}} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

Найти: а) $\varphi_1 - ?$ $\varphi_2 - ?$ б) $l_2 / l_1 - ?$ в) $\varphi_2 - \varphi_1 - ?$

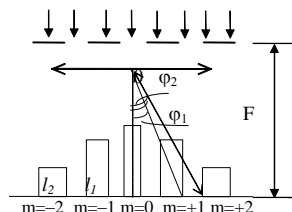
Решение. При освещении решетки белым светом на экране наблюдаем дифракционный спектр – все максимумы, кроме нулевого, цветные полосы, обращенные фиолетовым концом к нулевому максимуму. Положения максимума определяются из условия $d \sin \varphi = \pm m \lambda$, где d - период решетки: $d = 1/n$ (расстояние между соседними штрихами). Чтобы узнать, перекрываются ли спектры первого и второго порядков, определим углы дифракции для красного конца спектра первого порядка и фиолетового конца спектра второго порядка φ_1 и φ_2 :

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda_{\text{к}}}{d} = \lambda_{\text{к}} n, \sin \varphi_1 = 0,35; \varphi_1 = 20,5^\circ$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{2\lambda_{\text{ф}}}{d} = 2\lambda_{\text{ф}} n, \sin \varphi_2 = 0,4; \varphi_2 = 23,6^\circ$$

Так как $\varphi_2 > \varphi_1$ – это означает, что спектры не перекрываются. По значениям углов φ_1 и φ_2 определим разность углов отклонения: $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 23,6^\circ - 20,5^\circ = 3,1^\circ$.

Длина спектра k -го порядка $l = F(\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)$, где φ_1 и φ_2 – углы дифракции, определяющие положение краев спектров, а углы дифракции находим из условия главных максимумов $\sin \varphi = \frac{m \lambda}{d} = m \lambda n$. Для



спектра первого порядка $\varphi_{\phi}=11,54^{\circ}$, $\varphi_{\text{кр}}=20,5^{\circ}$. Для спектра второго порядка

$$\varphi_{\phi}'=23,6^{\circ}, \varphi_{\text{кр}}'=44,4^{\circ}. \text{ Тогда } \frac{l_2}{l_1} = \frac{tg\varphi_{\text{кр}}' - tg\varphi_{\phi}'}{tg\varphi_{\text{кр}} - tg\varphi_{\phi}} = \frac{0,98 - 0,437}{0,347 - 0,2} = 3,12.$$

Ответы: $\varphi_1=20,5^{\circ}$, $\varphi_2=23,6^{\circ}$, $\frac{l_2}{l_1} = 3,12$ $\Delta\varphi = 3,1^{\circ}$.

Задача 3. Определить ширину дифракционной решетки, которая позволила бы разрешить в спектре третьего порядка две линии натрия с длинами волн 589 нм и 589,6 нм. Постоянная решетки равна $5 \cdot 10^{-3}$ мм.

Дано: $m=3$, $\lambda_1=5,89 \cdot 10^{-7}$ м и $\lambda=5,896 \cdot 10^{-7}$ м.

Найти: a -?

Решение. Разрешающая способность решетки $R = \lambda_1 / \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ - разность длин волн двух близко расположенных линий. Если максимум одной линии приходится на минимум соседней, эти линии будут видны раздельно, а $R = mN$, где N - число всех щелей. $N = \frac{a}{d}$, так как d - расстояние между соседними щелями.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = k \frac{a}{d}. \text{ Отсюда } a = \frac{\lambda_1 d}{m(\lambda_2 - \lambda_1)}; a = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,63 \text{ мм}.$$

Задачи для самостоятельного решения.

4.1. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 400 нм падает нормально на щель шириной 20 мкм. За щелью помещена линза с фокусным расстоянием 50 см, с помощью которой можно наблюдать дифракционные полосы на экране. Определить расстояние между светлыми полосами первого и второго порядков.

4.2. На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Ширина щели равна 6λ . Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

4.3. На непрозрачную пластинку с узой щелью нормально падает монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующий второй светлой дифракционной полосе, равен 1° . Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели?

4.4. Каково наибольшее значение числа k (номер дифракционного максимума) для желтой линии натрия ($\lambda=589$ нм) при нормальном падении лучей на щель шириной 2 мкм? Сколько всего наблюдается максимумов?

