ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЗИКЕ

(электричество, магнетизм, оптика)

для слушателей,
обучающихся без отрыва от производства
на подготовительных отделениях
при высших учебных заведениях

Москва 1981

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЗИКЕ
(электричество, магнетизм, оптика)
для слушателей,
обучающихся без отрыва от производства
на подготовительных отделениях
при высших учебных заведениях

Москва 1981

УДК 530.10(075.4)

Указания подготовлены Учебно-методической лабораторией формирования контингента студентов Учебно-методического кабинета по высшему образованию при Минвузе СССР и секцией физики комиссии, утвержденной приказом Минвуза СССР от 22 сентября 1981 г. № 940, в составе:

1. Калашников Н.П. – председатель секции, зав.кафедрой физики Московского инженерно-физического института, профессор.

2. Погожев В.А. – заместитель председателя секции, доцент Московского Государственного Университета.

3. Качанов А.В. – ученый секретарь секции, доцент Московского инженерно-физического института.

4. Горбаченко Г.М. – доцент Московского инженерно-физического института.

5. Добродеев Н.А. – доцент Московского инженерно-физического института.

6. Константинова М.А. – старший преподаватель Московского института управления.

7. Лебедева В.К. – старший преподаватель Московского инженерно-физического института.

8. Михненко Г.А. – доцент Московского инженерно-физического института.

9. Молотков А.П. – доцент Московского текстильного института.

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор Шермергор Т.Д.

Доктор технических наук, профессор Евстратов Н.А.

Ассистент МИХМ Федотов М.А.

Ответственный за выпуск Э.А. Трунева

Содержание

1. Введение....................................4
2. Календарно-тематический план....................9
3. Методические указания к решению задач...........32
   3.1.Электростатика.........................32
   3.2.Электроемкость.........................41
   3.3.Постоянный электрический ток...............44
   3.4.Магнитное поле.........................51
   3.5.Электромагнитная индукция..................61
   3.6.Колебания и волны.......................67
   3.7.Законы отражения и преломления света..........77
   3.8.Линзы.Оптические приборы..................88
   3.9.Волновые и квантовые свойства света...........94
   3.10.Строение атома и атомного ядра.............97

I. ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть указаний по физике для слушателей, обучающихся на подготовительных отделениях без отрыва от производства предназначена для организации самостоятельной работы при повторении курса физики во втором полугодии учебного года. Для этой цели в издание включен календарно-тематический план, предусматривающий повторение следующих разделов курса: "Электродинамика", "Колебания и волны", "Оптика", "Элементы атомной и ядерной физики". Так же, как и в первой части, в издании сохранен принцип дозирования учебного материала на одну учебную неделю. Календарно-тематический план, отражающий этот принцип, тезисно раскрывает основные вопросы программы по физике для подготовительных отделений и программы вступительных экзаменов, а также содержит указания на параграфы учебников и учебных пособий для повторения.

При самостоятельном повторении материала слушателю рекомендуется составлять краткий конспект, в который следует записывать основные определения, физические законы, уравнения и формулы, описывающие связи между физическими величинами, отмечая условия их применимости.

Перед выполнением заданий и контрольных работ рекомендуется познакомиться с методическими указаниями и учесть их при решениях задач. Методические указания к решению задач приведены в издании непосредственно после календарно-тематического плана.

Для справок ниже приводится таблица обозначений тех физических величин, которые впервые встречаются в этой части указаний.

Таблица

Обозначения физических величин, принятые в пособии

Наименование	Обозначение	Единица измерения СИ	Наименование единицы в системе СИ	Единица измерения СГСЭ	Соотношения между единицами СИ и СГСЭ
1	2	3	4	5	6
Емкость электрическая	C		фарад	см	$1Ф=9\cdot10^{11}$ см
Длина волны	λ	м	метр	см	1м=100 см
Заряд электрический	Q, q	Кл	кулон	СГСЭ-ед= $см^{3/2}\,г^{1/2}/с$	$1Кл=3\cdot10^{9}$ СГСЭ-ед.
Заряд элементарный электрический	e	$1,6\cdot10^{-19}$ Кл		$4,8\cdot10^{-10}$ СГСЭ-ед.	
Индуктивность	L	Гн	генри	-	-
Индукция магнитная	B	Тл	тесла	-	-
Коэффициент трансформации	k	безразмерная величина			
Напряжение электрическое	U, u	В	вольт	СГСЭ-ед= $г^{1/2}см^{1/2}/с$	1СГСЭ-ед=300В

	2	3	4	5	6
Напряженность электрического поля	E	В/м	вольт на метр	СГСЭ-ед.$=г^{1/2}/см^{1/2}\cdot с$	IСГСЭ-ед$=3\cdot 10^4$ В/м
Оптическая сила	D	дптр	диоптрия	$см^{-1}$	Iдптр$=10^{-2}см^{-1}$
Плотность электрического заряда поверхностная	σ	$Кл/м^2$		СГСЭ-ед$=г^{1/2}/(см^{3/2}\cdot с)$	$1\frac{Кл}{м^2}=9\cdot 10^5$ СГСЭ-ед
Плотность энергии	w	$Дж/м^3$		$эрг/см^3$	$1\frac{Дж}{м^3}=10\frac{эрг}{см^3}$
Показатель преломления	n		безразмерная		
Постоянная электрическая	ε_0	$8{,}85\cdot 10^{-12}$ Ф/м		-	-
Постоянная магнитная	μ_0	$1{,}26\cdot 10^{-6}$ Гн/м		-	-
Постоянная Планка	h	$6{,}62\cdot 10^{-34}$ Дж·с		$6{,}62\cdot 10^{-27}$ эрг·с	
Постоянная Ридберга	R	$1{,}09\cdot 10^{-7}м^{-1}$		$1{,}09\cdot 10^{5}см^{-1}$	
Потенциал электрического поля	φ	В	вольт	СГСЭ-ед$=г^{1/2}см^{1/2}/с$	IСГСЭ-ед.=300В
Поток магнитный	Φ	Вб	вебер		

I	2	3	4	5	6
Проницаемость диэлектрическая	ε		безразмерная величина		
Проницаемость магнитная	μ		безразмерная величина		
Сила тока	I, i	А	ампер	СГСЭ-ед$=г^{1/2}\cdot см^{3/2}/с^2$	IA$=3\cdot 10^9$ СГСЭ-ед
Сила электродвижущая	$\mathcal{E}$	В	вольт	СГСЭ-ед.$=г^{1/2}\cdot см^{1/2}/с$	IСГСЭ-ед.=300В
Скорость света в вакууме	c		$3\cdot 10^8$ м/с	$3\cdot 10^{10}$ см/с	
Сопротивление электрическое	R, r	Ом	ом	СГСЭ-ед.=с/см	IСГСЭ-ед.$=9\cdot 10^{11}$ Ом
Сопротивление электрическое удельное	ρ	Ом·м		СГСЭ-ед.=с	IСГСЭ-ед.$=9\cdot 10^{9}$ Ом·м
Угол падения	α	рад	радиан		
Угол отражения	γ	рад	радиан		
Угол преломления	β	рад	радиан		
Фаза колебаний	φ	рад	радиан		
Фокус, фокусное расстояние	F	м	метр	см	I м = 100 см
Частота	ν	Гц	герц	Гц	

1	2	3	4	5	6
Число Фарадея	F	$9{,}65\cdot10^4$ Кл/моль		$2{,}9\cdot10^{14}$ СГСЭ-ед./моль	
Энергия электрического и магнитного полей	W	Дж	джоуль	эрг	$1Дж=10^7$ эрг

2. КАЛЕНДАРНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Для самостоятельного повторения курса физики рекомендуется следующая литература:

Основная:

Л – I. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Физика. Учебник для 8-го класса средней школы. М., "Просвещение", 1977 и последующие издания.

Л – 2. Буховцев Б.Б., Климонтович Ю.Л., Мякишев Г.Я., Физика. Учебное пособие для 9-го класса средней школы, М., "Просвещение", 1980 и последующие издания.

Л – 3. Буховцев Б.Б., Мякишев Г.Я. Физика. Учебник для 10-го класса средней школы, М., "Просвещение", 1977 и последующие издания.

Дополнительная:

Л – 4. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. т.I, II, III. М., "Высшая школа", 1975 и последующие издания.

Л – 5. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М. "Наука", 1975–1981 гг.

Л – 6. Методические указания к решению задач (настоящее пособие).

20-я неделя. Закон Кулона. Напряженность электрического поля

Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Взаимодействие заряженных тел. Точечный заряд. Закон Кулона. Единицы заряда. Элементарный электрический заряд.

Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Напряженность поля точечного заряда. Принцип суперпозиции полей. Силовые линии электрического поля.

Проводники в электрическом поле. Напряженность поля заряженной сферы и плоскости. Однородное электрическое поле.

Л-2, §§ 37-49; Л-6, стр. 32-41.

Задание 18

18.1. В вершинах квадрата помещены точечные заряды $q = 10^{-7}$ Кл. Какой положительный заряд Q нужно поместить в центре квадрата, чтобы вся система находилась в равновесии?

