

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Л. Н. Лукашевич, Л. К. Катанова, О. В. Садырева

ОПТИКА  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВСЕХ НАПРАВЛЕНИЙ

ЕКАТЕРИНБУРГ, 1999



УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

ОДОБРЕНО

Методической комиссией  
геофизического факультета

“ “\_\_\_\_\_ 1999 г.

Председатель комиссии

\_\_\_\_\_ проф. И. Г. Сквородников

ОПТИКА  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВСЕХ НАПРАВЛЕНИЙ

Оптика: Учебно-методическое пособие к решению задач по физике для студентов всех направлений / Л. Н. Лукашевич, Л. К. Катанова, О. В. Садырева; Уральская госуд. горно-геол. академия, каф. физики, - Екатеринбург: изд. УГГГА, 1999. - 54 с.

В пособии приведены примеры решения задач по различным разделам оптики и задачи для самостоятельного решения. Оно состоит из трех разделов: геометрическая, волновая и квантовая оптика. В комментариях к задачам разъясняется, как физические закономерности проявляются в различных оптических приборах: теодолитах, интерферометрах, поляризационных микроскопах, фотодатчиках и др.

Пособие предназначено для преподавателей кафедры физики и студентов. Обозначения величин соответствуют общепринятым.

Методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры физики 6 апреля 1999 года (протокол № 6) и рекомендовано для издания в УГГГА.

Рецензент: С. А. Игумнов, доц., канд. геол.-минерал. наук

Авторы: Л. Н. Лукашевич, ст. преподаватель  
Л. К. Катанова, доц., канд. физ.-мат. наук  
О. В. Садырева, ассистент

© Уральская государственная  
горно-геологическая  
академия, 1999

## СОДЕРЖАНИЕ

	с.
1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА И ФОТОМЕТРИЯ	3
<i>Примеры решения задач</i>	3
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	12
2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	15
<i>Примеры решения задач</i>	15
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	31
3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА	37
<i>Примеры решения задач</i>	37
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	48
Список использованной литературы	52

Корректурa кафедры физики

Подписано к печати 1999 г

Формат бумаги 60 x 84 1/16

Печ. л. 3,4. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена С.

---

Лаб. множительной техники УГГГА  
620144, Екатеринбург, Куйбышева, 30



# 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА И ФОТОМЕТРИЯ

## Примеры решения задач

1.1 /1, 2/

При геологической разведке для визуальных наблюдений водолаз опускается на дно водоема глубиной 15 м. На каком расстоянии от водолаза находятся те участки дна, изображение которых он может видеть в результате отражения лучей от поверхности воды? Показатель преломления воды 1,33. Высотой водолаза пренебречь.

$H = 15 \text{ м}$
$n_1 = 1,33$
$n_2 = 1$
СА - ?

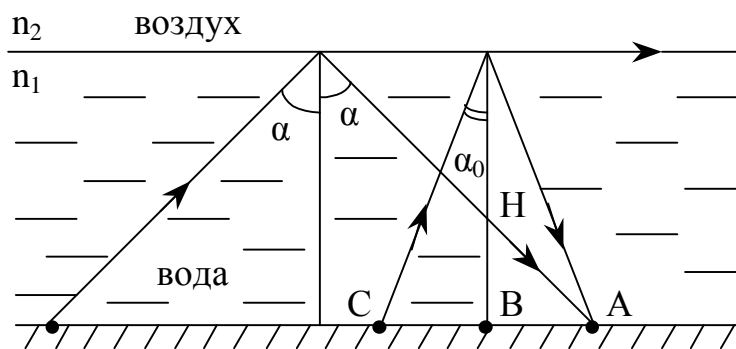


Рис. 1.1

### Решение

В результате полного внутреннего отражения от поверхности воды водолаз, находящийся на дне водоема в точке А (рис. 1.1), сможет увидеть изображение тех участков дна, от которых лучи приходят на границу раздела вода-воздух под углом падения, большим предельного  $\alpha_0$ . Предельным называется такой угол падения луча, при котором преломленный луч не проходит во вторую среду, а скользит по границе раздела двух сред.

Из рис. 1.1 видно, что

$$CA = 2 CB = 2 H \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Применив закон преломления света для границы раздела вода-воздух

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1},$$

найдем  $\sin \alpha_0 = \frac{1}{1,33} = 0,752$ ,  $\alpha_0 = 48^\circ 48'$  и  $\operatorname{tg} 48^\circ 48' = 1,14$ .

Искомое расстояние

$$AC = 2 \cdot 15 \cdot 1,14 \text{ м} = 34 \text{ м}.$$

Водолаз увидит в результате отражения лучей от поверхности воды участки дна, расположенные от него на расстоянии более 34 м, так как от них лучи падают на поверхность воды под углом, большим предельного.

Водолазные работы проводятся при инженерных изысканиях (морской геофизической и геологической разведках), а также при эксплуатации подводных сооружений и оборудования по добыче нефти и газа, при контроле состояния подводных конструкций. Водолазные работы проводятся при кино-, фото- и телесъемках, визуальных наблюдениях, строительстве подводных сооружений (оснований и фундаментов), при прокладке трубопроводов и кабелей и т. п.

1.2 / 3, 4/

Оптический волоконный световод выполнен из прозрачного материала с показателем преломления 1,5. С поверхности он покрыт оболочкой с показателем преломления 1,41. Определить максимальный угол  $\beta$  к оси световода, под которым световой луч еще может падать на торец, чтобы пройти световод без ослабления.

$n_1 = 1,5$
$n_2 = 1,41$
$n_B = 1$
$\beta - ?$

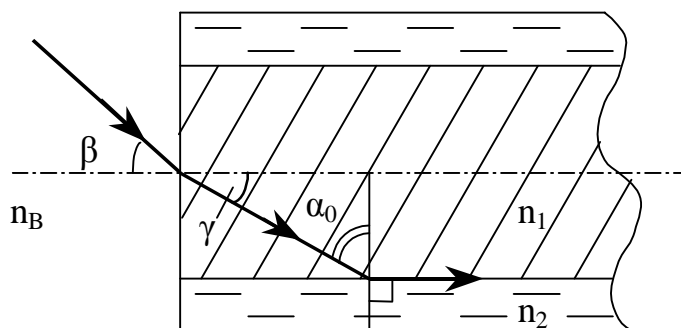


Рис. 1.2



## Решение

Распространение излучения по световоду осуществляется за счет полного внутреннего отражения на границе раздела сердцевина – оболочка (рис. 1.2). Согласно закону преломления света для случая скольжения луча по границе раздела этих сред,

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1},$$

находим  $\sin \alpha_0 = \frac{1,41}{1,5} = 0,94$  и  $\alpha_0 = 70^\circ$ .

Для определения угла  $\beta$ , при котором все излучение пойдет по световоду, применим закон преломления света для границы раздела сред воздух – стекло на торце световода

$$\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Учитывая, что  $\gamma = (90^\circ - \alpha_0)$ , можно определить  $\sin \beta = 1,5 \cdot \sin 20^\circ = 1,5 \cdot 0,342 = 0,513$  и  $\beta = 30^\circ 50'$ .

Большой интерес представляет использование световолоконной оптики для скважинных наблюдений. Круговое изображение стенок скважины через серию объективов подается на торцы волокон. Они передают на поверхность цветное изображение, четкость которого зависит от числа волокон. Так как по световолоконным линиям передаются не электрические, а световые сигналы, такие провода не искрят. Это открывает широкие перспективы для использования в химической, угольной, нефтеперерабатывающей промышленности.

1.3 / 1,5/

При исследовании оптических свойств минералов был применен микроскоп, у которого фокусное расстояние объектива равно 5 мм, а

окуляра 2 см. Расстояние от объектива до окуляра 16 см. Какое увеличение имеет такой микроскоп?

$$F_{\text{ОБ}} = 0,005 \text{ м}$$

$$F_{\text{ОК}} = 0,02 \text{ м}$$

$$l = 0,16 \text{ м}$$

К - ?

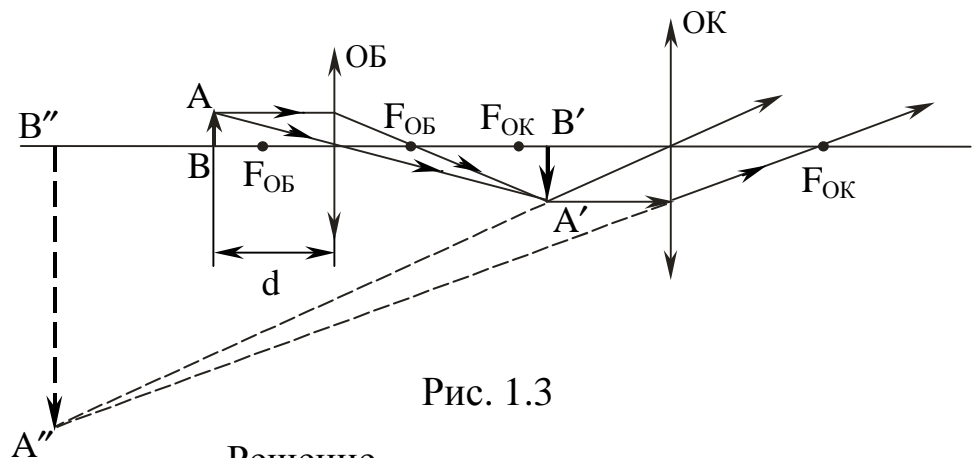


Рис. 1.3

Решение

Увеличение микроскопа (рис. 1.3)

$$K = K_{\text{ОБ}} \cdot K_{\text{ОК}}.$$

Увеличение объектива

$$K_{\text{ОБ}} = \frac{f}{d} \approx \frac{l - F_{\text{ОК}}}{F_{\text{ОБ}}},$$

где  $f$  - расстояние от объектива до изображения,

$d$  - расстояние от объектива до предмета.

Окуляр микроскопа является лупой, его увеличение

$$K_{\text{ОК}} = \frac{L}{F_{\text{ОК}}},$$

где  $L$  - расстояние наилучшего зрения, принимаемое равным 0,25 м.

Подставляя числовые данные в расчетную формулу

$$K = \frac{l - F_{\text{ОК}}}{F_{\text{ОБ}}} \cdot \frac{L}{F_{\text{ОК}}},$$

получим

$$K = \frac{0,14 \cdot 0,25}{0,005 \cdot 0,02} = 350.$$

С помощью оптического микроскопа можно исследовать морфологию и оптические свойства минералов. По изготовленным шлифам изучают деформацию текстуры горных пород, кристаллическую структуру минералов. Оптический микроскоп стал стандартным инструментом в кристаллографии, минералогии, петрографии, геофизике и палеонтологии. Увеличение линзовых микроскопов не более 3000.