4.5. На щель шириной 10 мкм нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м. Определите значения интенсивностей пер-

вого, второго и третьего максимумов, приняв интенсивность нулевого максимума за единицу.

4.6. Монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм падает на длинную прямоугольную щель шириной $a = 12$ мкм под углом $\alpha_0 = 45^\circ$ к ее нормали. Определите угловое положение первых минимумов, расположенных по обе стороны центрального френгоферова максимума.

4.7. На дифракционную решетку, имеющую 200 штрихов на 1 мм, нормально падает свет от разрядной трубки с водородом. Под каким наименьшим углом дифракции максимумы линий $\lambda_1 = 410,2$ нм и $\lambda_2 = 656,6$ нм совпадают.

4.8. На дифракционную решетку длиной $l = 15$ мм, содержащую $N = 3000$ штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550$ нм. Определить: 1) число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; 2) угол, соответствующий последнему максимуму.

4.9. Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядка составляет 12° .

4.10. Какой должна была бы быть толщина плоскопараллельной стеклянной пластинки ($n = 1,55$), чтобы в отраженном свете максимумы второго порядка для $\lambda = 0,65$ мкм наблюдались под тем же углом, что и у дифракционной решетки с постоянной $d = 1$ мкм.

4.11. Как изменится вид дифракционного спектра, если источник белого света, дифракционную решетку и экран (не меняя расстояний между ними) переместить из воздуха в воду? Рассмотрите также случаи, когда для получения дифракционного спектра используется стоящая за дифракционной решеткой собирающая линза

4.12. Две дифракционные решетки имеют одинаковую длину, но разное число штрихов. Как отличаются у этих решеток дисперсии, разрешающие способности?

4.13. В гониометре ГС5 используется дифракционная решетка, имеющая 600 штрихов на 1 мм длины. На каком расстоянии друг от друга будут находиться в фокальной плоскости объектива гониометра с такой решеткой две желтые линии излучения ртутной лампы ($\lambda_1 = 577$ нм, $\lambda_2 = 589,6$ нм) в спектре первого порядка, если фокусное расстояние объектива зрительной трубы гониометра 27,3 см.

4.14. Ширина решетки 15 мм, период решетки 5 мкм. В спектре какого наименьшего порядка получают отдельные изображения двух спектральных линий с разностью длин волн $2 \cdot 10^{-10}$ м, если линии принадлежат диапазону крайней красной части видимого спектра (780 нм ÷ 700 нм)?

4.15. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки. Чему должна быть равна постоянная дифракционной

решетки, чтобы в направлении $\varphi=41^\circ$ совпадали максимумы двух линий: $\lambda_1=656,3$ нм и $\lambda_2=4,102$ нм?

4.16. Найти наибольший порядок спектра для желтой линии натрия $\lambda=589$ нм, если постоянная дифракционной решетки равна 2 мкм. Сколько максимумов дает данная решетка?

4.17. Постоянная дифракционной решетки шириной в 2,5 см равна 2 мкм. Какую разность длин волн может разрешить эта решетка в области желтых лучей ($\lambda=6 \cdot 10^{-5}$) в спектре второго порядка?

4.18. Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda=667$ нм в спектре первого порядка равна $2,02 \cdot 10^5$ рад/м. Найти период дифракционной решетки.

4.19. На каком расстоянии друг от друга будут находиться на экране две линии ртутной дуги ($\lambda_1=577$ нм и $\lambda_2=575,1$ нм в спектре первого порядка, полученном при помощи дифракционной решетки с периодом $2,10 \cdot 10^{-4}$ см)? Фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экране, равно 0,6 м.

4.20. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda=630$ нм) видна в спектре третьего порядка под углом $\varphi=60^\circ$. 1) Какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? 2) Какое число штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка? 3) Чему равна угловая дисперсия этой решетки для линии $\lambda=630$ нм в спектре третьего порядка?

4.21. Какое фокусное расстояние должна иметь линза, проектирующая на экран спектр, полученный при помощи дифракционной решетки, чтобы расстояние между двумя линиями калия 404,4 нм и 404,7 нм в спектре первого порядка было равно 0,1 мм? Постоянная дифракционной решетки равна 2 мкм.