18.2. В вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника находятся одинаковые заряды $q = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл. С какой силой F два заряда, помещенные в вершинах острых углов треугольника, действуют на третий, находящийся в вершине прямого угла, если длина катета $l = 0{,}1$ м ?

18.3. Найти напряженность E в центре правильного шестиугольника со стороной $a = 8$ см, в вершинах которого расположены поочередно положительные и отрицательные заряды, равные по величине $q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл.

18.4. Определить угол отклонения α нити от вертикали, если на ней подвешен шарик массой $m = 0{,}15$ г и зарядом $q = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл. Система помещена в однородное горизонтальное электрическое поле напряженностью $E = 10^{-2}$ В/м.

18.5. Одинаковые шары малых размеров несут заряды $q_1 = 3 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_2 = -8 \cdot 10^{-6}$ Кл. Расстояние между центрами шариков $r = 50$ см.

Шары приводят в соприкосновение и вновь раздвигают на такое же расстояние. Найти силу их взаимодействия F после соприкосновения.

21-я неделя. Диэлектрики. Потенциал

Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость вещества.

Работа сил электрического поля по перемещению зарядов. Потенциал. Единицы измерения потенциала. Разность потенциалов. Потенциал поля точечного заряда. Связь разности потенциалов с напряженностью электрического поля. Эквипотенциальные поверхности.

Л-2, §§ 50-56; Л-6; стр. 32-41.

Задание 19

19.1. До какой разности потенциалов $\Delta\varphi$ надо зарядить горизонтально расположенные на расстоянии $d = 4$ см друг от друга металлические пластины, чтобы пылинка массой $m = 3 \cdot 10^{-8}$ г, несущая на себе $N = 1000$ избыточных электронов, оказалась в равновесии между этими пластинами ?

19.2. Определить потенциал φ заряженной сферы радиуса $R = 1$ см, если работа по перемещению заряда $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии $r = 1$ см от поверхности сферы, равна $A = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$ Дж.

19.3. Электрон летит от точки А к точке В. Разность потенциалов между ними $\Delta\varphi = 176$ В. Чему будет равна скорость электрона v в точке В, если в точке А она равнялась нулю ?

19.4. Электрон летит по оси закрепленного кольца, заряженного положительно с линейной плотностью зарядов $\varkappa = 5 \cdot 10^{-7}$ Кл/м. Какова будет скорость электрона v в центре кольца, если на бесконечности она равна нулю ?

19.5. Два одинаковых заряда $q = +8 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся на расстоянии $L = 150$ см друг от друга. Какую работу A надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $l = 50$ см ?

22-я неделя. Электроемкость. Конденсаторы

Электроемкость. Единицы измерения емкости. Емкость уединенной сферы. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля.

Л-2, §§ 57-60; Л-6, стр. 41-44.

Задание 20

20.1. Разность потенциалов между пластинами конденсатора $\Delta\varphi = 2000$ В. При удалении диэлектрика из конденсатора разность потенциалов возрастает до $\Delta\varphi' = 4000$ В. Определить проницаемость ε диэлектрика.

20.2. Воздушный конденсатор с площадью каждой пластины $S = 500$ см^2 и расстоянием между ними $d = 10$ мм заряжен до разности потенциалов $U = 15$ кВ. Какая энергия W запасена в конденсаторе ? Какова будет энергия W_1 конденсатора при увеличении расстояния между пластинами до $d_1 = 4$ см?

20.3. Если два конденсатора соединить последовательно, то емкость такой системы равна $C' = 1{,}6$ мкФ, если же – параллельно, то емкость $C'' = 10$ мкФ. Найти емкости C_1 и C_2 каждого конденсатора.

20.4. В схеме соединения конденсаторов (рис. 2.1) известно, что $C_1 = 5$ мкФ, $C_2 = 20$ мкФ, $C_3 = 40$ мкФ.

Определить напряжения U_i и заряды q_i на каждом конденсаторе, если разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B = 36$ В.

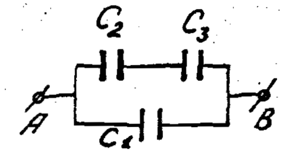


Рис. 2.1.

20.5. Плоскому воздушному конденсатору сообщен заряд $q = 10^{-7}$ Кл. Площадь обкладки конденсатора $S = 628$ см^2, расстояние между обкладками $d = 1$ мм. На какую величину ΔU изменится напряжение между обкладками конденсатора, если их раздвинуть на расстояние $d_1 = 3$ мм ?

23-я неделя. Постоянный ток

Электрический ток. Сила тока. Единица силы тока. Условия возникновения электрического тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника. Единица сопротивления. Удельное сопротивление. Зависимость удельного сопротивления от температуры. Реостаты. Последовательное и параллельное соединения проводников. Источники тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для замкнутой цепи.

Л-2, §§ 61-67, 69-70; Л-6, стр. 44-51.

Задание 21

21.1. Какую массу меди m нужно израсходовать для изготовления проволоки длиной $l = 5$ км, чтобы ее сопротивление было $R = 5$ Ом ? Плотность меди $D = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3, удельное сопротивление $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом.м.

21.2. Найти э.д.с. $\mathcal{E}$ источника тока, если при измерении напряжения на его зажимах вольтметром с внутренним сопротивлением $R_V = 90$ Ом получаем $U = 10{,}8$ В, а при замыкании на внешнее сопротивление R = 20 Ом по цепи течет ток I = 0,4 А.

21.3. Источник тока с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 150 В и внутренним сопротивлением r = 2,9 Ом питает током N_1 = 10 ламп сопротивлением по R_1 = 240 Ом и N_2 = 5 ламп сопротивлением по R_2 = 145 Ом каждая, соединенных параллельно. Найти напряжение U, под которым находятся лампы.

21.4. К источнику тока с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 24 В параллельно подключены сопротивление R = 120 Ом и конденсатор емкостью C = 30 мкФ. Определить заряд q на конденсаторе, если внутреннее сопротивление источника r = 10 Ом.

21.5. Два элемента с э.д.с. $\mathcal{E}_1$ = 1,25 В и $\mathcal{E}_2$ = 1,5 В и с одинаковыми внутренними сопротивлениями по r = 0,5 Ом соединены параллельно. Внешнее сопротивление R = 10 Ом. Найти токи, текущие во внешней цепи и в каждом элементе отдельно.

24-я неделя. Работа и мощность тока. Электрический ток в различных средах

Работа и мощность тока. Энергия электрического тока и ее превращение в другие виды. Закон Джоуля-Ленца. Внесистемная единица энергии токо-киловатт-час. Коэффициент полезного действия источника тока.

Ток в металлах. Электрический ток в жидкостях. Электролиз Законы Фарадея.

Электрический ток в газах.

Явление термоэлектронной эмиссии. Электрический ток в вакууме. Электронные лампы-диод и триод. Электронно-лучевая трубка. Л-2, §§ 68,71-87; Л-6, стр. 44-51.

Задание 22

22.1. Сколько электронов N проходит ежесекундно через поперечное сечение волоска лампы накаливания, если при напряжении U = 220 В лампа потребляет мощность P = 150 Вт ?

22.2. В электрическом чайнике две секции. При включении одной из них в сеть вода закипает через τ_1 = 20 мин., а при включении другой - через τ_2 = 30 мин. Сколько времени τ_a и $\tau_б$ потребуется для кипячения воды при включении обеих секций: а) последовательно; б) параллельно.

22.3. Источник постоянного тока замыкают один раз на сопротивление R_1 = 9 Ом, а второй раз - на R_2 = 4 Ом. В обоих случаях на каждом из этих сопротивлений за одинаковое время выделяется равное количество теплоты. Найти внутреннее сопротивление источника r.

22.4. На катоде гальванической ванны, содержащей раствор медного купороса, за t = 15 мин прохождения тока выделилось m = 3 г меди. Найти потребляемую мощность P, если сопротивление электролита R = 1,5 Ом.

22.5. Для покрытия металлического изделия площадью поверхности S = 500 см^2 электролитическим способом используют ток силой I = 1,5 А. Сколько времени t потребуется для покрытия изделия слоем серебра толщиной d = 50 мкм?

25-я неделя. Магнитное поле.

Магнитное взаимодействие. Магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля (вектор магнитной индукции). Линии магнитной индукции. Магнитное поле прямого тока, соленоида (катушки) с током.

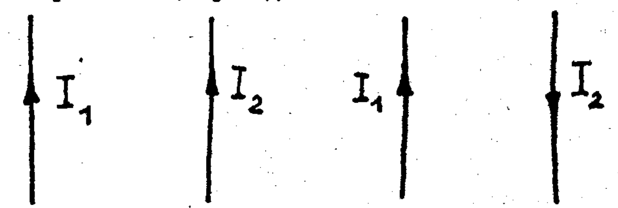
Закон Ампера. Правило левой руки. Силы, действующие на рамку с током в магнитном поле. Принцип действия амперметра и вольтметра магнитоэлектрической системы.

Магнитные свойства вещества. Гипотеза Ампера.

Литература: Л-2, §§ 88-92; Л-6, стр. 51-61.