1.4 /1, 6/

В трубу угломерного прибора (теодолита) рассматривали отдаленные предметы на линии горизонта. На какое расстояние нужно передвинуть окуляр, чтобы отчетливо видеть предметы на расстоянии 50 м, если объектив зрительной трубы состоит из двух сложенных вплотную линз: собирающей ( $F_1 = 1$  м) и рассеивающей ( $F_2 = -3$  м)? Фокусное расстояние окуляра 25 мм. Чему равно увеличение трубы?

$d = 50$  м  
 $F_1 = 1$  м  
 $F_2 = -3$  м  
 $F_{\text{ОК}} = 0,025$  м  
 $K - ?$   
 $(f - F_{\text{ОБ}}) - ?$

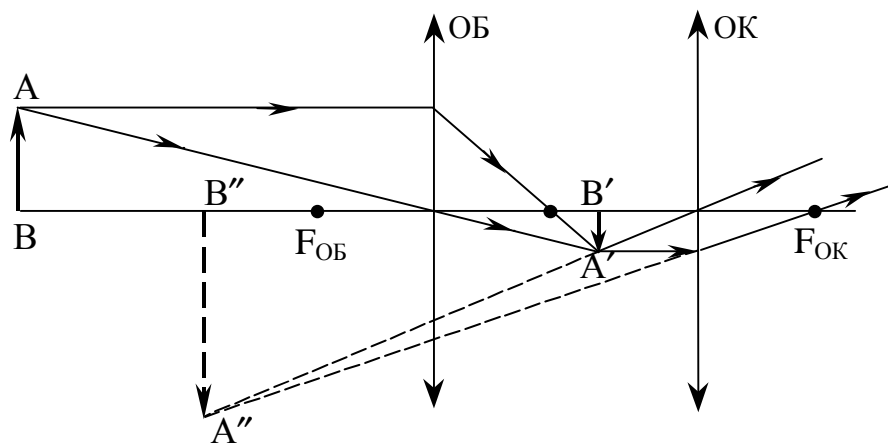


Рис. 1.4

Решение

Строим ход лучей в зрительной трубе (рис. 1.4). Фокусы объектива и окуляра в трубе совпадают.

Увеличение зрительной трубы

$$K = \frac{F_{\text{ОБ}}}{F_{\text{ОК}}}$$

Объектив состоит из двух линз, оптическая сила системы линз

$$D_{\text{ОБ}} = \frac{1}{F_{\text{ОБ}}} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2},$$

откуда

$$F_{\text{ОБ}} = \frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{1 \cdot (-3)}{1 - 3} \text{ м} = 1,5 \text{ м}.$$

Найдем увеличение зрительной трубы

$$K = \frac{1,5}{0,025} = 60.$$

Воспользовавшись формулой тонкой линзы

$$\frac{1}{F_{\text{ОБ}}} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

определим расстояние от объектива до изображения

$$f = \frac{F_{\text{ОБ}} \cdot d}{d - F_{\text{ОБ}}} = \frac{1,5 \cdot 50}{50 - 1,5} \text{ м} = 1,55 \text{ м}.$$

Вращая окуляр, нужно переместить его от объектива на расстояние

$$f - F_{\text{ОБ}} = (1,55 - 1,50) \text{ м} = 0,05 \text{ м}.$$

Увеличение зрительных труб в маркшейдерско-геодезических инструментах не превышает 40 – 60 раз, что обусловлено атмосферными условиями. Теодолиты широко используются при различного рода инженерно-геодезических изысканиях: строительных, геологических, гидромелиоративных и др. С помощью теодолитов проводят наблюдения за деформациями построенных сооружений.

Определить освещенность, создаваемую светильником силой света  $2 \cdot 10^4$  кд по периметру забоя ствола шахты диаметром 8 м, если высота подвеса светильника 20 м (рис. 1.5).

$I = 2 \cdot 10^4$ кд
$d = 8$ м
$H = 20$ м
$E_A - ?$

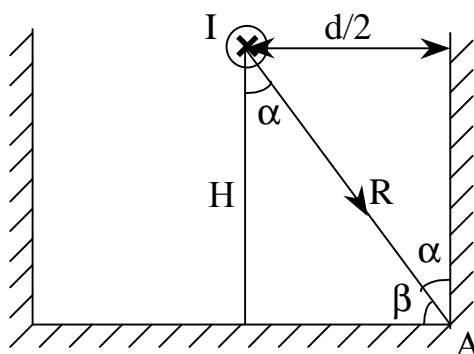


Рис. 1.5

## Решение

Выполнение различного рода работ требует определенной освещенности. При бурении, креплении, погрузке и других работах в выработках освещенность должна составлять 20 – 40 лк, в машинных камерах 50 – 70 лк.

Расчет освещенности может производиться точечным методом, методами светового потока и удельной мощности.

При точечном методе расчета используют формулу зависимости освещенности от силы светильника, расстояния  $R$  от источника света до точки, в которой определяется освещенность, и от угла падения лучей на освещаемую поверхность.

$$E = \frac{I \cos \alpha}{R^2}.$$

Учитывая, что

$$R = \frac{H}{\cos \alpha},$$

а

$$\cos \alpha = \frac{H}{\sqrt{H^2 + d^2/4}}$$

и его значение близко к единице, найдем освещенность в точке А, считая ее принадлежащей к горизонтальной плоскости.

$$E_{\text{ГОР}}^A = \frac{I \cos^3 \alpha}{H^2} = \frac{2 \cdot 10^4}{400} \text{ лк} = 50 \text{ лк.}$$

Если считать точку А принадлежащей к вертикальной плоскости, то после ряда преобразований

$$E_{\text{ВЕРТ}}^A = \frac{I \cdot \cos \beta}{R^2} = \frac{I \cdot \sin \alpha}{R^2} = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{H^2} = E_{\text{ГОР}}^A \cdot \text{tg } \alpha.$$

окончательно получим

$$E_{\text{ВЕРТ}}^A = E_{\text{ГОР}}^A \cdot \frac{d}{2H} = \frac{50 \cdot 8}{2 \cdot 20} \text{ лк} = 10 \text{ лк.}$$

Такая освещенность недостаточна для монтажа приборов на вертикальной стенке.

Точечный метод расчета освещенности применяется для расчета освещения помещений с низкими коэффициентами отражения (откатных штреков, забоев, околоствольных и других выработок).

Метод светового потока применяется при расчете освещенности в камерах подземных электроподстанций, водоотлива, выработках рудничного двора и др.

Световой поток, необходимый для освещения всей рабочей поверхности S, определяется по формуле

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K}{\eta},$$

где E – минимальная освещенность (берется из таблиц);

K – коэффициент запаса, учитывающий износ ламп, запыленность помещения и пр.;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока лампы.

Для ориентировочных расчетов иногда пользуются методом удельной мощности – мощности, потребляемой для освещения 1 м<sup>2</sup> площади.

Прожектор для освещения карьера дает пучок света в виде усеченного конуса с углом раствора  $40^\circ$ , сила света  $2,5 \cdot 10^4$  кд. Определить световой поток прожектора, считая его равномерно распределенным внутри конуса (рис. 1.6).

$$\alpha = 40^\circ$$

$$I = 2,5 \cdot 10^4 \text{ кд}$$

$$\Phi - ?$$

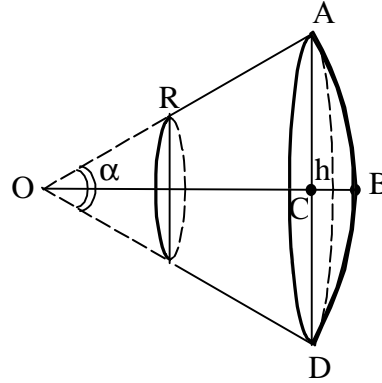


Рис. 1.6

### Решение

Продолжим боковую поверхность конуса до вершины, которую поместим в центре сферы произвольного радиуса  $R$ . Пересекаясь со сферой, боковая поверхность конуса вырезает на ней сегментную поверхность, площадь которой

$$S = 2\pi R h$$

Высота сегмента

$$h = CB = OB - OC = R(1 - \cos(\alpha/2)) = R \cdot 2 \sin^2(\alpha/4).$$

Величина телесного угла

$$\omega = \frac{S}{R^2} = \frac{2\pi R h}{R^2} = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{4}.$$

Световой поток прожектора

$$\Phi = I \cdot \omega = I \cdot 4\pi \sin^2(\alpha/4).$$

$$\Phi = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (0,1736)^2 \text{ лм} = 9,5 \cdot 10^3 \text{ лм}.$$

При помощи прожекторов производится наружное освещение территории рудников, открытых площадок, складов, подземных путей и т.п.

### *Задачи для самостоятельного решения*

#### 1.1. Геометрическая оптика

401. Радиус кривизны вогнутого зеркала 40 см. Найти положение объекта, при котором изображение действительное и увеличенное в два раза. /30 см/

402. Радиус кривизны выпуклого зеркала 50 см. Предмет высотой 15 см находится на расстоянии 1 м от зеркала. Определить расстояние до изображения и его высоту. /-20 см; 3 см/

403. Фокусное расстояние линзы в воздухе 8 см. Чему оно будет равно, если линзу погрузить в сероуглерод? Показатели преломления стекла 1,5, сероуглерода 1,63. /-50 см/

404. Расстояние от предмета до рассеивающей линзы равно фокусному расстоянию линзы. Определить расстояние от изображения до линзы и отношение высоты изображения к высоте предмета. /-0,5 F; 0,5/

405. Плосковыпуклая линза дает на экране изображение предмета, увеличенное в три раза. Расстояние от линзы до экрана равно 80 см. Определить радиус кривизны выпуклой поверхности линзы. Показатель преломления стекла 1,5. /10 см/

406. Собирающая и рассеивающая линзы сложены вплотную. Расстояние от системы линз до предмета равно 45 см, а расстояние до изображения 90 см. Определить фокусное расстояние рассеивающей линзы, если фокусное расстояние собирающей линзы равно 20 см. /-60 см/

407. Изображение предмета, находящегося на расстоянии 10 см от собирающей линзы, прямое и увеличенное в два раза. Определить фокусное расстояние линзы. /20 см/



408. Две собирающие линзы с фокусными расстояниями, равными 25 см и 15 см, сложены вплотную. Какое увеличение дает такая система линз, если ее использовать как лупу? Предполагается, что человек, пользующийся этой лупой, имеет нормальное зрение. /2,7/

409. Главное фокусное расстояние объектива микроскопа 2 мм, окуляра 40 мм. Оптическая длина трубы микроскопа равна 18 см. Найти увеличение, даваемое микроскопом для нормального глаза? /562/

410. Объектив телескопа состоит из сложенных вплотную линз: собирающей ( $F_1 = 1 \text{ м}$ ) и рассеивающей ( $F_2 = -4 \text{ м}$ ). Фокусное расстояние окуляра 26,6 мм. Какое увеличение дает телескоп? /50/