4.22. На плоскую дифракционную решетку с периодом $5,10 \cdot 10^{-3}$ мм нормально падает пучок монохроматического света. Угол между направлениями лучей, дающих максимумы первого порядка справа и слева от центральной полосы дифракционной картины, равен $13^\circ 48'$. Определить длину волны падающего света.

4.23. Вычислить наибольший угол, на который может отклониться пучок монохроматического света дифракционной решеткой, имеющей 10 000 штрихов при ширине решетки 4 см. Длина волны падающего света 546 нм. Длина волны падающего света 546 нм. Лучи падают нормально к плоскости решетки.

4.24. Две лампы установлены на расстоянии 20 см друг от друга. С какого расстояния их можно различать в телескопе с диаметром объектива 15 см? Принять, что глаз наиболее чувствителен к длине волны 0,55 мкм.

4.25. Вычислить наибольший разумный диаметр объектива телескопа и наименьшее угловое расстояние между двумя звездами, изображение

которых получается раздельно на фотографической пластинке, поставленной в фокальной плоскости объектива телескопа. Фокусное расстояние объектива 2 м. Размер зерна эмульсии фотографической пластинки 0,01 мм. Длина волны света 0,55 мкм.

4.26. Какова должна быть длина дифракционной решетки с периодом 300 штрихов на 1мм, чтобы разрешить две спектральные линии с длинами волн 600нм и 600,05нм в спектре второго порядка? В спектре наивысшего порядка?

4.27. Луч лазера падает на дифракционную решетку перпендикулярно ее плоскости, Отношение $x_{01} : x_{12}$ – расстояний между нулевым и первым (x_{01}) и между первым и вторым (x_{12}) дифракционными максимумами на удаленном от решетки экране примерно равно.

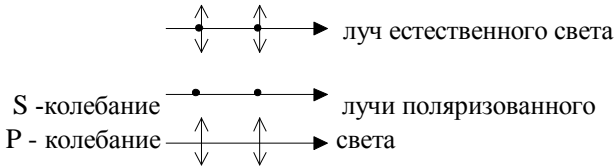
4.28. В темной комнате на столе стоит газоразрядная лампа, излучающая вертикальную полосу красного свечения. Если посмотреть на лампу через стеклянную призму спектроскопа отчетливо видны уже три цветные линии: красная, оранжевая и голубая. Далее смотрим на лампу через дифракционную решетку, расположив штрихи решетки вертикально. Что в этом случае можно увидеть? Обоснуйте свои выводы.

5. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Естественная световая волна - колебания вектора \vec{E} (напряженности переменного электрического поля) в плоскости, перпендикулярной лучу, изменяют свое направление.

Поляризованная световая волна - колебания вектора \vec{E} в плоскости, перпендикулярной лучу, фиксировано.

Условные обозначения:



Главная плоскость поляризатора (анализатора) – плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} после прохождения поляризатора (анализатора).

Закон Малюса: $I_2 = I_1 \cos^2 \varphi$, $I_1 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$,

I_2 - интенсивность света за анализатором,

I_1 - интенсивность света после поляризатора,

φ - угол между главными плоскостями поляризатора, анализатора.

Формулы Френеля:

$$R_S = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} - \text{коэффициент отражения S-колебаний от поверхности}$$

диэлектрика;

$$R_P = \frac{\text{tg}^2(i - r)}{\text{tg}^2(i + r)} - \text{коэффициент отражения P-колебаний.}$$

$$R_{\text{ест}} = \frac{1}{2}(R_S + R_P) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} + \frac{\text{tg}^2(i - r)}{\text{tg}^2(i + r)} \right] - \text{коэффициент отраже-}$$

ния естественного света. i - угол падения света на поверхность диэлектрика, r - угол преломления.

$$R_{\text{ест}} = \frac{(n_{21} - 1)^2}{(n_{21} + 1)^2} - \text{коэффициент отражения естественного света при нор-}$$

мальном падении света на поверхность диэлектрика.

Закон Брюстера: $\text{tg } i_B = n_{21}$, $i_B + r = \pi/2$.