Задание 23

23.1. Показать, что провод с током I_1 (рис. 2.2а) притягивается к проводу с током I_2, а в случае, изображенном на рис. 2.2б, провода отталкиваются.



а) б)

Рис. 2.2.

23.2. Определить направление тока в проводе, показанном на рис. 2.3.

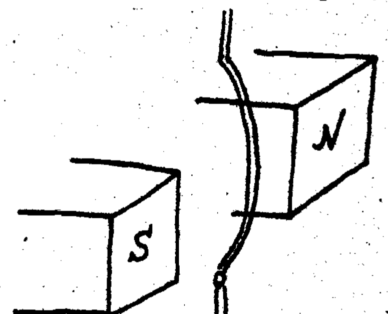


Рис. 2.3.

23.3. На длинный стальной сердечник с проницаемостью μ = 570 намотан провод диаметром d = 0,5 мм так, что витки плотно прижаты друг к другу и заполняют весь сердечник

в один слой. Определить индукцию B поля в середине сердечника при токе обмотки I = 0,7 А.

23.4. Прямой провод длиной l = 10 см, по которому течет ток I = 20 А, помещен в однородное поле с индукцией В = 10 мТл. Определить угол α между вектором $\vec{B}$ и проводом, если на провод действует сила F = 10 мН.

23.5. Рамка, содержащая N = 200 витков тонкого провода, подвешена на упругой нити в однородном магнитном поле так, что ее плоскость параллельна магнитным линиям. При какой силе тока I рамка повернется на угол $\alpha = 60^{\circ}$ от исходного положения, если площадь рамки S = 1 см^2, а при ее повороте на 1° возникает момент упругих сил нити $M_н$ = 25 нН·м. Индукция магнитного поля направлена горизонтально и равна B = 50 мТл.

26-я неделя. Сила Лоренца. Электромагнитная индукция

Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Определение удельного заряда электрона. Принцип действия циклотрона.

Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея по электромагнитной индукции. Магнитный поток.

Литература. Л-2, §§ 93-96, Л-6, стр. 51-67.

Задание 24.

24.1. Может ли электрон двигаться с постоянной скоростью $\vec{v}$ в однородном постоянном электромагнитном ($E \neq 0$, $B \neq 0$) поле?

24.2. Электрон с малой начальной скоростью попадает в однородное электрическое поле с напряженностью Е = 2 кВ/см, а затем, пролетев расстояние L = 50 см, в однородное магнитное поле с индукцией В = 5 мТл, индукция которого направлена перпендикулярно напряженности электрического поля. Определить радиус траектории R электрона в магнитном поле.

24.3. В малом циклотроне радиус дуантов R = I м, а максимальная разность потенциалов между ними U = I кВ. Оценить время τ нахождения частиц в циклотроне при индукции магнитного поля В = 0,I Тл.

24.4. Всегда ли в проводящем кольце, находящемся вблизи прямого провода, будет возникать индукционный ток при изменении тока в проводе ?

24.5. Электрон влетает в область, занятую однородным магнитным полем, индукция которого равна В = 10^{-4}Тл и перпендикулярна скорости электрона. Какова угловая скорость ω движения электрона в магнитном поле ?

27-я неделя. Электромагнитная индукция. Самоиндукция

Направление индукционного тока. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. ЭДС индукции в движущихся проводниках.

Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля.

Литература: Л-2, §§ 97-102; Л-6, стр. 61-67.

Задание 25

25.I. Определить силу тока в тонком проводящем кольце диаметром d = I0 см, находящемся в однородном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости витка и уменьшается пропорционально времени $B = B_0 - kt$,

где к = 0,I Тл/с. Сопротивление кольца R = 0,I Ом.

25.2. Электровоз после остановки трогает состав и при скорости $v = 36 \frac{км}{час}$ развивает силу тяги Т = I т . Найти ток I в обмотке мотора электровоза, если ее сопротивление R = 0,5 Ом, а напряжение на клеммах мотора U = 0,5 кВ.

25.3. Найти индуктивность L катушки с сердечником, если при равномерном убывании тока на ΔI = 2 А за время Δt = 2 мс в ней возникает ЭДС $\mathcal{E}$ = I0 В. Определить среднее значение магнитного потока Φ в сердечнике этой катушки, если она содержит N = I00 витков, а по обмотке течет ток I = I А.

25.4. В однородном магнитном поле с индукцией В = 60 мТл поступательно со скоростью v = 60 км/ч движется металлический стержень длиной l = I м. Вектор индукции $\vec{B}$ перпендикулярен стержню и составляет с вектором $\vec{v}$ угол $\alpha = 30^\circ$. Найти разность потенциалов U между концами стержня и напряженность E электростатического поля в нем.

25.5. Определить энергию магнитного поля W катушки, рассмотренной в задаче 3 настоящего задания, при токе в катушке I = I А.

28-я неделя. Контрольная работа № 3

I. Определить напряженность поля E и потенциал φ в точке, находящейся на одинаковом расстоянии r = I0 см от двух зарядов. Заряды равны по величине $q = 3\cdot10^{-6}$Кл и противоположны по знаку. Расстояние между зарядами также равно r = I0 см.

2. Плоский воздушный конденсатор емкостью C = 900 пФ заряжен до напряжения U = 200 В. Какую работу A надо совершить, чтобы увеличить в n = 2 раза расстояние между обкладками конденсатора ?

3. Во внешней цепи генератора постоянного тока выделяется мощность P_1 = 200 Вт при силе тока I_1 = 10 А. При изменении нагрузки сила тока возрастает до I_2 = 15 А, а полезная мощность - до P_2 = 240 Вт. Определить внутреннее сопротивление r, э.д.с. $\mathcal{E}$ и ток короткого замыкания I_0 генератора.

4. При пропускании тока через раствор медного купороса $CuSO_4$ за t = 15 мин на катоде выделилось m = 1,485 г меди. Определить потребленную мощность P, если сопротивление раствора R = 0,8 Ом.

5. Прямоугольная жесткая рамка содержит N = 100 витков провода сечением S = 0,1 мм^2 из материала с удельным сопротивлением ρ = 43 мк Ом·см. Рамку вносят в однородное магнитное поле с индукцией B = 1,5 Тл, двигая ее с постоянной скоростью v = 1 м/с так, что одна сторона рамки длиной a = 40 см параллельна границе поля, а другая - b = 30 см - перпендикулярна ей. При этом магнитные линии поля перпендикулярны плоскости рамки. Какую силу F приходится прикладывать к рамке, если начало и конец ее обмотки замкнуты ?

29-я неделя. Механические колебания

Свободные колебания. Гармонические колебания. Уравнение гармонического колебания. Смещение, амплитуда, фаза, период и частота колебаний. Единица измерения частоты. Упругие и квазиупругие силы. Математический и пружинный маятники. Период колебаний математического и пружинного маятников. Превращения энергии при гармонических колебаниях.

Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

Л-3, §§ 1-16; Л-6, стр. 67-77.

Задание 26

26.1. Как направлено ускорение шарика математического маятника при максимальном отклонении от положения равновесия? При прохождении положения равновесия ?

26.2. Шарик массы m = 10 г движется вдоль оси X под действием упругой силы F по закону $x = A\sin(2\pi\nu t + \frac{\pi}{4})$, где A = 5 см, ν = 2 Гц.

Найти величину силы F через время $t = \frac{5}{4}T$ после начала движения (T - период колебания).

26.3. Маятниковые часы за t = 1 сутки отстают на τ = 5 мин. На какое расстояние Δl надо передвинуть груз маятника, чтобы они шли точно ? Груз находится на расстоянии l = 50 см от точки подвеса.

26.4. Груз, подвешенный к вертикальной пружине, колеблется с частотой ν = 2 Гц. Скорость груза при прохождении положения равновесия v = 0,2 м/с. Какова амплитуда колебаний a ?

26.5. При какой скорости поезда v маятник длиной l = 20 см, подвешенный в вагоне, будет раскачиваться наиболее сильно, если расстояние между стыками рельсов L = 10 м ?

30-я неделя. Электромагнитные колебания

Превращение энергии в колебательном контуре. Зависимость периода колебаний в контуре от индуктивности и емкости (формула Томсона). Вынужденные колебания. Электронная лампа. Ламповый генератор.

Переменный ток.

Период и частота переменного тока. Действующее значение напряжения и силы тока. Генератор переменного тока. Трансформатор. Передача и распределение энергии.

Л-3, §§ 17-23, 29-36; Л-6, стр. 67-77.

Задание 27

27.1. Частота колебаний в контуре ν = 3 МГц, а емкость контура C = 50 пФ. Чему равна индуктивность L контура ?

27.2. Во сколько раз изменится частота собственных колебаний контура, если между пластинами воздушного конденсатора, входящего в контур, ввести пластину из диэлектрика (ε = 4), толщина которой вдвое меньше расстояния между пластинами конденсатора ?

27.3. Максимальный ток в колебательном контуре $I = 10^{-3}$ А, а максимальный заряд на обкладках конденсатора $q = 10^{-5}$ Кл. Каков период T свободных электрических колебаний, происходящих в контуре?