## 1.2. Фотометрия

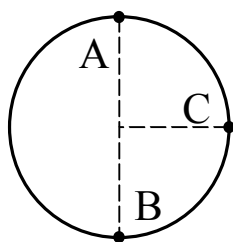
411. В узкоплёночном киноаппарате находится лампа силой света 400 кд. Какую освещенность она создает на экране площадью  $3 \text{ м}^2$ , если на экран падает 0,3% всего светового потока, создаваемого лампой? /5 лк/

412. При печатании фотоснимка негатив освещается в течение 3 с лампочкой с силой света 60 кд с расстояния 2 м. Какова должна быть продолжительность освещения, если взять лампу в 10 кд и поместить ее на расстоянии 50 см от негатива? /1,12 с/

413. Источник, сила света которого 200 кд, подвешен на мачте высотой 5 м. На каком расстоянии от основания мачты освещенность горизонтальной поверхности будет равна 2 лк? /6,2 м/

414. На каком расстоянии необходимо ставить мачты для уличных фонарей, чтобы освещенность в точке, лежащей на земле посередине расстояния между мачтами, была не менее  $4/15 \text{ лк}$ ? Высота мачты 12 м. Сила света ламп 300 кд. Считать, что освещенность создают только два ближайших фонаря. /55 м/

415. Во время монтажных работ в тоннеле метро укрепили све-



тильник в верхней точке свода А. Каково будет соотношение освещенностей, создаваемых светильником в точке В и в точке С? Сила света светильника по всем направлениям одинакова.

$$/ E_C = \sqrt{2} E_B /$$

416. На некотором расстоянии от точечного источника света помещен экран. Во сколько раз увеличится освещенность экрана, если параллельно экрану по другую сторону от источника на таком же расстоянии от него поставить плоское зеркало? /1,1/

417. Две лампы в 25 кд и 16 кд находятся друг от друга на расстоянии 180 см. На каком расстоянии от первой лампы нужно поместить фотометрический экран, чтобы его освещенность была одинакова с той и другой стороны? /1 м/

418. Проектор ближнего освещения дает пучок света в виде усеченного конуса с углом раствора  $40^\circ$ . Световой поток прожектора равен  $8 \cdot 10^4$  лм. Считая, что световой поток внутри конуса распределен равномерно, определить силу света прожектора.

$$/2,1 \cdot 10^5 \text{ кд}/$$

419. Над поверхностью круглого стола диаметром  $d$  висит на высоте  $H$  лампа силой света  $I$ . Найти среднюю освещенность стола.

$$/ E_{\text{ср}} = \frac{8I}{d^2} \left( 1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + d^2/4}} \right) /$$

420. Над центром круглого стола радиусом 80 см на высоте 60 см висит лампа силой света 100 кд. Определить освещенность в центре и на краю стола, среднюю освещенность стола и световой поток, падающий на него.

$$/278 \text{ лк}; 60 \text{ лк}; 125 \text{ лк}; 253 \text{ лм}/$$

## 2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### Примеры решения задач

2.1 /9, 10/

Пучок лазерного излучения с длиной волны 632,8 нм падает по нормали на преграду с двумя щелями, расстояние между которыми мало. Если одну из щелей перекрыть прозрачной пластинкой, изготовленной из топаза с показателем преломления 1,63, то картина на экране смещается на 10 полос. Определить толщину пластинки (рис. 2.1).

$$\begin{array}{l} \lambda = 632,8 \cdot 10^{-9} \text{ м} \\ n = 1,63 \\ \Delta k = 10 \\ a - ? \end{array}$$

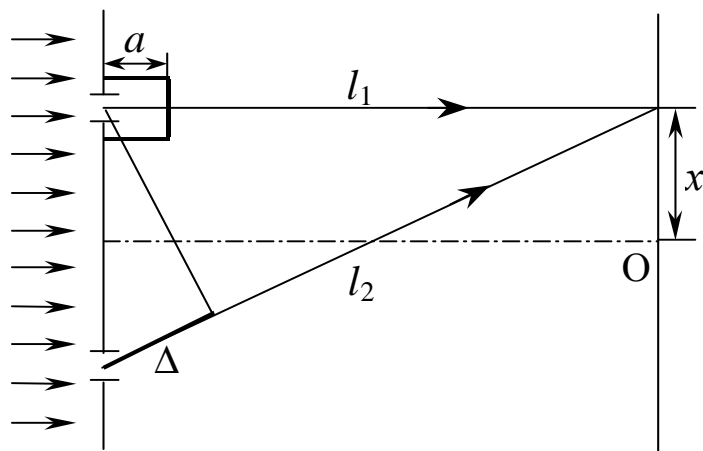


Рис. 2.1

### Решение

Интерференционная картина, создаваемая в методе Юнга на экране двумя когерентными источниками (щелями), представляет собой чередование светлых и темных полос, параллельных друг другу. На рис. 2.1  $x$  – координата  $k$ -ой полосы. Результат интерференции в какой-либо точке экрана определяется оптической разностью хода лучей, приходящих от источников в эту точку.

$$\Delta_1 = l_2 - l_1.$$

В воздухе оптическая разность хода равна геометрической разности хода лучей.

Если на пути первого луча поставить пластинку, то его оптический путь станет

$$l_1' = l_1 - a + na,$$

а оптическая разность хода

$$\Delta_2 = l_2 - l_1' = l_2 - l_1 + a - na.$$

Значит, пластинка изменила оптическую разность хода на величину

$$\Delta_1 - \Delta_2 = a(n - 1),$$

что привело к смещению картины на 10 полос

$$a(n - 1) = \Delta k \lambda.$$

Отсюда толщина пластинки

$$a = \frac{\Delta k \lambda}{n - 1} = \frac{10 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9}}{1,63 - 1} \text{ м} = 10 \text{ мкм.}$$

Метод Юнга используется в интерферометрах для определения с очень большой точностью как линейных размеров тел, так и для измерения показателей преломления прозрачных веществ.

Применение излучения лазеров – оптических квантовых генераторов – значительно расширило возможности интерферометров.

Лазерный интерферометр с внешним подвижным зеркалом может быть применен при изучении горного давления, явлений, связанных с начальной стадией развития выбросов горной породы и газа, горных ударов, прорывов воды, плывунов, дегазации угольных месторождений. Перспективно применение такого интерферометра при изучении различных свойств горных пород в лабораторных условиях.

Интерференционный метод Юнга лежит в основе действия шахтного интерферометра – прибора, позволяющего непосредственно в шахте измерять процентное содержание газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в воздухе. Смещение интерференционных полос зависит от разности показателей преломления чистого воздуха и шахтного с примесью газов. Примеси изменяют показатель преломления воздуха в пятом-седьмом знаках, и интерферометр позволяет обнаружить такое изменение.

На тонкую пленку с показателем преломления 1,33 падает параллельный пучок белого света. Угол падения  $30^\circ$ . При какой минимальной толщине пленки в отраженном свете она будет окрашена в желтый цвет ( $\lambda = 0,6$  мкм)?

$$n = 1,33$$

$$i = 30^\circ$$

$$\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$d_{\min} - ?$$

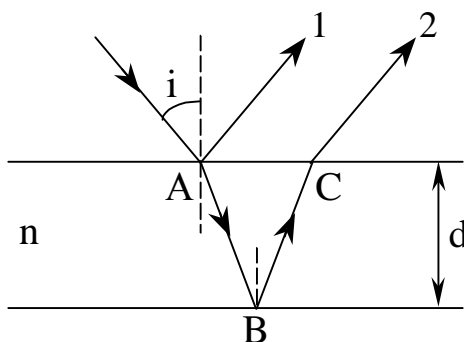


Рис. 2.2

## Решение

Как известно, условие усиления света при интерференции в тонких пленках состоит в том, что оптическая разность хода когерентных лучей 1 и 2 (рис. 2.2) должна быть равна целому числу длин волн (или четному числу полуволен)

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

где  $k$  - порядок максимума ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );

$\lambda/2$  - потеря полуволены за счет изменения фазы волны на  $\pm\pi$  при отражении от более плотной среды ( $\lambda/2$  можно брать с любым знаком).

Отсюда

$$d = \frac{k\lambda - \lambda/2}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Наименьшая толщина пленки (при  $k = 1$ )

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} = \frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{4\sqrt{1,77 - 0,25}} \text{ м} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

В природе часто можно наблюдать радужное окрашивание тонких пленок (мыльных пузырей, масляных пленок на воде, оксидных пленок на металлах), возникающее в результате интерференции света, отраженного двумя поверхностями пленки, имеющей разную толщину.

Этот метод интерференции находит практическое применение при термической обработке инструментов на заводах. Для повышения прочности горных инструментов, применяемых для бурения, отбойки, погружки угля и породы, возведения крепи и др., используют закалку и отпуск в области температур 200 - 300°C. При отпуске на поверхности инструментов появляются цвета побежалости, обусловленные интерференцией света в тонком окисном слое, которые позволяют оценивать температуру на глаз.

### 2.3 /13, 14/

При освещении кварцевого клина монохроматическими лучами ( $\lambda = 600 \text{ нм}$ ), перпендикулярными к его поверхности, наблюдаются в отраженном свете интерференционные полосы, ширина которых 8,1 мм. Показатель преломления кварца 1,54. Определить преломляющий угол клина (рис. 2.3).

$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
$x = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
$n = 1,54$
$\alpha - ?$

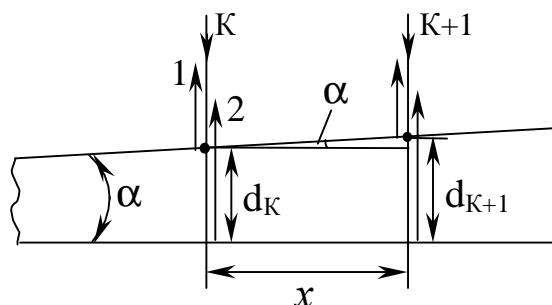


Рис.2.3

#### Решение

Параллельный пучок лучей, отражаясь от верхней и нижней грани клина, интерферирует, образуя устойчивую картину в виде системы темных и светлых полос одинаковой толщины. Так как угол клина мал, то лучи, отраженные от верхней и нижней граней, можно считать параллельными. Светлые полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна четному числу полуволн или целому числу длин волн.

$$2d_k n + \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

где  $d_k$  - толщина клина в месте образования светлой полосы, соответствующей номеру  $k$ ;

$\lambda/2$  - добавочная разность хода, возникающая при отражении от оптически более плотной среды, то есть от верхней грани клина.

Для соседней светлой полосы с номером  $(k + 1)$ , которой соответствует толщина клина  $d_{k+1}$ , можно записать

$$2d_{k+1} n + \frac{\lambda}{2} = (k + 1)\lambda.$$

Вычитая из последнего уравнения предыдущее, найдем, что

$$d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2n}.$$

Из рис. 2.3 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d_{k+1} - d_k}{x} = \frac{\lambda}{2nx}.$$

Вследствие малости угла

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha = \frac{\lambda}{2nx}.$$

Подставив данные, получим

$$\alpha = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 1,54 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ рад} = 5''.$$

Кварц благодаря высокой прозрачности широко используется для изготовления всевозможных деталей оптических приборов (кварцевые призмы, линзы, лампы и т. д.).