Угол поворота плоскости поляризации (плоскости колебания вектора \vec{E}) света в оптически активных кристаллах: $\varphi = \alpha d$,
где α - удельное вращение, d - толщина слоя кристалла.

Угол поворота плоскости поляризации в растворах: $\varphi = \alpha C d$,
где C - концентрация оптически активного вещества в растворе.

Угол поворота плоскости поляризации при прохождении света через оптически неактивное вещество, находящееся в однородном магнитном поле индукции B :

$$\varphi = V d B,$$

где V - постоянная Верде, d - толщина слоя магнитного поля.

Степень поляризации определяется отношением интенсивности поляризованного света к общей интенсивности света. Для *отраженного* света $\delta = \frac{|I_S - I_P|}{I_S + I_P}$; для проходящего света $\delta' = \frac{|I_S' - I_P'|}{I_S' + I_P'}$, где I_S, I_S' - интенсивности в отраженном и проходящем свете для S-колебаний; I_P, I_P' - интенсивности в отраженном и проходящем свете для P-колебаний.

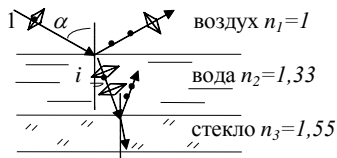
Примеры решения задач.

Задача 1. Под каким углом должен падать пучок света из воздуха ($n_1=1$) на поверхность жидкости ($n_2=1,33$), чтобы при отражении от дна стеклянного сосуда ($n_3=1,5$), наполненного водой, свет был полностью поляризован?

Дано: $n_1=1, n_2=1,33, n_3=1,5$

Найти: α - ?

На границу воздух-вода падает естественный свет под углом α . Здесь он частично отражается (луч 2) и частично преломляется (луч 3). Лучи 2 и 3 - оба частично поляризованы (в отраженном преобладают S-колебания, в проходящем - P-колебания). На границе вода-стекло вновь вновь происходит отражение и преломление. При этом отраженный свет полностью поляризован (содержит только S-колебания). А это означает, что угол падения i удовлетворяет закону Брюстера



$$\operatorname{tg} i = \frac{n_3}{n_2}; \quad \operatorname{tg} i = 1,5/1,33 = 1,12, \quad i = 48,44^\circ.$$

По закону преломления для границы воздух-вода :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin i} = \frac{n_2}{n_1} = n_2, \text{ т.к. } n_1=1.$$

$$\sin \alpha = n_2 \sin i \cdot \sin i = 0,748, \quad \sin \alpha = 1,330,748 = 0,995. \quad \alpha = 84^\circ.$$

Ответ: $\alpha = 84^\circ$.

Задача 2. Главные плоскости двух призм Николя образуют между собой угол в 30° . Как изменится интенсивность прошедшего света, если главные плоскости двух николей поставить под углом 45° . Чему равен угол между главными плоскостями двух николей, если после прохождения через них света его интенсивность уменьшилась в 4 раза?

Дано: $\varphi_1 = 30^\circ, \varphi_2 = 45^\circ, I_{\text{ест}} = 4I_2$

Найти: $I_2'/I_2 - ? \quad \varphi - ?$

Решение. При прохождении света через систему поляризатор–анализатор интенсивность света меняется по закону

$$\text{Малюса } I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi.$$

Тогда $\frac{I_2'}{I_2} = \frac{I_1 \cos^2 \varphi_2}{I_1 \cos^2 \varphi_1} = \frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1} = 2$, т.е. $I_2' = 2I_2$. В третьем случае

$$I_2 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi. \quad \text{Учтем, что по условию } I_{\text{ест}} = 4I_2: \quad I_2 = \frac{1}{2} 4I_2 \cos^2 \varphi. \quad \text{От-}$$

сюда $\cos^2 \varphi = \frac{1}{2}, \quad \cos \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2}; \quad \varphi = 45^\circ$. **Ответы:** $\frac{I_2'}{I_2} = 2, \quad \varphi = 45^\circ$.

Задача 3. Естественный свет падает на стекло ($n=1,54$), под углом полной поляризации. Пренебрегая потерями света, определите: а) коэффициент отражения; б) степень поляризации отраженных лучей и лучей, прошедших в стекло.