27.4. Действующее значение напряжения в сети переменного тока U = 220 В. Определить промежуток времени τ, в течение которого в каждый полупериод горит неоновая лампа, если она зажигается и гаснет при напряжении U_0 = 84 В.

27.5. От вторичной обмотки трансформатора с сопротивлением R = 0,1 Ом питаются N = 1000 параллельно включенных электроламп мощностью P = 100 Вт каждая. Лампочки рассчитаны на напряжение U = 220 В. Найти к.п.д. трансформатора η , пренебрегая потерями в первичной обмотке и сердечнике.

31-я неделя. Волны

Механические волны. Поперечные и продольные волны. Скорость волны. Длина волны. Зависимость между длиной волны, скоростью распространения и частотой.

Звуковые волны. Скорость звука. Громкость и высота звука. Ультразвук.

Излучение и прием электромагнитных волн.

Скорость электромагнитных волн. Изобретение радио А.С.Поповым. Использование диода для выпрямления переменного тока.

Л-3, §§ 37-45, 50-64; Л-6, стр. 67-77.

Задание 28

28.1. Волны распространяются в упругой среде со скоростью v = 3000 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, фазы колебаний в которых противоположны, L = 10 см. Определить частоту колебаний ν .

28.2. Две точки находятся на прямой, вдоль которой распространяются звуковые волны. Расстояние между точками d = 30 м. Скорость распространения волн v = 300 м/с, период колебаний T = 0,001 с.

Найти разность фаз $\Delta\varphi$ в этих точках.

28.3. Определить длину L железной трубы, если звук от удара по трубе у одного конца слышен около другого конца дважды с интервалом времени τ = 0,5 с ? Скорость звука в воздухе v_1 = 340 м/с, скорость звука в железе v_2 = 5300 м/с.

28.4. На каком расстоянии от радиолокатора находится самолет, если отраженный сигнал зарегистрирован через $t = 2 \cdot 10^{-4}$ с после излучения импульса?

28.5. Колебательный контур радиоприемника имеет индуктивность L = 0,32 мГн и конденсатор переменной емкости. Радиоприемник может принимать волны длиной от λ_1 = 188 м до λ_2 = 545 м.
В каких пределах изменяется емкость конденсатора ?

32-я неделя. Законы отражения света. Зеркала

Световые лучи.

Прямолинейное распространение света.

Законы отражения света. Плоское зеркало. Сферические зеркала. Построение изображений в зеркалах. Мнимое изображение.

Л-3, §§ 65, 66, 69, 70, 71; Л-6, стр. 77-88.

Задание 29

29.1. На какой угол φ повернется луч, отраженный от плоского зеркала,при повороте последнего на угол $\delta = 20^\circ$?

29.2. Построить дальнейший ход луча SA, отраженного от сферического зеркала, изображенного на рис. 2.4. Центр кривизны зеркала находится в точке 0.

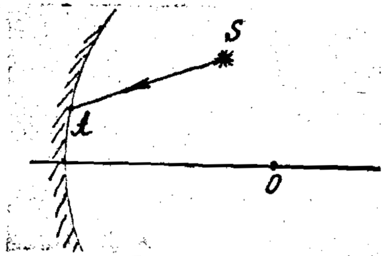


Рис. 2.4.

29.3. Человек ростом h = 1,8 м, стоящий на берегу озера, видит Луну в небе по направлению, составляющему угол $\varphi = 45^\circ$ с горизонтом. На каком расстоянии ℓ от себя человек видит отражение Луны в озере ?

29.4. Когда предмет находится на расстоянии d = 2 м от вогнутого сферического зеркала, его действительное изображение получается на расстоянии f = 50 см от зеркала. Где и какое получится изображение этого предмета, если его отодвинуть от зеркала еще на ℓ = 1,2 м ?

29.5. На расстоянии d = 150 см от выпуклого сферического зеркала с радиусом кривизны R = 72 см расположена светящаяся точка. Определить расстояние L светящейся точки от ее изображения.

33-я неделя. Законы преломления света

Закон преломления света. Полное отражение. Ход лучей в плоскопараллельной пластинке. Ход лучей в призме.

Л-3, §§ 72, 73, 74; Л-6, стр. 77-88.

Задание 30

30.1. В дно водоема глубиной H = 2 м вбита свая, на h = 0,5 м выступающая из воды.

Найти длину тени L от сваи на дне водоема при угле падения лучей $\alpha = 45^\circ$.

30.2. Из центра плота в воду на глубину H = I0 м опущена электрическая лампочка. Чему должен быть равен минимальный радиус плота r , чтобы ни один луч от лампочки не мог пройти через поверхность воды ? Показатель преломления воды равен n = I,33.

30.3. Луч света выходит из трехгранной стеклянной призмы под углом δ = 32°. Преломляющий угол призмы φ = 35°. Найти угол падения луча α и угол ε его отклонения от первоначального направления.

30.4. Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку под углом α = 60°. Какова толщина пластинки d, если при выходе из нее луч сместился на x = 2 см ? Показатель преломления стекла n = I,5.

30.5. Какова толщина d плоскопараллельной стеклянной пластинки, если точку, нанесенную чернилами на задней стороне пластинки, наблюдатель видит на расстоянии ℓ = 5 см от передней поверхности ? Луч зрения перпендикулярен к поверхности пластинки. Показатель преломления стекла n = I,6.

34-я неделя. Линзы. Оптические приборы

Тонкие линзы. Оптическая сила линзы. Диоптрия. Ход лучей в линзах. Построение изображений в собирающих и рассеивающих линзах. Формула линзы. Увеличение линзы.

Оптические приборы: лупа, фотоаппарат, проекционный аппарат.

Л-3, §§ 75-80; Л-6, стр. 88-94.

Задание 3I

3I.I. Линза с фокусным расстоянием F = I6 см дает резкое изображение предмета при двух положениях, расстояние между которыми ℓ = 60 см. Найти расстояние x от предмета до экрана.

3I.2. Определить оптическую силу D рассеивающей линзы, если известно, что предмет, помещенный перед линзой на расстоянии d = 40 см, дает изображение, уменьшенное в k = 4 раза.

3I.3. Определить оптическую силу лупы D , дающей увеличение в k = 4 раза.

3I.4. Диапозитив представляет собой квадрат со стороной a = 8 см. Определить фокусное расстояние F объектива проекционного фонаря, если на экране, отстоящем на расстоянии L = 4 м от него, получается изображение размером A = 2м ?

3I.5. Объектив фотоаппарата имеет фокусное расстояние F = I0 см. На каком расстоянии d от объектива должен быть помещен предмет, чтобы снимок получился в I/I0 натуральной величины ?

35-я неделя. Волновые и квантовые свойства света

Дисперсия света. Дисперсия показателя преломления. Спектроскоп. Спектры излучения и поглощения. Инфракрасная и ультрафиолетовая части спектра. Понятие о спектральном анализе.

Интерференция волн. Когерентные источники. Дифракция волн. Дифракционная решетка. Дифракционный спектр.

Фотоэффект. Работы Столетова по фотоэффекту. Законы фотоэффекта. Красная граница фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна.

Л-3, §§ 81-91; 105-110, 111-115; Л-6, стр. 94-97.

Задание 32

31.1. Показатель преломления воды n = 1,33. Определить длину волны λ желтых лучей в воде, если в воздухе их длина λ_0 = 580 нм.

32.2. Энергия фотона рентгеновского излучения длиной волны λ_p = 2 Å в k = 3000 раз больше энергии фотона видимого света. Определить длину волны $\lambda_в$ фотона видимого света.

32.3. Определить энергию ε и массу m фотона, длина волны которого λ = 0,5 мкм.

32.4. Работа выхода фотоэлектронов из металла A = 4эВ. Металл освещается ультрафиолетовыми лучами длиной волны λ = 300 нм. Определить максимальную энергию вылетевших электронов $E_{макс}$.

32.5. Работа выхода электронов из никеля A = 5 эВ. На никель падает излучение с длиной волны λ = 1800 Å. Определить длину волны λ_0 красной границы фотоэффекта и скорость вылетающих фотоэлектронов v.

36-я неделя. Строение и свойства атома и атомного ядра

Строение атома. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома. Постулаты Бора. Объяснение спектральных закономерност

Состав ядра, его заряд, масса. Нуклоны. Дефект массы. Энергия связи ядра. Распад ядер. Естественная радиоактивност

Деление ядер урана. Цепная реакция.

Ядерная энергия и принципы ее получения.

Элементарные частицы. Способы их наблюдения и регистрации.

Л-3, §§ 119-123, 126-141, 145; Л-6, стр. 97-100.

Задание 33

33.1. Найти наибольшую и наименьшую длины волн спектральных линий водорода в видимой области спектра.

33.2. Вычислить полную энергию E электрона на первой боровской орбите (радиус орбиты r_1 = 0,53 Å).

33.3. Определить длину света λ, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с номером n = 3 в состояние с номером m = 2.

33.4. Вычислить дефект массы Δm и энергию связи ядра ${}^7_3Li \cdot E_{св}$, приняв массу ядра равной $M_я$ = 7,0160 а.е.м. Массы протона и нейтрона соответственно m_p = 1,0078 а.е.м., m_n= 1,0087 а.е.м.