Интерференция в клине используется для измерения малых углов или длины волны света.

Плосковыпуклая линза ( $n = 1,6$ ) выпуклой стороной прижата к стеклянной пластинке. Расстояние между первыми двумя кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно  $0,5$  мм. Определить оптическую силу линзы, если освещение производится монохроматическим светом с длиной волны  $550$  нм, падающим нормально.

$$n = 1,6$$

$$r_2 - r_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$D - ?$$

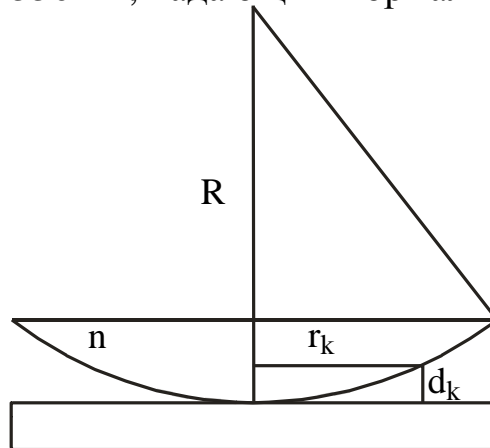


Рис. 2.4

## Решение

Оптическая сила линзы в общем случае

$$D = (n - 1)(1/R_1 + 1/R_2),$$

где  $n$  - показатель преломления линзы;

$R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны поверхностей линзы.

Оптическая сила плосковыпуклой линзы

$$D = (n - 1)/R.$$

Для определения радиуса кривизны линзы воспользуемся выражением для радиуса темного кольца Ньютона в отраженном свете:

$$r_k = \sqrt{k\lambda R} \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Разность радиусов первых двух темных колец

$$r_2 - r_1 = \sqrt{R\lambda}(\sqrt{2} - 1),$$



откуда

$$R = \frac{(r_2 - r_1)^2}{(\sqrt{2} - 1)^2 \lambda}.$$

тогда искомая оптическая сила линзы:

$$D = (n - 1) \frac{\lambda(\sqrt{2} - 1)^2}{(r_2 - r_1)^2}.$$

Подставив численные данные, получим

$$D = (1,6 - 1) \frac{5,5 \cdot 10^{-7} (1,4 - 1)^2}{(0,5 \cdot 10^{-3})^2} \text{ дптр} = 0,21 \text{ дптр}.$$

2.5 /16/

На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 600 \text{ нм}$ ). Определить ширину щели, если ширина центрального максимума в дифракционной картине, проектируемой на экран с помощью линзы, равна  $1,2 \text{ см}$ . Экран удален от линзы на  $1 \text{ м}$ .

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$l = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$L = 1 \text{ м}$$

$$a - ?$$

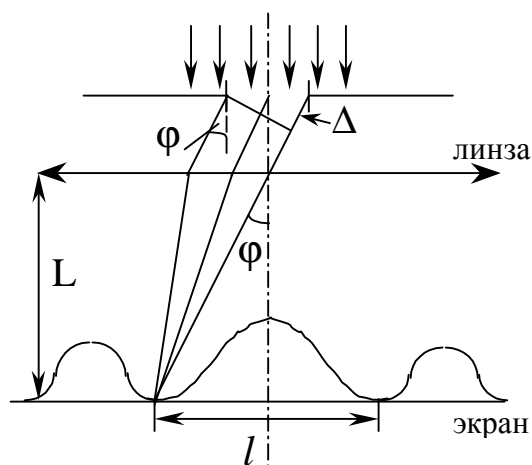


Рис. 2.5

## Решение

Изображенная на рис. 2.5 кривая показывает распределение интенсивности света на экране. Центральная светлая полоса (центральный максимум) заключена между двумя минимумами первого порядка. Ее ширина  $l$  зависит от угла дифракции  $\varphi$ , соответствующего первому минимуму.

Минимумы интенсивности света при дифракции от одной щели наблюдаются под углами  $\varphi$ , определяемыми условием

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda,$$

где  $k$  – порядок минимума (в нашем случае  $k = 1$ ).

При малых углах

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{2L}.$$

Ширина щели

$$a = \frac{k\lambda}{\sin \varphi} = \frac{k\lambda 2L}{l}.$$

Подставив данные, найдем

$$a = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 1}{1,2 \cdot 10^{-2}} \text{ м} = 0,1 \text{ мм}.$$

Получение и анализ спектров имеют большое значение в теоретической и прикладной оптике. Изучение спектров атомов и молекул различных химических соединений, в том числе и минералов, позволяет проводить спектральный анализ, то есть определять состав исследуемых тел.

Для увеличения интенсивности дифракционных максимумов и разрешающей силы спектральных приборов обычно используют не одну щель, а их совокупность, то есть дифракционную решетку.

Перед объективом фотокамеры установлена дифракционная решетка с периодом 0,002 мм. На решетку падает нормально пучок лучей белого света. Определить длину спектра первого порядка на фотоснимке, если фокусное расстояние объектива 20 см и пленка чувствительна к лучам с длиной волны от 310 до 680 нм.

$$F = 0,2 \text{ м}$$

$$\lambda_1 = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$k = 1$$

$$a + b = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\Delta l - ?$$

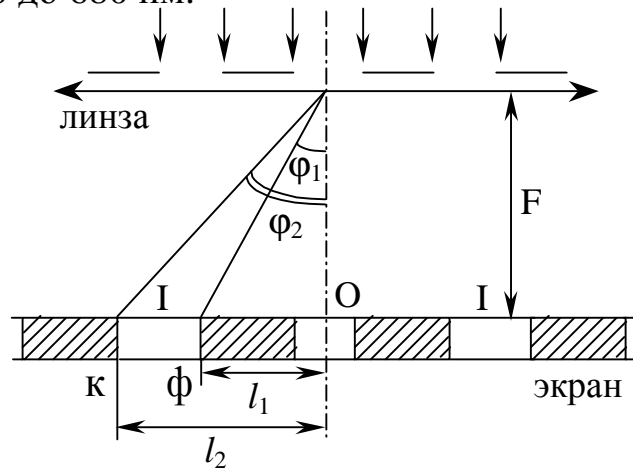


Рис. 2.6

### Решение

Так как на решетку падает белый свет, то все интерференционные максимумы, кроме центрального, разлагаются в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины, красная – наружу, то есть угол дифракции  $\varphi_1$  меньше угла дифракции  $\varphi_2$  (рис. 2.6).

Главные максимумы получаются при выполнении условия

$$(a + b) \sin \varphi = \pm k\lambda,$$

где  $(a + b)$  - период решетки;

$\varphi$  - угол дифракции;

$\lambda$  - длина волны;

$k$  - номер спектра.

Для фиолетового края спектра первого порядка

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda_1}{a + b},$$

для красного

$$\sin \varphi_2 = \frac{\lambda_2}{a + b},$$

Как видно из рисунка, длина спектра первого порядка

$$\Delta l = l_2 - l_1 = F \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 - F \cdot \operatorname{tg} \varphi_1.$$

Так как углы дифракции малы,  $\operatorname{tg} \varphi$  примерно равен  $\sin \varphi$ .

Расчетная формула запишется в виде

$$\Delta l = \frac{F}{a + b} (\lambda_2 - \lambda_1).$$

Производим вычисление

$$\Delta l = \frac{0,2 \cdot (6,8 - 3,1) \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-6}} \text{ м} = 0,037 \text{ м}.$$

Дифракция проявляется в нарушении прямолинейного распространения волн. Она имеет место при наличии локальных неоднородностей в среде. Такой неоднородностью может быть горная выработка, поверхность излома или разрыва пластов. Дифракцию волн необходимо учитывать при экранировании массива или инженерных сооружений от действия сейсмозрывных волн. Теория дифракции имеет большое значение в области геоакустики, сейсморазведки, геофизики.

2.7 /20-22/

Определить коэффициент преломления алмаза, если угол полной поляризации при отражении от него оказался равным  $67^\circ 30'$ . Показатель преломления воздуха равен 1 (рис. 2.7).

$$\begin{array}{|l} n_1 = 1 \\ i_0 = 67^\circ 30' \\ \hline n_2 = ? \end{array}$$

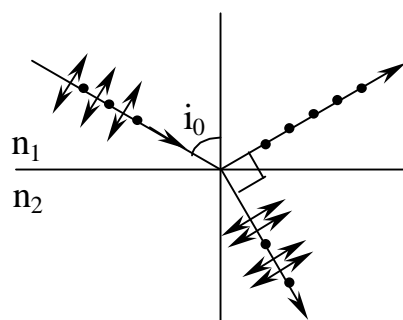


Рис. 2.7

### Решение

По закону Брюстера тангенс угла падения, при котором происходит полная поляризация отраженного луча, измеряется отношением показателя преломления второй среды к первой.

$$\operatorname{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_2$  – показатель преломления алмаза;  
 $n_1$  – показатель преломления воздуха.

$$\operatorname{tg} 67^\circ 30' = n_2 = 2,414.$$

Измерение угла полной поляризации света при отражении может служить простым методом определения показателя преломления прозрачных веществ, в том числе минералов и горных пород, часть из которых указана в таблице 1.