Дано: $n=1,54, i=i_B$

Найти: $R - ? \quad \delta - ? \quad \delta' - ?$

Решение. Коэффициент отражения можно определить, пользуясь формулами Френеля. Тогда

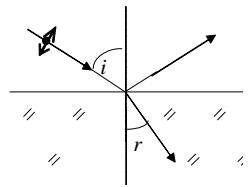
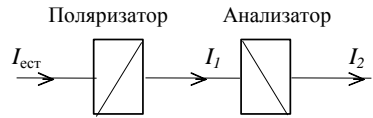
$$R_{\text{ест}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\text{tg}^2(i-r)}{\text{tg}^2(i+r)} \right].$$

По условию $i=i_B$, т.е. угол полной поляризации, следовательно, угол падения удовлетворяет условию

$$i+r = \frac{\pi}{2}: \quad \text{tg}^2(i+r) \rightarrow \infty, \quad \sin^2(i+r) = 1, \quad \text{а } R_{\text{ест}} = \frac{1}{2} \sin^2(i_B - r).$$

По закону Брюстера $\text{tg } i_B = n = 1,54, \quad i_B = 57^\circ$.

$$r = \frac{\pi}{2} - 57^\circ = 33^\circ. \quad R_{\text{ест}} = \frac{1}{2} \sin^2 24^\circ = 0,083 \quad (8,3\%)$$



Степень поляризации отраженных лучей $\delta = \frac{|I_S - I_P|}{I_S + I_P}$, но

$I_P = \frac{1}{2}IR_P = 0$, т.к. $R_P = 0$. Поэтому $\delta = \frac{I_S}{I_S} = 1$ (100%). Степень поля-

ризации лучей, прошедших стекло $\delta = \frac{|I_S' - I_P'|}{I_S' + I_P'}$, где

$|I_S' - I_P'| = 0,083I$; т.к. $I_S' = 0,417I$, а $I_P' = 0,5I$, то $I_S' + I_P' = 0,917I$,

$$\delta = \frac{0,083}{0,917} = 0,091 = 9,1\% .$$

Задачи для самостоятельной работы.

5.1. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен 45° . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

5.2. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были бы наиболее полно поляризованы?

5.3. Чему равен показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления 30° ?

5.4. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза ($n=2,42$), погруженного в воду. При каком угле падения отраженный свет полностью поляризован?

5.5. Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ($n=1,5$) сосуд, и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при падении его на дно сосуда под углом $42^\circ 37'$. Найти: 1) показатель преломления жидкости, 2) под каким углом должен падать на дно сосуда луч света, идущий в этой жидкости, чтобы наступило полное внутреннее отражение.

5.6. Пучок плоскополяризованного света, длина волны которого в пустоте равна 589 нм, падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно его оптической оси. Найти длины волн обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле, если показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и для необыкновенного лучей равны соответственно $n_o=1,66$ и $n_e=1,49$.

5.7. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивности естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшается в четыре раза? Поглощением света пренебречь.

5.8. Луч естественного света проходит сквозь плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n=1,54$), падая на нее под углом полной поляризации. Найти степень поляризации лучей, прошедших сквозь пластинку.

5.9. Определить: 1) коэффициент отражения и степень поляризации отраженных лучей при падении естественного света на стекло ($n=1,5$) под углом 45° .

5.10. Пластинка кварца толщиной $h=1$ мм, вырезанная перпендикулярно к оптической оси и помещенная между двумя параллельными николями, поворачивает плоскость поляризации на угол $\alpha=20^\circ$. При какой толщине кварцевой пластинки свет этой же длины волны не будет выходить из второго николя?

5.11. Какой толщины пластинку кварца нужно поместить между скрещенными николями, чтобы поле зрения стало максимально светлым? Опыт производится в монохроматическом свете ($\lambda=500$ нм). Удельное вращение кварца для этой длины волны $29,7^\circ$ на 1 мм.

5.12. Какова концентрация сахара в растворе, если угол поворота плоскости поляризации желтого света при прохождении его через трубку с раствором сахара равен 20° ? Длина трубки 15 см. Удельное вращение сахара равно $66,5^\circ \text{ дм}^{-1}$ при концентрации 1 г/см^3 .