33.5. При соударении дейтерия с ядром бериллия ${}^9_4Be$ испускается нейтрон. Запишите эту реакцию в символических обозначениях.

37-я неделя. Контрольная работа № 4

1. Определить показатель преломления воды n, если при стинной глубине водоема H = 3 м человеку, глядящему с оста, глубина кажется равной h = 2 м. Сделать рисунок.

2. Один и тот же предмет фотографируют дважды: с расстояния d_1 = 90 и d_2 = 165 см. Высота предмета на снимке оказалась соответственно равной h_1 = 4 и h_2 = 2 см. пределить фокусное расстояние F объектива фотоаппарата.

3. Красная граница фотоэффекта для калия соответствует длине волны λ = 0,6 мк. Определить работу выхода A электронов из калия.

4. Найти построением ход луча после прохождения собирающей (рис. 2.5а) и рассеивающей (рис. 2.5б) линз. F_1 и F_2 – фокусы линз.

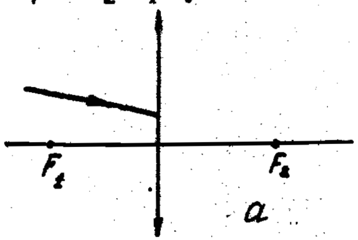
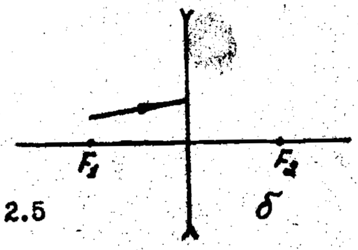


Рис. 2.5



5. Конденсатор емкостью C = 10 мкФ зарядили от источника тока с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 4,6В. Затем, отключив от источника, подсоединим к катушке с индуктивностью L = 2,5 мГн. Пренебрегая активным сопротивлением катушки, найдите действующее значение силы тока I в контуре.

38-я неделя

Задание 33. Задачи, предлагавшиеся на выпускных экзаменах в 1981 году

1. Два конденсатора C_1= 1 мкФ и C_2= 2 мкФ заряжены до напряжений U_1 = 100 В и U_2 = 300 В. Какова энергия систем конденсаторов после их параллельного соединения? Сколько тепла выделилось при этом соединении ?

(Московский институт управления).

2. Есть две 120-вольтные лампы: одна мощностью 90 Вт, вторая – 40 Вт. Какая из этих ламп будет ярче гореть, если и

включить последовательно в цепь с напряжением 220 В ?

(Днепропетровский металлургический институт).

3. Однородное электрическое E = 300 В/м и магнитное $B = 10^{-4}$ Тл поля направлены взаимно перпендикулярно. Каковы должны быть направление и величина скорости электрона, чтобы его траектория была прямолинейна.

(Московский полиграфический институт).

4. Найдите увеличение собирающей линзы, если фокусное расстояние линзы 4 см и расстояние между предметом и изображением 24 см.

(Таллинский политехнический институт).

5. Длина волны 6000 Å является предельной, при которой еще наблюдается фотоэффект. Определить скорость вылетевших электронов при облучении фотокатода светом с длиной волны 5000 Å.

(Московское высшее техническое училище).

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

3.1. Электростатика

Согласно закону Кулона сила взаимодействия двух точечных зарядов, находящихся в вакууме, пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль прямой, проходящей через их центры:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Эта сила является силой притяжения, если заряды разного знака, и силой отталкивания, если заряды одного знака.

В СИ величины зарядов измеряются в кулонах (Кл), сила – в ньютонах (Н), поэтому коэффициент пропорциональности имеет размерность Н · м^2/Кл^2, которая совпадает с размерностью м/Ф (метр на фарад). Коэффициент пропорциональности часто записывают в виде

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Для практических расчетов удобно брать $k = 9\cdot10^9$ м/Ф.

При взаимодействии зарядов, находящихся в среде, величина силы рассчитывается по формуле

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Любой электрический заряд или систему зарядов окружает электрическое поле, силовой характеристикой которого является

напряженность. Напряженность поля в данной точке определяется как векторная величина, равная отношению силы $\vec{F}$, которая действует на помещенный в эту точку точечный заряд, к величине этого заряда q:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Используя закон Кулона, можно определить напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом Q на расстоянии r от него:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}.$$

Если электрическое поле создается системой зарядов, то напряженность его может быть определена с помощью принципа суперпозиции:

напряженность электрического поля, создаваемого несколькими точечными зарядами в некоторой точке, равна сумме напряженностей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots$$

Электрический заряд q, помещенный в любую точку электрического поля, обладает потенциальной энергией

$$\Pi = q\varphi,$$

φ – энергетическая характеристика поля, которая называется потенциалом электрического поля в данной точке.

Потенциал данной точки электрического поля равен отношению работы A, совершаемой силами поля при перемещении некоторого заряда из бесконечности в данную точку поля, к величине этого заряда q:

$$\varphi = \frac{A}{q}.$$

Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении заряда q из одной точки поля в другую, равна произведению заряда q на разность потенциалов между этими точками $\varphi_1 - \varphi_2$:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Если электрическое поле сферически симметрично, то есть создается точечным зарядом либо равномерно заряженной сферой, то потенциал любой точки поля, находящейся на расстоянии от этого заряда r, равен:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}.$$

Внутри сферы, равномерно заряженной по поверхности, потенциал постоянен и равен потенциалу на поверхности.

Для <u>однородного электрического поля</u> (такое поле, в каждой точке которого напряженность одинакова) справедлива связь между напряженностью E и разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между любыми двумя точками, лежащими на одной силовой линии и находящимися на расстоянии d друг от друга:

$$|\varphi_1 - \varphi_2| = Ed.$$

Для определения знака разности потенциалов следует иметь в виду, что потенциал убывает в направлении силовой линии.

При решении ряда задач по электростатике полезно руководствоваться следующими правилами:

1. Выбрав инерциальную систему отсчета, сделать чертеж и обозначить все силы, действующие на заряженные тела.

2. Если по условию задач заряженное тело находится в покое, то нужно записать условия равновесия.

Если рассматриваемое в задаче заряженное тело движется, необходимо на основе второго закона Ньютона записать уравнение движения или уравнение, выражающее закон сохранения энергии (или то и другое вместе).

3. Выразив силы и энергию электрического взаимодействия через величины зарядов, напряженности полей и потенциалы, действовать далее теми же методами, что и в механике.

<u>Задача 3.1.1</u>

Два точечных заряда $q_1 = 10^{-8}$ Кл и $q_2 = -1{,}5 \cdot 10^{-8}$ Кл расположены на расстоянии $a = 1$ см друг от друга. Найти напряженность электрического поля E в точке, которая находится на расстоянии a от заряда q_2 по перпендикуляру к линии, соединяющей заряды.

$q_1 = +10^{-8}$ Кл;

$q_2 = -1{,}5 \cdot 10^{-8}$ Кл;

$a = 10^{-2}$ м;

E – ?

Рис. 3.1

Решение

Сделаем чертеж (рис. 3.I) учитывая, что результирующая напряженность $\vec{E}$ поля определяется, согласно принципу суперпозиции, как векторная сумма напряженностей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 .$$

Величина E может быть найдена по теореме косинусов

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\alpha_1} .$$

Учитывая, что $90^\circ - \alpha = \alpha_1 = 45^\circ$, $E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|}{(a\sqrt{2})^2}$,

$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_2|}{a^2}$, получим окончательно:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{2a^2}\sqrt{q_1^2 + 4q_2^2 - 2\sqrt{2}|q_1q_2|} = 1{,}2\cdot10^6$$

Задача 3.I.2

В масло помещен медный шарик диаметром d = I см. Плотность меди ρ_1 = 8 900 кг/м³, масла – ρ_2 = 800 кг/м³; ди электрическая проницаемость масла ε = 5. Определить заряд q на шарике, если в однородном электрическом поле напряжен ностью E = 3,6 . I0⁶В/м, направленном вертикально вверх, шарик оказался взвешенным в масле.

d = 0,0I м;
ε = 5;
ρ_1 = 8 900 кг/м³;
ρ_2 = 800 кг/м³;
E = 3,6·I0⁶В/м;

q – ?

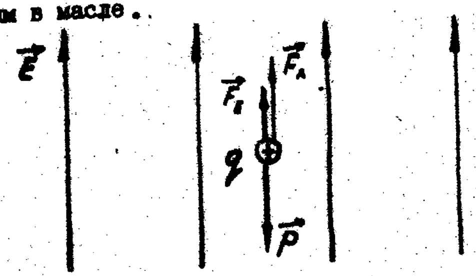


Рис. 3.2

Решение

Сделаем чертеж (рис. 3.2), указав силы, действующие на заряд.

Обозначения:

$\vec{F}_A$ – сила Архимеда;
$\vec{F}_E$ – сила со стороны электрического поля;
$\vec{P}$ – сила тяжести

Так как шарик находится во взвешенном состоянии, т.е. в состоянии равновесия, то векторная сумма всех действующих сил равна нулю; $\vec{P} + \vec{F}_E + \vec{F}_A = 0$

или, учитывая направления сил, $P = F_A + F_E$.