Таблица 1

### Коэффициенты преломления

Материал	n	Материал	n
Лед	1,310	Топаз	1,630
Флюорит	1,434	Гранат	1,735
Плавленый кварц	1,459	Сфалерит	2,370

Угол между плоскостями поляризации двух николей  $N_1$  и  $N_2$  в поляризационном микроскопе принимает значения 0, 30, 60, 90°. Опреде-

лить, во сколько раз уменьшится интенсивность  $I_0$  неполяризованного света при прохождении через один николю и через оба николя? Коэффициент поглощения света в николе 0,05. Потери на отражение света не учитывать.

$$\alpha_1 = 0^\circ$$

$$\alpha_2 = 30^\circ$$

$$\alpha_3 = 60^\circ$$

$$\alpha_4 = 90^\circ$$

$$k = 0,05$$

$$I_0/I_1 - ?$$

$$I_0/I_2 - ?$$

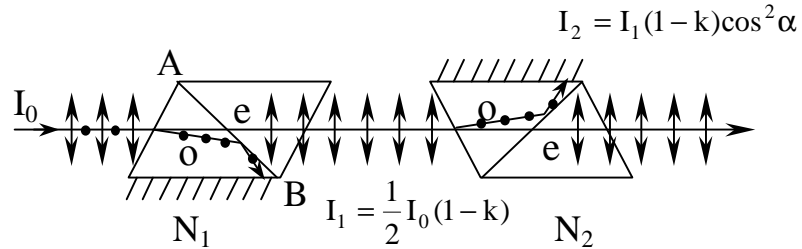


Рис. 2.8

### Решение

Естественный неполяризованный свет, падая на грань призмы Николя, разделяется вследствие двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный (о) и необыкновенный (е). Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обыкновенный пучок света вследствие полного отражения на границе АВ отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею (рис. 2.8). Необыкновенный пучок проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения. Интенсивность света, прошедшего через  $N_1$ ,

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k).$$

Отсюда

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{(1 - k)} = \frac{2}{1 - 0,05} = 2,1.$$

Плоскополяризованный пучок света интенсивности  $I_1$  падает на второй николю  $N_2$ . Интенсивность  $I_2$  пучка, вышедшего из призмы, определяется по закону Малюса

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба Николя

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1(1-k) \cos^2 \alpha} = \frac{2}{(1-k)^2 \cos^2 \alpha}.$$

Производим вычисления при заданных углах:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cdot \cos^2 0^0} = \frac{2}{0,90} = 2,22;$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cdot \cos^2 30^0} = \frac{2}{0,90 \cdot 0,75} = 2,95;$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cdot \cos^2 60^0} = \frac{2}{0,90 \cdot 0,25} = 8,86;$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cdot \cos^2 90^0} = \frac{2}{0} = \infty \text{ (николи скрещены).}$$

При изучении горных пород устанавливают их минеральный состав и строение. Из породы изготавливают шлиф (пластинку толщиной 0,02 – 0,03 мм), который исследуют в проходящем свете в поляризационном микроскопе. Поляризатор и анализатор расположены на оси микроскопа и могут вращаться вокруг нее независимо друг от друга, так что им можно придавать параллельное, скрещенное и любое другое взаимное положение. С помощью поляризационного микроскопа определяется минеральный состав шлифа, очертания отдельных минералов, трещины, включения и т. д. Именно так изучалось в поляризованном свете строение лунного грунта, доставленного на Землю космическими аппаратами.

Поляризационные микроскопы широко применяются в кристаллографии, минералогии, геологии, петрографии, металлографии, медици-

не, химической промышленности и других областях науки и техники.

Качественное суждение о толщине и природе шлифов можно сделать по видимой глазом интерференционной окраске пластинки. Существуют подробные цветовые номограммы, позволяющие для большинства минералов определять толщину образца по интерференционному методу. Номограмма помогает определить природу минерала при экспресс - анализе.

Применение поляризованного света в геологии не ограничивается кристаллическими материалами. Метод, основанный на поляризации люминесценции битуминозных пород, используется для поисков залежей нефти.

2.9 /23, 25, 26/

Пластинка кварца толщиной 1 мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света некоторой длины волны на угол  $20^\circ$ . Определить: 1) какова должна быть толщина  $d_2$  кварцевой пластинки, помещенной между двумя параллельными николями, чтобы свет был полностью погашен; 2) какой длины трубку с раствором сахара массовой концентрации 0,4 кг/л надо поместить между николями для получения того же эффекта? Удельное вращение раствора сахара  $0,665$  град/(м·кг·м<sup>-3</sup>).

$$d_1 = 10^{-3} \text{ м}$$

$$\varphi_1 = 20^\circ$$

$$C = 0,4 \text{ кг/л} = 400 \text{ кг/м}^3$$

$$\alpha_0 = 0,665 \text{ град/(м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3})$$

$$d_2 - ?$$

$$l - ?$$

Решение

1. Угол поворота плоскости поляризации кварцевой пластинкой определяется соотношением

$$\varphi = \alpha d.$$

Пользуясь этой формулой, выразим искомую толщину пластинки

$$d_2 = \frac{\varphi_2}{\alpha},$$

где  $\varphi_2$  – угол поворота плоскости поляризации, при котором свет будет полностью погашен ( $\varphi_2 = 90^\circ$ ).



Постоянную вращения  $\alpha$  для кварца найдем также из формулы

$$\varphi = \alpha d,$$

подставив в нее заданные в условии значения  $d_1$  и  $\varphi_1$ .

$$\alpha = \frac{\varphi_1}{d_1}.$$

С учетом этого

$$d_2 = \frac{\varphi_2 \cdot d_1}{\varphi_1} = \frac{90 \cdot 1}{20} \text{ мм} = 4,5 \text{ мм}.$$

2. Угол поворота плоскости поляризации в растворах оптически активных веществ при постоянной температуре и длине волны света пропорционален концентрации и толщине слоя раствора.

$$\varphi_2 = \alpha_0 \cdot C \cdot l,$$

где  $\alpha_0$  - удельное вращение раствора,

$C$  - концентрация раствора,

$l$  - толщина раствора (длина трубки).

Отсюда

$$l = \frac{\varphi_2}{\alpha_0 \cdot C} = \frac{90 \text{ град}}{0,665 \frac{\text{град}}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}} \cdot 400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{45}{133} \text{ м} = 0,34 \text{ м}.$$

К оптически активным веществам относится ряд твердых тел (кварц, сахар, киноварь) и многие жидкости (нефть, скипидар, никотин, винная кислота, водный раствор сахара и др.).

Явление вращения плоскости поляризации лежит в основе точного метода определения концентрации растворов, называемого поляризацией.

В сахарной промышленности этот метод, называемый сахариметрией, позволяет проводить необходимый технологический контроль на различных стадиях производственного процесса.

Методами сахариметрии пользуются и в фармацевтической промышленности при производстве таких веществ, как камфара, кокаин, никотин и др.

Поляриметрические методы анализа и технического контроля также используются в минералогии, строительной механике, медицине. Практическая ценность метода заключается в его высокой точности, простоте и быстроте.

2.10 /25, 27, 28/

Определить толщину  $d$  пластины из кальцита, которая в желтом свете с длиной волны  $589,3$  нм создает сдвиг фаз  $\pi/2$  между обыкновенным и необыкновенным лучами (пластинка в четверть волны). Какой сдвиг фаз возникает в фиолетовом свете ( $404,7$  нм), проходящем через эту же пластинку? Показатель преломления кальцита для обыкновенных лучей  $1,658$ , для необыкновенных –  $1,486$ .

$$\lambda_1 = 589,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 404,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$n_0 = 1,658$$

$$n_e = 1,486$$

$$\Delta\varphi_1 = \pi/2$$

$$d - ?$$

$$\Delta\varphi_2 - ?$$

Решение

Сдвиг фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами в направлении, перпендикулярном оптической оси кальцита, для желтого света

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda_1} (n_0 - n_e).$$

Полагая  $\Delta\varphi_1 = \pi/2$ , что соответствует пластинке в четверть волны, получим расчетную формулу для толщины пластинки

$$d = \frac{\lambda_1}{4(n_0 - n_e)}.$$

Подставляем числовые данные

$$d = \frac{589,3}{4(1,658 - 1,486)} \text{ нм} = 856 \text{ нм}.$$

Зная толщину пластинки, находим сдвиг фаз в фиолетовом свете

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_2 &= \frac{2\pi d}{\lambda_2} (n_o - n_e) = \\ &= \frac{2\pi \cdot 856 \cdot (1,658 - 1,486)}{404,7} \text{ рад} = 0,728\pi \text{ рад} = 131^\circ. \end{aligned}$$

Исландский шпат (кальцит) значительно превосходит по своим оптическим и механическим свойствам другие оптические материалы. Кристаллы его прозрачны в области спектра от 0,2 до 2 мкм. Кальцит хорошо полируется и устойчив к атмосферным воздействиям. Благодаря значительному двойному лучепреломлению он является незаменимым материалом для поляризационной оптики в поляризационных микроскопах и призмах, поляриметрах и др.

На явлении двойного лучепреломления основано оптическое моделирование, которое служит для проверки задач, решаемых с применением теории упругости, и используется в горной науке для определения распределения напряжений вокруг горных выработок, что позволяет на прозрачных моделях установить места повышенных напряжений, где может начаться разрушение массива.

### *Задачи для самостоятельного решения*

#### 2.1. Интерференция

421. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга 1 мм, расстояние от щелей до экрана 3 м, расстояние между соседними интерференционными максимумами на экране 1,5 мм. Найти длину волны источника монохроматического света. /500 нм/

422. Расстояние между щелями в опыте Юнга 0,5 мм, длина волны источника 550 нм. Каково расстояние от щелей до экрана, если расстояние между соседними темными полосами 1 мм? /91 см/

423. Оранжевые лучи с длиной волны 650 нм от двух когерентных источников, расстояние между которыми 120 мкм, падают на экран. Расстояние от источников до экрана 3,6 м. Найти расстояние между центрами соседних темных полос на экране. /19,5 мм/

424. При наблюдении интерференции от двух мнимых источников монохроматического света с длиной волны 520 нм на плоском экране длиной 8 см помещается 17 полос. Найти расстояние между источниками света, если от них до экрана 2,75 м. /0,3 мм/

425. Два когерентных источника света, расстояние между которыми 0,24 мм, находятся на расстоянии 2,5 м от экрана. Наблюдается интерференционная картина, причем на расстоянии 10 см помещается 21 полоса. Чему равна длина волны падающего на экран света? /457 нм/

426. На мыльную пленку падает под углом  $30^\circ$  параллельный пучок лучей белого света. При наблюдении в отраженном свете она представляется зеленой ( $\lambda = 500$  нм). Найти минимальную толщину пленки, если показатель преломления 1,33. /102 нм/

427. На мыльную пленку падает нормально пучок лучей белого света. Какова минимальная толщина пленки, если в отраженном свете она представляется красной? Длина волны 700 нм. Показатель преломления 1,33. /132 нм/

428. Какую наименьшую толщину должна иметь пластинка, сделанная из материала с показателем преломления 1,54, чтобы при освещении ее лучами с длиной волны 750 нм, перпендикулярными к пластинке, она в отраженном свете казалась красной? /0,12 мкм/

429. На мыльную пленку ( $n = 1,3$ ) падает нормально пучок белого света. Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете она кажется зеленой? Длина волны 550 нм. /0,1 мкм/

430. Какую наименьшую толщину должна иметь пленка ( $n = 1,54$ ), чтобы при освещении лучами с длиной волны 750 нм, перпендикулярными к ее поверхности, она в отраженном свете казалась черной? /0,24 мкм/

431. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками заключен очень тонкий воздушный клин. На пластинки падает нормально монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Определить угол между пластинками, если в отраженном свете на 1 см помещается 20 интерференционных полос. /1.7'/

432. В очень тонкой клиновидной пластинке в отраженном свете при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы. Расстояние между соседними темными полосами 5 мм. Зная, что длина световой волны 0,58 мкм, а показатель преломления пластинки 1,5, найти угол между гранями пластинки. /8"/

433. Между двумя плоскопараллельными пластинками лежит проволока, отчего образовался воздушный клин. Пластинки освещаются светом с длиной волны 500 нм. Угол падения лучей  $45^\circ$ , длина пластинки 10 см. Расстояние между интерференционными полосами в отраженном свете 1,8 мм. Найти толщину проволоки. /0,02 мм/

434. Поверхности стеклянного клина ( $n = 1,5$ ) образуют между собой угол  $0,1'$ . На клин падает нормально пучок монохроматических лучей с длиной волны 500 нм. Найти расстояние между интерференционными полосами. /0,56 см/

435. На стеклянный клин нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Число интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Показатель преломления стекла 1,5. Найти преломляющий угол клина. /41"/

436. Плосковыпуклая линза ( $n = 1,5$ ) с оптической силой 0,5 дптр выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Найти радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете ( $\lambda = 600$  нм). /1,6 мм/

437. Определить толщину воздушной прослойки между линзой и стеклянной пластинкой там, где в отраженном свете ( $\lambda = 600$  нм) видно третье темное кольцо Ньютона. /0,9 мкм/

438. Для наблюдения колец Ньютона взята плосковыпуклая линза с главным фокусным расстоянием 25 см и показателем преломления 1,5. Освещение производится монохроматическим светом с длиной волны 589 нм. Найти радиус третьего светлого кольца в отраженном свете. /0,042 см/

439. Определить радиус 4-го светлого кольца Ньютона в проходящем свете, если между линзой с радиусом кривизны 5 м и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода. Длина волны света 589 нм, показатель преломления воды 1,33. /2,96 мм/

440. Радиус кривизны плосковыпуклой линзы 4 м. Чему равна длина волны падающего света, если радиус 5-го светлого кольца Ньютона в отраженном свете равен 3,6 мм. /720 нм/

441. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, которая вместе с пластинкой позволяет наблюдать кольца Ньютона при освещении монохроматическим источником света с длиной волны 589 нм, причем в отраженном свете расстояние между первым и вторым светлыми кольцами равно 0,5 мм. /1,6 м/

442. Найти фокусное расстояние плосковыпуклой линзы, примененной для получения колец Ньютона, если радиус 3-го темного кольца в отраженном свете ( $\lambda = 590$  нм) равен 1,1 мм. Показатель преломления линзы 1,6. /1,1 м/

443. Плосковыпуклая линза с оптической силой две диоптрии выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус 4-го темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 0,7 мм. Показатель преломления стекла 1,5. Найти длину световой волны. /490 нм/

444. Для опыта с кольцами Ньютона применена плосковыпуклая линза с показателем преломления 1,5. Радиус 2-го темного кольца Ньютона в проходящем свете 0,33 мм. Наблюдение ведется при освещении линзы светом с длиной волны 589 нм. Найти главное фокусное расстояние линзы. /25 см/

445. Каково расстояние между 10-м и 11-м темными кольцами Ньютона, если расстояние между 1-м и 2-м равно 0,5 мм? Наблюдение ведется в отраженном свете. /0,19 мм/

## 2. 2. Дифракция

446. На щель шириной 0,2 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 640 нм. Определить угол отклонения лучей, соответствующих первой светлой дифракционной полосе.

/16,5'/

447. На пластинку со щелью, ширина которой 0,1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 700 нм. Определить угол отклонения лучей, соответствующих первой светлой полосе.

/36'/

448. На пластинку со щелью падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному минимуму, равен  $1^\circ$ . Сколько длин волн падающего света составляет ширина щели?

/114  $\lambda$ /

449. На щель шириной  $2 \cdot 10^{-3}$  см падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 500 нм. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на 1 м.

/5 см/

450. На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 500 нм. Ширина щели равна  $6\lambda$ . Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум освещенности?

/30°/

451. На пластинку со щелью, ширина которой 0,05 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 700 нм. Определить угол отклонения лучей, соответствующих первой светлой полосе.

/1°12'/

452. На щель шириной 0,05 мм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Найти угол между первоначальным направлением пучка света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу.

/2°45'/

453. На дифракционную решетку, содержащую 100 штрихов на миллиметр, падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол  $20^\circ$ . Найти длину световой волны.

/580 нм/

454. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на миллиметр. На решетку падает нормально свет с длиной волны 600 нм. Максимум какого наибольшего порядка дает решетка?

/8/

455. На дифракционную решетку, содержащую 50 штрихов на миллиметр, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет. Спектр проектируется на экран с помощью линзы, помещенной вблизи решетки. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 3 м. Границы видимого спектра 400 нм и 760 нм.

/5,7 см/

456. На дифракционную решетку, имеющую 800 штрихов на 1 мм, падает параллельный пучок белого света. Какова разность углов отклонения конца первого и начала второго спектров? Принять длину волны красного света 760 нм, фиолетового 400 нм. /2°20'/

457. Дифракционная решетка освещена параллельным пучком белого света. Найти разность углов отклонения начала второго и конца первого спектров, если решетка имеет 600 штрихов на 1 мм. Длина волны фиолетового света 400 нм, красного 760 нм. /1°33'/

458. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядка накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница (400 нм) спектра третьего порядка? /600 нм/

459. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки. Какова должна быть постоянная дифракционной решетки, чтобы под углом 41° совпадали максимумы линий с длинами волн 656 нм и 410 нм? /5 мкм/

460. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия с длиной волны 670 нм спектра второго порядка? /447 нм/

### 2.3. Поляризация

461. Угол преломления луча света в жидкости равен 35°. Определить показатель преломления этой жидкости, если отраженный луч максимально поляризован. /1,43/

462. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были бы наиболее полно поляризованы? /37°/

463. Предельный угол полного внутреннего отражения луча на границе жидкости с воздухом равен 43°. Каков должен быть угол падения луча из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный луч был максимально поляризован? /55°45'/

464. Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч составляет угол 97° с падающим лучом. Показатель преломления стекла 1,5. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован. /1,33/



465. Угол максимальной поляризации при отражении света от кристалла каменной соли равен  $57^\circ$ . Определить скорость распространения света в этом кристалле. / $1,94 \cdot 10^8$  м/с/

466. Угол между плоскостями поляризации двух призм Николя равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через николи, если этот угол увеличить до  $60^\circ$ ? /2/

467. Анализатор в два раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Определить угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Потерями света пренебречь. При каких условиях интенсивность лучей, прошедших через анализатор, максимальна и минимальна? / $45^\circ$ ;  $0^\circ$ ;  $90^\circ$ /

468. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшается в четыре раза. Поглощением света пренебречь. / $45^\circ$ /

469. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через призму Николя, если вследствие неполной прозрачности кристалла призма поглощает 10% падающего на нее света? /2,2/

470. Во сколько раз ослабляется интенсивность света, проходящего через два николя, плоскости пропускания которых образуют угол  $30^\circ$ , если в каждом из николей в отдельности теряется 10 % интенсивности падающего на него света? /3.3/

### 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

#### *Примеры решения задач*

#### 3.1 /19, 29, 30/

Найти величину солнечной постоянной  $W_0$ . Температуру Солнца принять равной 5800 К, излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела. Радиус Солнца  $6,9 \cdot 10^5$  км, расстояние от Солнца до Земли  $1,5 \cdot 10^{11}$  м. Считая, что земная атмосфера поглощает 10 % лучистой энергии, посылаемой Солнцем, найти мощность, получаемую горизонтальным участком земли площадью 0,5 га. Высота Солнца над горизонтом  $30^\circ$ .

$$\begin{array}{l}
 k = 0,1 \\
 S_{\text{гор}} = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \\
 \alpha = 30^\circ \\
 T = 5800 \text{ К} \\
 R = 6,9 \cdot 10^8 \text{ м} \\
 r = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м} \\
 \hline
 W_0 - ? \\
 N - ?
 \end{array}$$

### Решение

Солнечной постоянной называют количество лучистой энергии, поступающей от Солнца за секунду на площадку  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную к солнечным лучам и находящуюся на таком же расстоянии от него, что и Земля.

Полная энергия, излучаемая всей поверхностью Солнца в секунду,

$$W = E \cdot 4\pi R^2,$$

где  $E$  – энергетическая светимость.

По закону Стефана-Больцмана энергетическая светимость (количество энергии, излучаемой за одну секунду единицей площади поверхности абсолютно черного тела) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

$$E = \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Энергия, излучаемая Солнцем, распространяется равномерно во все стороны. Поэтому солнечная постоянная

$$\begin{aligned}
 W_0 &= \frac{W}{4\pi r^2} = \sigma \left( \frac{R}{r} \right)^2 T^4. \\
 W_0 &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{6,9 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 10^{11}} \right)^2 \cdot (5,8)^4 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.
 \end{aligned}$$

На горизонтальный участок поверхности Земли площадью  $S_{\text{гор}}$  попадает вся та лучистая энергия, которая проходит через площадку  $S_{\perp}$ , перпендикулярную солнечным лучам.

$$S_{\perp} = S_{\text{гор}} \cdot \sin \alpha = 0,5 S.$$

С учетом поглощения солнечных лучей атмосферой мощность, получаемая горизонтальным участком земли площадью  $S_{гор}$ ,

$$N = W_0 \cdot 0,5 S (1 - k).$$

$$N = 1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \text{ Вт} = 3,1 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Источником энергии для всех процессов, развивающихся в атмосфере, является солнечное излучение. Приблизительно 46 % лучистой энергии приходится на видимые лучи, около 47% - на инфракрасное излучение, 7 % - на ультрафиолетовые лучи.

Главной особенностью радиационного режима атмосферы является так называемый парниковый эффект. Он состоит в том, что атмосферой почти не поглощается излучение в оптическом диапазоне (большая часть видимых лучей достигает поверхности Земли и нагревает ее) и не пропускается в обратном направлении инфракрасное излучение. Это значительно снижает теплоотдачу планеты и повышает ее температуру.

Солнечная радиация поглощается верхними слоями поверхности Земли и имеет, например, первостепенное значение для процесса полевой сушки торфа. Изучение этого процесса связано с исследованиями закономерностей теплообмена, переноса теплоты, который осуществляется в полевых условиях конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением. Конвективный поток теплоты всегда сопровождается теплопроводностью – это конвективный теплообмен. Процесс сушки торфа при таком теплообмене называют конвективной сушкой. В полевых условиях, когда подвод теплоты к торфу осуществляется конвекцией из воздуха и тепловым излучением, происходит радиационно-конвективный теплообмен.

Так как сушка торфа ведется на влажной подстилающей залежи, необходимо учитывать также тепло- и массообмен между ними.

3.2 /29, 31, 32/

Определить температуру поверхности Земли и ее энергетическую светимость. Максимум энергии излучения приходится на длину волны, равную 10 мкм.

$$\lambda_m = 10^{-5} \text{ м}$$

T - ?

E - ?

### Решение

Поглощенная верхними слоями Земли радиация нагревает Землю, и земная поверхность излучает длинноволновую радиацию (инфракрасное тепловое излучение), которая называется собственным излучением Земли.