Выразим силы через параметры шарика и среды:

$$P = mg = \rho_1 V g;\ F_E = qE;\ F_A = \rho_2 V g,$$

где $V = \frac{1}{6}\pi d^3$ - объем шарика;

тогда
$$q = \frac{\pi d^3(\rho_1 - \rho_2)}{6E}g = 1{,}1\cdot10^{-8}\text{ Кл}.$$

Задача 3.I.3

Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобретает скорость v = I0⁸см/сек. асстояние между пластинами d = 5 мм. Найти разность отенциалов $\Delta\varphi$ между пластинами и напряженность E лектрического поля.

v = I0⁶м/сек;
d = 0,005 м ;
m = 9·I0⁻³ᴵ кг ;
e = I,6·I0⁻ᴵ⁹ Кл ;

$\Delta\varphi$ – ? E – ?

Решение

Пройдя от одной пластины до другой, электрон приобретает кинетическую энергию за счет работы сил поля конденсатора, поэтому

$$\frac{mv^2}{2} = e\Delta\varphi .$$

Отсюда

$$\Delta\varphi = \frac{mv^2}{2e} \approx 2,8\ B .$$

Так как напряженность для однородного электрического поля связана с разностью потенциалов соотношением

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}, \quad \text{то} \quad E = \frac{mv^2}{2ed} \approx 560\ В/м.$$

Задача 3.I.4

Металлическая сфера радиусом R = 0,15 м заряжена так, что ее потенциал φ = 120 В. Найти плотность заряда на поверхности сферы σ.

φ = 120 В ;
R = 0,15 м ;

σ - ?

Решение

По определению, поверхностная плотность заряда σ равна отношению величины заряда к площади поверхности: $\sigma = Q/S$.

Величина заряда определяется из формулы для расчета потенциала:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}.$$

Площадь сферы $S = 4\pi R^2$.

Следовательно,

$$\sigma = \varepsilon_0\frac{\varphi}{R} \approx 7,1\cdot 10^{-9}\ Кл/м^2 .$$

Задача 3.I.5

Под действием светового облучения с поверхности металлической сферы радиуса R = 10 см вылетают электроны со скоростью v = 10 м/сек, в результате чего сфера заряжается. До какого максимального заряда Q можно таким образом зарядить сферу, если для электрона e/m =0,176·10^{12} Кл/кг.

R =0,1 м ;
v = 10 м/сек ;
e/m =0,176·10^{12} $\frac{Кл}{кг}$;

Q - ?

Решение

Электроны при вылете с поверхности сферы обладают кинетической энергией $mv^2/2$.

Электроны могут покидать сферу до тех пор, пока потенциал ее не достигнет такой величины, что работа сил поля, препятствующих удалению электрона от поверхности, будет равна кинетической энергии электрона:

$$e\varphi = \frac{mv^2}{2}.$$

Зная связь потенциала сферы с зарядом на ней $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$, получим выражение для определения величины максимального заряда:

$$Q = \frac{m}{e}\,2\pi\varepsilon_0 v^2 R \approx 4\cdot 10^{-20}\ Кл .$$

Задача 3.I.6

Две металлические сферы радиусов R_1 = 20 мм и R_2= 45 мм, несущие заряды q_1 = - 2,0·10^{-9}Кл и q_2= 9,0·10^{-10}Кл соответственно, находятся друг от друга на расстоянии ℓ = 1 м. Определить потенциалы сфер. Каким станет заряд q_2' сферы радиуса R_2, если ее заземлить, а потом проволоку убрать ? Радиусами сфер по сравнению с расстоянием между ними пренебречь. Считать, что сферы находятся далеко от поверхности Земли и других предметов.

$R_1 = 0{,}02$ м ;
$R_2 = 0{,}045$ м ;
$q_1 = -2{,}0\cdot 10^{-9}$ Кл ;
$q_2 = 9{,}0\cdot 10^{-10}$ Кл ;
$\ell = 1$ м ;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_2' - ?$

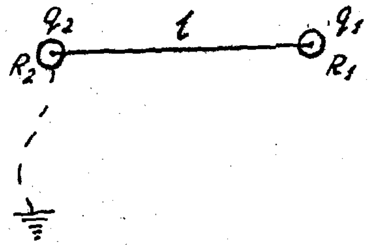


Рис. 3.3

Решение

Так как сферы находятся далеко от других предметов, вокру[г] них существует электростатическое поле, созданное только зарядами q_1 и q_2. По принципу суперпозиции потенциал любой из сфер будет равен сумме потенциалов полей, созданн[ых] каждым из зарядов в отдельности.

Используя выражения для потенциала поля заряженной сферы, получим:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{R_1} + \frac{q_2}{\ell}\right) = -0{,}89 \text{ кВ}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_2}{R_2} + \frac{q_1}{\ell}\right) = 0{,}16 \text{ кВ}$$

После заземления сфера радиуса R_2 за счет электро[стати]ч[е]ской индукции приобретает заряд q_2', противополо[жный] по знаку заряду первой сферы. При этом потенциал φ_2' заз[емлен]ной сферы будет равен нулю. Ее потенциал не изменится после того, как проволоку уберут. По принципу суперпозиц[ии]

$$\varphi_2' = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_2'}{R_2} + \frac{q_1}{\ell}\right) = 0,$$

откуда

$$q_2 = -q_1\frac{R_2}{\ell} \approx 9\cdot 10^{-11} \text{ Кл}.$$

3.2. Электроемкость

Электроемкостью уединенного проводника называется отношение заряда q на нем к его потенциалу φ :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Емкость проводника определяется его геометрической формой и размерами, диэлектрической проницаемостью среды и расположением по отношению к другим (соседним) проводникам. В частности, емкость уединенной сферы радиуса R , находящейся в среде с диэлектрической проницаемостью ε , равна

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$$

Два проводника, изолированных друг от друга диэлектриком, образуют конденсатор. Абсолютная величина заряда одной из обкладок конденсатора Q пропорциональна модулю разности потенциалов U между обкладками : $Q = CU$.

Емкость плоского конденсатора $C = \varepsilon_0\varepsilon S/d$,

где S - площадь пластин, d - расстояние между ними.

При параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей конденсаторов, образующих батарею:

$$C = C_1 + C_2 + \ldots$$

При последовательном соединении общая емкость определяется из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots$$

Заряженный конденсатор обладает энергией, величину которой можно вычислить из соотношений:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

Плотность энергии электрического поля (т.е. энергия, приходящаяся на единицу объема)

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}.$$

При решении задач на расчет поля или заряда конденсаторов необходимо учитывать, что если конденсатор подключен к источнику тока, то при изменении расстояния между его обкладками или введении между ними каких-либо пластин разность потенциалов между обкладками будет неизменной. Если же конденсатор заряжен и отключен от источника тока, то при указанных операциях не будет меняться заряд конденсатора.

Задача 3.2.1

Расстояние между пластинами плоского конденсатора d = 2 мм. Конденсатор заряжен до разности потенциалов U = 400 В. Найти поверхностную плотность заряда σ на его пластинах, учитывая, что между ними находится воздух.

$d = 2 \cdot 10^{-3}$ м ;

U = 400 В ;

ε = 1 ;

σ - ?

Решение

Поверхностная плотность заряда равна $\sigma = Q/S$,

где Q - заряд, S - площадь пластины.

Величина заряда вычисляется по формуле $Q = CU$,

а емкость плоского конденсатора - из соотношения

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d.$$

Таким образом, плотность заряда выражается в виде

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U}{d} = 1{,}8 \cdot 10^{-4}\ Кл/м^2.$$

Задача 3.2.2

Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов U_1 = 50 В и отключен от источника. После этого между пластинами конденсатора вставляется стеклянная пластинка (ε = 6). Определить установившуюся при этом разность потенциалов U_2.

U_1 = 50 В ;

ε = 6 ;

U_2 - ?

Решение

Так как заряд на конденсаторе не меняется, то $C_1 U_1 = C_2 U_2$.

С другой стороны, отношение емкости конденсаторов с диэлектриком и без него равно $\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{\varepsilon}$.

Т.о., разность потенциалов на пластинах конденсатора после введения стеклянной пластины будет

$$U_2 = U_1 \frac{1}{\varepsilon} = 8{,}3\ В.$$

Задача 3.2.3

Плоский конденсатор с диэлектриком ($\varepsilon_д$ = 4) приобрел энергию W_1 = 0,12 Дж от подключенного к нему источника тока. Из конденсатора удаляется диэлектрик, причем источник тока не отключается. Определить работу A, совершаемую внешними силами при удалении диэлектрика.

$\varepsilon_g = 4$;
$\varepsilon_b = 1$;
$W_1 = 0{,}12$ Дж;

A - ?