Температуру земной поверхности найдем из закона смещения Вина. По этому закону длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимальное излучение, обратно пропорциональна абсолютной температуре.

$$\lambda_m = \frac{C'}{T},$$

где  $C'$  - постоянная Вина, равная  $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Отсюда температура поверхности Земли

$$T = \frac{C'}{\lambda_m} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{10^{-5}} \text{ К} = 290 \text{ К}.$$

Собственное излучение Земли с единицы ее площади за 1 секунду определим по закону Стефана-Больцмана

$$E = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (290)^4 \text{ Вт/м}^2 = 400 \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловое излучение с поверхности Земли в какой-то степени характеризует подземную структуру нашей планеты.

Геологи приспособливают инфракрасную аэрофотосъемку для поисков нефти и полезных ископаемых.

Вулканологам с помощью тепловизоров удалось составить термальные карты вулканов Камчатки. Карты наглядно показали распределение тепла в вулканической зоне, выходы раскаленных газов и горячих ключей.

Инженеры – строители применяют инфракрасную аэрофотосъемку при выборе мест строительства, а также для обнаружения течи в подземных трубопроводах.

Гидрологам она помогает находить подпочвенные воды, оценивать содержание воды в почве, наносить на карты русла ручьев и рек, когда они скрыты бурной растительностью.

Современные инфракрасные приборы позволяют обнаружить на поверхности Земли участки, температура которых отличается всего на два-три градуса от температуры окружающей среды.

3.3 /12, 19, 23, 31/

Поток энергии, излучаемой из смотрового окошечка плавильной печи на металлургическом заводе, равен 34 Вт. Определить температуру печи, если площадь отверстия  $6 \text{ см}^2$ . Чему равна длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения печи? Найти спектральную излучательную способность  $r_\lambda$ , рассчитанную на интервал длин волн  $\Delta\lambda = 1 \text{ нм}$  вблизи  $\lambda_m$ . Излучение печи считать близким к излучению абсолютно черного тела.

$\Phi = 34 \text{ Вт}$
$S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
$\Delta\lambda = 10^{-9} \text{ м}$
$T - ?$
$\lambda_m - ?$
$r_\lambda - ?$

Решение

По закону Стефана-Больцмана энергетическая светимость (интегральная излучательная способность)

$$E = \frac{W}{S t} = \frac{\Phi}{S} = \sigma T^4,$$

где  $W$  - энергия, испускаемая с площади  $S$  абсолютно черного тела за время  $t$  ;

$\Phi$  - поток энергии, равный энергии, испускаемой телом за 1 с.  
Температура печи

$$T = \sqrt[4]{\frac{\Phi}{S \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{34}{6 \cdot 10^{-4} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} \text{ К} = 10^3 \text{ К}.$$

В соответствии с законом смещения Вина

$$\lambda_m = \frac{C'}{T}.$$

Подставляем значение температуры, получаем, что длина волны, на которую приходится максимум излучаемой энергии,

$$\lambda_m = \frac{C'}{T} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{10^3} \text{ м} = 2900 \text{ нм.}$$

По второму закону Вина максимальная спектральная излучательная способность абсолютно черного тела возрастает прямо пропорционально пятой степени абсолютной температуры

$$r_\lambda = C'' T^5,$$

где  $C''$  - постоянная Вина, равная  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ .

В нашем случае удобно записать  $C'' = 1,3 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{К}^5)$ .

Получаем, что

$$r_\lambda = 1,3 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{К}^5) \cdot 10^{15} \cdot \text{К}^5 = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм}).$$

Тепловое излучение состоит из лучей со всевозможными длинами волн, то есть образует сплошной спектр.

При низких температурах интенсивность всех лучей, в том числе и видимых, мала, и излучение не воспринимается глазом. С увеличением температуры излучение возрастает, а из видимых лучей сначала увеличивается интенсивность красных лучей. При дальнейшем повышении температуры растет интенсивность всех видимых лучей, и раскаленное тело приобретает белый свет. Различным температурам раскаленных тел соответствуют различные «цвета каления».

Нагрев горных инструментов перед закалкой производят в специальных печах. Контроль за температурой нагрева горных инструментов или пород осуществляется с помощью пирометров, термопар. При отсутствии приборов контроль за температурой нагрева может производиться по «цветам каления», приведенным в таблице 2 для горной породы.

## Влияние температуры на цвет каления горной породы

Цвет каления	Температура, °С
Начало (появление) красного каления	500 – 550
Темнокрасное каление	700
Ярко-красное каление	900
Желтовато-красное каление	1100
Начало белого каления	1300
Белое каление	1500 и выше

3.4 /28, 32/

Фотоэлемент с наибольшей избирательной чувствительностью в ближней инфракрасной области облучается монохроматическим светом с длиной волны 486 нм. Определить наибольшую скорость фотоэлектронов, если работа выхода из материала фотокатода равна 1,56 эВ (1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). Какую наименьшую задерживающую разность потенциалов нужно приложить для прекращения фототока? Заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, его масса  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

$$A = 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\lambda = 4,86 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$V_{\max} - ?$$

$$U - ?$$

Решение

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mV_{\max}^2}{2}$$

находим максимальную скорость фотоэлектронов

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2(hc - A\lambda)}{m\lambda}}$$

Подставляем числовые данные

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 - 2,5 \cdot 10^{-19} \cdot 4,86 \cdot 10^{-7})}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4,86 \cdot 10^{-7}}} \text{ м/с} = 5,9 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Наименьшую задерживающую разность потенциалов, необходимую для прекращения фототока, найдем из условия

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = eU.$$

Тогда

$$U = \frac{hc - A\lambda}{\lambda e}.$$

$$U = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 - 2,5 \cdot 10^{-19} \cdot 4,86 \cdot 10^{-7}}{4,86 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ В} = 0,99 \text{ В.}$$

Для предупреждения взрывов угольной пыли в шахтах применяются фотоэлектрические датчики, с помощью которых начавшийся слабый взрыв угольной пыли может быть ликвидирован в самом начале. Принцип действия датчика основан на использовании фотоэлектрических свойств инфракрасного излучения пламени взрыва.

Датчик устанавливается на расстоянии 5-7 м от забоя и реагирует на всякое открытое пламя. Принцип его работы основан на использовании инфракрасной области излучения пламени взрыва и преобразовании фотоэлектрического импульса в мощный импульс тока, способного воспламенить электродетонатор во взрывобезопасном корпусе приводного механизма и осуществить немедленное опрокидывание заслона с инертной пылью массой 20 кг в случае появления пламени взрыва.

Фотодатчик не реагирует на видимые лучи шахтной осветительной аппаратуры, так как в нем применен селективный инфракрасный светофильтр из тонкого эбонита и сурьмяно-цезиевые фотоэлементы с максимумом чувствительности в ближней инфракрасной области спектра.



При освещении монохроматическим светом катода вакуумного фотоэлемента фототок прекращается, если между катодом и анодом включить задерживающее напряжение 0,8 В. Найти длину волны применяемого облучения и максимальную длину волны, при которой еще возможен фотоэффект. Чему равен максимальный импульс, передаваемый поверхности катода при вылете отдельного электрона? Работа выхода электрона из металла 5,3 эВ.

$$U = 0,8 \text{ В}$$

$$A = 5,3 \text{ эВ} = 8,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\lambda - ?$$

$$\lambda_m - ?$$

$$P_m - ?$$

Решение

В уравнении Эйнштейна для фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A + T_m$$

$T_m$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, она определяет величину задерживающей разности потенциалов, при которой прекращается фототок.

$$T_m = eU.$$

Из уравнения Эйнштейна с учетом сказанного выше длина волны применяемого облучения

$$\lambda = \frac{hc}{A + eU}.$$

Максимальный импульс  $P_m$ , передаваемый пластине при вылете одного электрона, можно определить, применяя закон сохранения импульса к системе: фотон – электрон – кристаллическая решетка.

$$\frac{h}{\lambda} = P_m - P_m^{\text{эл}}.$$

Так как  $T_m$  фотоэлектронов, равная 0,8 эВ много меньше энергии покоя, равной 0,51 МэВ,  $P_m^{\text{эл}}$  может быть найден из классического соотношения

$$T_m = \frac{(P_m^{\text{эл}})^2}{2m_0},$$

то есть

$$P_m^{\text{эл}} = \sqrt{2m_0 eU}.$$

Тогда максимальный импульс, передаваемый пластине при вылете электрона, с учетом наших рассуждений

$$P_m = \frac{A + eU}{c} + \sqrt{2m_0 eU}.$$

Красная граница фотоэффекта определится из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта при  $T_m = 0$

$$\lambda_m = \frac{hc}{A}.$$

Произведем вычисления:

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(5,3 + 0,8) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 204 \text{ нм},$$

$$P_m = \left[ \frac{(5,3 + 0,8) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} + \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \right] \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} =$$

$$= 4,86 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}},$$

$$\lambda_m = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 234 \text{ нм}.$$

С большим успехом фотоэлементы используются в угольной и горнорудной промышленности. Они автоматически регулируют и контролируют скорость подъема и опускания клетки, управляют шахтной вентиляцией, заслонками бункеров для угля и т. д.

Фотореле может отсортировать породу от угля и куски угля по их размерам, указывать на наличие в шахте угольной пыли, метана и ядовитой окиси углерода.

3.6 /19, 34,35/

Контроль за границей раздела горных пород при геофизическом исследовании буровой скважины осуществляется с помощью комптоновского рассеяния рентгеновских лучей с длиной волны 70,8 пм. Найти длину волны рентгеновских лучей, рассеянных под углом  $\pi/2$  к направлению падающих лучей.

$$\begin{array}{l} \lambda = 70,8 \cdot 10^{-12} \text{ м} \\ \varphi = \pi/2 \\ \lambda' - ? \end{array} \left| \right.$$

Решение

При соударении со свободным или слабо связанным (валентным) электроном фотон передает ему часть своей энергии, вследствие чего длина волны рассеянного фотона больше длины волны первичного фотона.

Изменение длины волны дается формулой Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \varphi).$$

Величина  $\lambda_c = h / (m_e c)$  называется комптоновской длиной волны. При рассеянии на электроне  $\lambda_c = 2,4 \cdot 10^{-12}$  м.

Следовательно,

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \cos \pi/2);$$

$$\lambda' = (70,8 + 2,4) \cdot 10^{-12} \text{ м} = 73,2 \text{ пм.}$$

При взаимодействии  $\gamma$  – квантов с электронами атомов изучаемой среды наблюдается рассеяние  $\gamma$  – квантов (комpton-эффект) и их поглощение (фотоэффект). Интенсивность рассеяния  $\gamma$  – излучения про-

порциональна плотности среды, а интенсивность его поглощения – содержанию тяжелых элементов. Поэтому исследование процесса прохождения  $\gamma$  – квантов через горные породы дает возможность судить о плотности, пористости и минеральном составе пород, о наличии в стенке буровой скважины тяжелых элементов, например свинца.

Эффект комптоновского рассеяния  $\gamma$  –лучей положен в основу действия радиоактивного датчика, который используется для автоматизации процесса вождения угольных комбайнов. Отклонение машины от линии раздела в уголь или породу влияет на интенсивность рассеянного излучения. При этом изменение знака выдаваемого сигнала позволяет судить о том, в какую сторону отклоняется комбайн.

### *Задачи для самостоятельного решения*

#### 3.1. Тепловое излучение

471. Температура «голубой» звезды  $3 \cdot 10^4$  К. Определить интегральную интенсивность излучения и длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности.

*/4,6 · 10<sup>10</sup> Вт/м<sup>2</sup>; 96 нм/*

472. Приняв температуру поверхности Солнца равной 6000 К, определить энергию, излучаемую с одного квадратного метра за секунду и длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности.

*/7,4 · 10<sup>7</sup> Вт/м<sup>2</sup>; 480 нм/*

473. Найти температуру абсолютно черной пластинки, не проводящей тепло и расположенной за пределами земной атмосферы перпендикулярно лучам Солнца, если на 1 см<sup>2</sup> ежеминутно падает 8,2 Дж энергии.

*/394 К/*

474. Поток энергии, излучаемой из смотрового окошка печи за секунду, равен 51 Вт. Найти температуру печи, если площадь отверстия 9 см<sup>2</sup>.

*/1000 К/*

475. Вследствие изменения температуры абсолютно черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с 2,4 мкм на 0,8 мкм. Во сколько раз увеличилась интегральная излучательная способность?

*/81/*

476. Температура абсолютно черного тела увеличилась в два раза, при этом длина волны, на которую приходится максимум спектральной излучательной способности, уменьшилась на 600 нм. Найти начальную и конечную температуру тела. /2420 К; 4840 К/

477. Средняя величина энергии, теряемой вследствие излучения с одного квадратного сантиметра поверхности Земли за минуту, равна 0,55 Дж. Какую температуру должно иметь абсолютно черное тело, излучающее такое же количество энергии? /200 К/

478. Печь при температуре 1100 К посылает на измерительный прибор некоторое тепловое излучение. Какова должна быть температура печи, чтобы получаемое прибором излучение увеличилось в два, четыре и шестнадцать раз? /1310 К; 1550 К; 2200 К/

479. Максимальная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела приходится на длину волны 800 нм. Какая мощность должна быть подведена к этому телу, поверхность которого  $100 \text{ см}^2$ , чтобы поддерживать его при постоянной температуре. /97 кВт/

480. Вследствие изменения температуры абсолютно черного тела, максимум испускательной способности сместился с 500 нм на 750 нм. Во сколько раз уменьшилась суммарная мощность излучения? /5/

### 3.2. Фотоэффект

481. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта равна 307 нм и кинетическая энергия фотоэлектрона 1 эВ. /0,8/

482. Работа выхода электронов из никеля равна 5 эВ. Будет ли наблюдаться фотоэффект, если никель освещать лучами с длиной волны 300 нм? /Нет/

483. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определить работу выхода электронов из этой пластинки. /4,7 эВ/

484. На поверхность лития падает монохроматический свет с длиной волны 310 нм. Чтобы прекратить эмиссию электронов, надо приложить задерживающую разность потенциалов не менее 1,7 В. Определить работу выхода. /2,3 эВ/

485. Работа выхода электрона из никеля равна 5 эВ. Какова максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, если никелевая пластинка освещается ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 100 нм? /7,4 эВ/

486. Цезий (работа выхода 1,88 эВ) освещается монохроматическим светом с длиной волны 486 нм. Какую наименьшую задерживающую разность потенциалов нужно приложить, чтобы фототок прекратился? /0,68 В/

487. Калий (работа выхода 2 эВ) освещается монохроматическим светом с длиной волны 509 нм. Определить максимально возможную кинетическую энергию фотоэлектронов. /0,44 эВ/

488. Рубидий и цезий облучаются светом с длиной волны 620 нм. Работы выхода электронов из этих металлов равны 1,53 эВ и 1,87 эВ соответственно. Определить максимальные скорости фотоэлектронов. /0,42 Мм/с; 0,22 Мм/с/

489. Определить работу выхода электрона из цезия и серебра, если красная граница фотоэффекта у этих металлов составляет соответственно 660 нм и 260 нм. / $3,0 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $7,6 \cdot 10^{-19}$  Дж/

490. Красная граница фотоэффекта для цезия равна 653 нм. Определить скорость фотоэлектронов при облучении цезия фиолетовыми лучами с длиной волны 400 нм. / $6,5 \cdot 10^5$  м/с/

### 3.3. Фотоны. Давление света

491. Определить энергию, импульс и массу фотона, длина волны которого соответствует видимой части спектра с длиной волны 500 нм. / 2,48 эВ;  $1,32 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с;  $0,44 \cdot 10^{-35}$  кг/

492. Определить энергию, массу и количество движения фотона, если соответствующая ему длина волны равна 0,16 нм. / $1,2 \cdot 10^{-15}$  Дж;  $1,38 \cdot 10^{-32}$  кг;  $4,1 \cdot 10^{-24}$  кг·м/с/

493. Поток монохроматического излучения с длиной волны 500 нм падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой  $10^{-8}$  Н. Определить число фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

$$/3,8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}/$$

494. Давление монохроматического света ( $\lambda = 600$  нм) на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно  $10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>. Сколько фотонов падает на 1 см<sup>2</sup> этой поверхности за 1 с?

$$/9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}/$$

495. Поток световой энергии (всех длин волн), падающий нормально на зеркальную поверхность площадью 10 см<sup>2</sup>, равен 0,6 Вт. Вычислить величину светового давления.

$$/0,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}/$$

496. Давление света с длиной волны 600 нм на черную поверхность равно  $2,2 \cdot 10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>. Сколько фотонов падает на 1 см<sup>2</sup> за одну секунду?

$$/2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}/$$

497. Плотность потока световой энергии равна 300 Вт/м<sup>2</sup>. Определить давление света, падающего нормально на зеркальную поверхность.

$$/2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}/$$

498. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны 662 нм падает на зачерненную поверхность и производит на нее давление  $3 \cdot 10^{-7}$  Па. Определить концентрацию фотонов в световом пучке?

$$/10^{12} \text{ м}^{-3}/$$

499. Определить давление света на стенки электрической стоваттной лампы. Колба лампы представляет собой сферический сосуд радиусом 5 см. Стенки лампы отражают 10 % падающего на них света. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение.

$$/1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}/$$

500. На поверхность площадью 100 см<sup>2</sup> ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Найти величину светового давления, если поверхность полностью отражает все лучи и если полностью поглощает все лучи.

$$/0,7 \text{ мкПа}; 0,35 \text{ мкПа}/$$

## Список использованной литературы

1. Физика. Методические указания, программа и контрольные задания для студентов-заочников / Отв. ред. И. К. Овчинников. – Свердловск: СГИ, 1960. – 132 с.
2. Горная энциклопедия / Гл. ред. Е. А. Козловский. – Т. 1. – М.: Сов. энцикл., 1984. – 560 с.
3. Квант. – 1984. – № 2. – С. 57.
4. Копылов В. Е. Бурение? ... Интересно! – М.: Недра, 1981. – 160 с.
5. Электронная микроскопия в минералогии / Под ред. Г. Р. Венка. – М.: Мир, 1979. – 541 с.
6. Спиридонов А. И. Теодолиты. – М.: Недра, 1985. – С. 11.
7. Чеканов В. Д. Сборник задач и упражнений по общей и горной электротехнике. – М.: Недра, 1966. – 224 с.
8. Чулков Н. Н., Чулков А. Н. Электрификация карьеров в задачах и примерах. – М.: Недра, 1976. – С. 277.
9. Савельев И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
10. Комаров В. В., Килькеев Ш. Х. Рудничная вентиляция. – М.: Недра, 1969. – 416 с.
11. Иродов И. Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
12. Справочник горного мастера / Под ред. А. П. Судоплатова. – М.: Углетехиздат, 1956. – 1034 с.
13. Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений: Учебное пособие / Под ред. Р. А. Гладковой. – М.: Наука, 1988. – 383 с.
14. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.
15. Трофимова Т. И. Сборник задач по курсу физики. – М.: Высшая школа, 1996. – 303 с.
16. Гофман Ю. В. Законы, формулы, задачи физики. Справочник. – Киев.: Наукова думка, 1977. – 575 с.
17. Ржевский В. В., Ямщиков В. С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. – М.: Наука, 1973. – 224 с.



18. Ямщиков В. С. Волновые процессы в массиве горных пород. – М.: Недра, 1984. – 271 с.
19. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Наука, 1990. – 396 с.
20. Сахаров Д. И. Сборник задач по физике. – М. Учпедгиз, 1973. – 286 с.
21. Жевандров Н. Д. Поляризация света. – М.: Наука, 1969. – С. 44.
22. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. – М.: Физматгиз, 1962. – С. 91.
23. Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике: Учебное пособие. – М.: Интеграл-Пресс, 1997. – 544 с.
24. Малахов А. А. Занимательно о геологии. – М.: Мол. гвардия. – 1969. – С. 20.
25. Жевандров Н. Д. Применение поляризованного света. – М.: наука, 1978. – 176 с.
26. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. – М.: Физматгиз, 1961. – С. 797.
27. Пинский А. А. Задачи по физике. – М.: Наука, 1977. – 288 с.
28. Справочник горного инженера / Под ред. В. К. Бучнева. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 790 с.
29. Антонов В. Я., Малков Л. М., Гамаюнов Н. И. Технология полевой сушки торфа. – М.: Недра, 1981. – 239 с.
30. Дмитриев А. П., Гончаров С. А., Кузьяев Л. С. Термодинамические процессы в горных породах . – М.: Недра, 1990. – 359 с.
31. Дмитриев А. П. и др. Термодинамика и теплопередача горных пород: Лабораторный практикум. – М.: МИРГЭМ, 1966. – 140 с.
32. Меркулов А. П. Магнитные поля – труженики. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
33. Применение фотоэлементов в угольной промышленности. – М.: Углетехиздат, 1956. – 6 с.
34. Дахнов В. И. К познанию недр Земли. Геофизическое исследование скважин. – М.: Недра, 1968. – 144 с.
35. Применение методов атомной и ядерной физики в горном деле. – М.: Наука, 1969. – С. 166-168.

Оптика: Методические рекомендации к решению задач по физике для студентов всех направлений.

Авторы: Л. Н. Лукашевич, ст. преподаватель  
Л. К. Катанова, доц., канд. физ.-мат. наук  
О. В. Садырева, аспирант

Корректурa кафедры физики  
Подписано к печати  
Формат бумаги 60 x 84 1/16  
Печ. л. 3,1. Тираж 100 экз. Заказ №  
Цена С.

---

Лаб. множительной техники УГГГА  
620144, Екатеринбург, Куйбышева, 30