Решение

Работа внешних сил по удалению диэлектрика равна разности энергий конденсатора с диэлектриком W_1 и без него W_2:

$$A = W_2 - W_1 .$$

Выражая энергию конденсатора через его емкость и разность потенциалов, получим: $A = \frac{1}{2}(C_2 - C_1)U^2$,

где C_1 и C_2 - емкость конденсатора с диэлектриком и без него соответственно. Отношение емкостей конденсаторов равно отношению диэлектрических проницаемостей сред, заполняющих конденсатор, $C_1/C_2 = \varepsilon_g/\varepsilon_b$, поэтому $C_2 = C_1\varepsilon_b/\varepsilon_g$

Подставляя это выражение в формулу работы, окончательно имеем

$$A = \frac{1}{2}C_1U^2\left(\varepsilon_b/\varepsilon_g - 1\right) = W_1\left(\varepsilon_b/\varepsilon_g - 1\right) = -0{,}09 Д$$

3.3. Постоянный электрический ток

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц.

Постоянным электрическим током является ток, который не меняется во времени. Сила тока определяется выражением

$$I = \frac{q}{t},$$

где q - заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за время t.

В Международной системе единиц (СИ) единица силы тока - ампер (А) является одной из четырех основных единиц (кг,м,с,А) и определяется на основе магнитного взаимодействия токов (см.стр.56 настоящего пособия).

Для участка цепи, на концах которого поддерживается разность потенциалов U, выполняется закон Ома:

$$I = \frac{U}{R},$$

где R - сопротивление проводника. Сопротивление проводника с постоянным поперечным сечением S и известной длины l можно рассчитывать, зная его удельное сопротивление ρ, с помощью формулы:

$$R = \rho\frac{l}{S}.$$

Зависимость удельного сопротивления металлических проводников от температуры t (по шкале Цельсия) определяется выражением:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где α - температурный коэффициент сопротивления, а ρ_0 - удельное сопротивление проводника при температуре 0°С.

Если имеется замкнутая электрическая цепь, содержащая источник тока с электродвижущей силой $\mathcal{E}$, внутренним сопротивлением r и внешнее сопротивление R, то силу тока в этой цепи можно рассчитать по формуле:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

(закон Ома для замкнутой цепи).

При последовательном соединении проводников общее сопротивление равно сумме сопротивлений этих проводников:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots$$

При параллельном соединении общее сопротивление определяется из соотношения:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$$

Если замкнутая электрическая цепь содержит n последовательно соединенных источников тока, каждый с внутренним сопротивлением r и электродвижущей силой $\mathcal{E}$, то сила тока в цепи определяется из выражения вида:

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R+nr}.$$

Если же полная электрическая цепь содержит n параллельно соединенных источников тока, то сила тока в цепи равна:

$$I = \mathcal{E}/(R+\frac{r}{n}).$$

Из закона Ома для замкнутой цепи имеем

$$IR = \mathcal{E} - Ir.$$

Произведение IR равно разности потенциалов $\Delta\varphi$ на концах внешней цепи, или, что то же, на зажимах источника, поэтому

$$\Delta\varphi = \mathcal{E} - Ir.$$

Это равенство называют законом Ома для участка цепи, содержащей э.д.с.

При прохождении тока I по проводнику, на концах которого поддерживается разность потенциалов U, за время t электрическими силами совершается работа

$$A = IUt,$$

ибо при перемещении заряда q в электрическом поле с разность потенциалов U совершаемая работа равна $A = qU$. Результатом этой работы является передача окружающим телам эквиалентного количества энергии в разных видах. Если она выделяется в виде теплоты, то ее можно вычислить из соотношени

$$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t.$$

Мощность постоянного тока определяется из формул:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

При электролизе масса вещества, выделившегося на электродах, пропорциональна заряду, прошедшему через раствор или расплав электролита

$$m = kq = kIt,$$

где k – электрохимический эквивалент (различный для разных [illegible]). В свою очередь электрохимические эквиваленты веществ [illegible]ны их атомным массам $A_м$ и обратно пропорционально [illegible]ностям n:

$$k = \frac{1}{F}\frac{A_м}{n},$$

[illegible] $9{,}65\cdot10^4$ Кл/моль – число Фарадея. Используя две [illegible] формулы, можно записать:

$$m = \frac{A_м}{n}\frac{I}{F}t.$$

Задача 3.3.I

Электрическая цепь состоит из двух параллельно соединенных сопротивлений R_1 = 40 Ом и R_2 = 10 Ом, подключенных к зажимам аккумулятора с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 10 В. Ток в общей цепи равен I = 1 А. Найти внутреннее сопротивление аккумулятора r и ток короткого замыкания $I_к$.

R_1 = 40 Ом ;
R_2 = 10 Ом ;
$\mathcal{E}$ = 10 В ;
I = 1 А ;

---

r – ?
$I_к$ – ?

Решение

Используя закон Ома для замкнутой цепи и правило расчета параллельно соединенных сопротивлений, получим

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+r}.$$

Отсюда

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I} - \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = 2\ Ом.$$

Ток короткого замыкания равен

$$I_к = \frac{\mathcal{E}}{r} = 5\,А .$$

Задача 3.3.2

К источнику тока с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 5 В и внутренним сопротивлением r = I Ом параллельно подключены сопротивление R = 3 Ом и конденсатор емкостью C = 4 мкФ. Определить заряд Q на обкладке конденсатора.

$\mathcal{E}$ = 5 В ;
r = I Ом ;
C = 4 мкФ ;
R = 3 Ом ;

Q - ?

Решение

Заряд на конденсаторе при известной его емкости определяется разностью потенциалов на пластинах:

$$Q = CU ,$$

которая, в свою очередь, равна падению напряжения на сопротивлении (ибо тока через конденсатор нет). Согласно закону Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, а напряжение на сопротивлении (и на конденсаторе) $U = IR = \frac{\mathcal{E}R}{R+r}$.

Таким образом, окончательно получим

$$Q = \frac{C\mathcal{E}R}{R+r} = 1,5\cdot 10^{-5}\,Кл .$$

Задача 3.3.3

Генератор с э.д.с. $\mathcal{E}$ = I40 В и внутренним сопротивлением r = 0,I Ом питает n = 240 ламп, включенных параллельно, каждая сопротивлением R_0 = 360 Ом. На зажимах ламп должно быть обеспечено напряжение U_0 = I20 В. Какого сечения S алюминиевой провод надо поставить в двухпроводную линию, если расстояние от генератора до здания $l = 300$ м ? Каково напряжение U на зажимах генератора ? Чему равен к.п.д. генератора η?

$\mathcal{E} = 140$ В ;
$n = 240$;
$R_0 = 360$ Ом ;
$U_0 = 120$ В ;
$r = 0{,}1$ Ом ;
$l = 600$ м ;
$\rho = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ом.м ;

U - ?
S - ?
η - ?

Решение

Напряжение на зажимах генератора $U = \mathcal{E} - Ir$. Входящую сюда силу тока определим из закона Ома для участка цепи, учитывая, что сопротивление включенных параллельно ламп меньше сопротивления одной лампы в n раз:

$$I = \frac{U_0}{R_0/n}.$$

Таким образом, $U = \mathcal{E} - \frac{U_0 r n}{R_0} = 132$ В.

Сечение проводрв можно найти из соотношения $R = \rho l / S$, а сопротивление проводов $R = (U - U_0)/I$.

Окончательно, сечение $S = \frac{I \rho l}{U - U_0} = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ м^2.

К.п.д. генератора $\eta = \frac{U_0 I}{\mathcal{E} I} = U_0/\mathcal{E} = 0{,}86$.

Задача 3.3.4

Какую мощность P можно передать потребителю по медным проводам сечением $S = 18$ мм^2, имеющим общую длину $l = 1500$ м, если напряжение на электростанции $U = 230$ В, а допустимые потери напряжения в проводах не должны превышать $k = 10\%$?

$S = 18 \cdot 10^{-6}$ м^2 ;
$\rho = 17 \cdot 10^{-7}$ Ом$\cdot$м ;
$l = 1500$ м ;
$U = 230$ В ;
$k = 0{,}1$;

P - ?

Решение

Напряжение U_0 на установке потребителя $U_0 = U(1-k)$, поэтому мощность P, используемая потребителем, $P = IU_0 = IU(1-k)$.

Максимальное значение силы тока I,

допустимое при передаче, определяется как отношение падения напряжения на проводах $U_{пр}$ к величине их сопротивления:

$$I = \frac{U_{пр}}{R} = \frac{\kappa U}{\rho l} S .$$

Окончательно,

$$P = \frac{\kappa(1-\kappa)U^2 S}{\rho l} = 3{,}4 \text{ кВт}.$$

Задача 3.3.5

При электролизе медного купороса за время t = I час выделяется m = 0,5 г меди. Площадь электродов, опущенных в электролит, S = 75 см^2. Найти плотность тока j.

t = 3600 с ;
$m = 5 \cdot 10^{-4}$ кг ;
$S = 75 \cdot 10^{-4}$ м^2 ;
A = 0,064 кг/моль ;
n = 2 ;

j - ?

Решение

Плотность тока j - это отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S} .$$

Из обобщенного закона Фарадея следует, что

$$I = \frac{mFn}{At} , \quad а \quad j = \frac{mFn}{AtS} = 56$$

Задача 3.3.6

Электрочайник содержит m = 720 г воды при t = 20°С. Через какое время закипит вода в чайнике, если напряжение в сети U = 120 В, ток I = 4 А, а потери составляют

η = 20% ?
m = 0,72 кг
t = 20°С
$t_{кип}$ = 100°С
U = 120 В
I = 4 А
η = 0,2
$c = 4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/кг·К

τ - ?

Решение

Составим уравнение теплового баланса

$$cm(t_{кип} - t) = (1-\eta)UI\tau .$$

Отсюда

$$\tau = \frac{cm(t_{кип} - t)}{(1-\eta)UI} = 630 \text{ с} .$$

3.4. Магнитное поле

Взаимодействие тел, возникающее при наличии в них электрических токов, называют магнитным, а возникающие при этом силы - магнитными силами. Силовое действие одного тока на другой осуществляется посредством магнитного поля, создаваемого первым током.

Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на проводник с током или на движущийся электрический заряд. Магнитное поле может быть обнаружено и с помощью намагниченных тел - тел, в которых элементарные электрические токи взаимно упорядочены (гипотеза Ампера). Проводники с токами и намагниченные тела, если на них не действуют другие силы, в магнитном поле принимают вполне определенную ориентацию (ориентирующее действие магнитного поля).

Магнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами (токами) и изменяющимися во времени электрическими полями.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$.

За направление $\vec{B}$ принимают то направление нормали (перпендикуляра) к плоскости свободно ориентирующейся в магнитном поле рамки с током, в котором движется правый винт (буравчик), если его головку вращать по направлению тока в рамке (правило буравчика), или направление вдоль оси свобод-ной магнитной стрелки от ее южного (S) полюса к северному (N) (см.рис. 3.4).

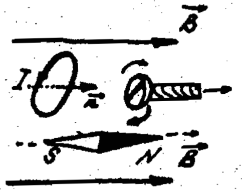


Рис. 3.4

<u>Модуль вектора индукции</u> $\vec{B}$ равен отношению максимального момента сил $M_{макс}$, действующего на достаточно малую рамку с током I , помещенную в данную точку, произведению площади рамки S на ток I и на число витков N в рамке:

$$B = \frac{M_{макс}}{INS}.$$

Момент сил, действующих на рамку с током, максимален, если нормаль к плоскости рамки перпендикулярна вектору индук-ции магнитного поля, в которое помещена рамка.

<u>Линиями индукции магнитного поля (магнитными линиями)</u> называют линии, касательные к которым параллельны векторам индукции во всех точках. При графическом изображении магнит-ного поля линии индукции проводят так, чтобы их плотность (густота) была пропорциональна модулю индукции в данной облас[ти]. На магнитных линиях часто указывают направление - направлени[е] вектора $\vec{B}$ в данном месте. Магнитные линии тока всегда замкну[ты] и нигде не пересекаются. Представление о форме магнитных линий можно получить с помощью железных опилок или магнитных стрелок.

Магнитные линии прямого проводника с током представляют собой концентрические с проводником окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику. Направление линий

определяется правилом буравчика. Густота линий убывает по мере удаления от проводника. На расстоянии r от прямого провод-ника, находящемся в вакууме, индукция поля $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$,

где $\mu_0 = 4\cdot 10^{-7}\,\frac{Тл}{А\cdot м}$ - магнитная постоянная.

Внутри длинного соленоида (катушки с плотно прижатыми витками), по которому течет ток I , вдали от его концов магнитные линии представляют собой прямые, параллельные оси соленоида, а индукция поля

$$B = \mu_0 I n,$$

где n - число витков,приходящееся на каждый метр длины обмотки. Вне соленоида вдали от его концов магнитного поля практически нет.

В однородном магнетике, помещенном во внешнее магнитное поле B_0, линии индукции которого не пересекают поверхности магнетика, индукция магнитного поля

$$B = \mu B_0,$$

где μ - проницаемость магнетика. Приведенным выражением можно пользоваться и для оценки индукции в середине длинного стержня, ось которого параллельна магнитным линиям внешнего поля. Кроме ферромагнетиков, у остальных веществ μ мало отличается от единицы. У ферромагнетиков μ может дости-гать десятков тысяч.

<u>Закон Ампера.</u> На отрезок проводника длиной l , по которому течет ток I , со стороны магнитного поля с индук-цией $\vec{B}$ действует сила

$$F = IlB\sin\alpha = IlB_{\perp},$$

где α - угол между отрезком проводника и вектором $\vec{B}$, а $\vec{B}_\perp$ - составляющая вектора $\vec{B}$, перпендикулярная отрезку проводника. Направление силы совпадает с направлением отогнутого на 90° большого пальца левой руки, расположенной так, что четыре других вытянутых пальца параллельны отрезку проводника, составляющая вектора индукции $\vec{B}_\perp$ входит в ладонь перпендикулярно к ней (правило левой руки).

Если проводник с током не является прямолинейным или магнитное поле неоднородно, для нахождения действующей на проводник силы его разбивают на такие элементарные отрезки, к каждому из которых применим закон Ампера, а затем определяют геометрическую сумму всех элементарных сил - искомую силу.

На частицу с электрическим зарядом q, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ в электромагнитном поле, действует сила

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{маг},$$

которую часто называют <u>силой Лоренца</u>. Силу $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$, обусловленную действием на частицу электрического поля с напряженностью $\vec{E}$, обычно называют электрической составляющей силы Лоренца, а силу $\vec{F}_{маг}$, обусловленную действием магнитного поля,- магнитной составляющей, хотя часто под силой Лоренца понимают только одну эту составляющую.

<u>Величина силы $F_{маг}$</u> определяется соотношением

$$F_{маг} = |q| v B \sin\alpha,$$

где B - модуль вектора индукции магнитного поля, α - угол между векторами индукции магнитного поля $\vec{B}$ и скорости частицы $\vec{v}$.

<u>Направление $\vec{F}_{маг}$</u> определяется правилом левой руки. При

этом нужно помнить, что четыре вытянутые пальца левой руки должны быть направлены вдоль вектора $\vec{v}$, если $q>0$, и в противоположную сторону при $q<0$. Так как $\vec{F}_{маг}$ перпендикулярна $\vec{v}$, она создает лишь центростремительное ускорение и работа этой силы над частицей равна нулю.

<u>Задача 3.4.I</u>.

Два параллельных проводника расположены в вакууме на расстоянии r = 20 см друг от друга. По первому проводнику течет ток I_1 = 10 А, а по второму - I_2 = 50 А. Определить силу, действующую на отрезок второго проводника длиной ℓ = 1м со стороны первого проводника.

r = 0,2 м;
I_1 = 10 А;
I_2 = 50 А;

F_{12} - ?

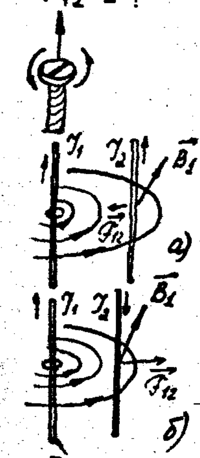


Рис.3.5

<u>Решение</u>

Пусть оба проводника расположены вертикально и ток течет вверх. Тогда магнитные линии этого тока - концентрические с первым проводником окружности - лежат в горизонтальной плоскости и в соответствии с правилом буравчика направлены против часовой стрелки (рис. 3.5). Если ток по второму проводнику течет так же вверх, то этот проводник будет притягиваться к первому (рис. 3.5а), вниз - отталкиваться (рис. 3.5б). Сказанное легко доказать, применяя правило левой руки.

Поскольку индукция поля, создаваемого первым проводником, в том месте, где расположен второй, $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$, то по закону Ампера действующая на отрезок второго проводника длиной l сила

$$F_{12} = I_2 l B_1 = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} l .$$

Подставляя сюда числовые данные, получим

$$F_{12} = 0,5 \text{ мН} .$$

Отметим, что полученное соотношение используется в Международной системе единиц для определения единицы тока: ампер-сила постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии I м один от другого, вызывает на участке проводника длиной I м силу взаимодействия, равную $2\cdot10^{-7}$ ньютон.

Задача 3.4.2.

В однородное поле с индукцией В = 20 мТл помещена прямоугольная одновитковая рамка АСДЕ так, что поле перпендикулярно сторонам АС и ДЕ и образует угол $\alpha = 30^\circ$ с двумя другими сторонами. Длина стороны АС равна a = I0 см, стороны СД – b = I6 см. Определить момент М сил, действующих на рамку, и силы натяжения ее проводников, возникающие при пропускании по рамке тока $I = 1$ А.

$B = 2\cdot10^{-2}$ Тл,
$\alpha = 30^\circ$,
$a = 0,1$ м,
$b = 0,16$ м,
$I = 1$ А,

M – ?
T_a – ?
T_b – ?

Решение

Возможные два варианта расположения рамки с током относительно поля показаны на рис. 3.6а и б. В соответствии с правилом левой руки в первом случае (рис. 3.6а) на стороны рамки АС и ДЕ действуют силы F_a, создающие момент М, стремящийся повернуть рамку против

часовой стрелки, и растягивающие стороны СД и АЕ за счет составляющих $\vec F_{a\parallel}$ (рис. 3.6в). На стороны же СД и АЕ действуют

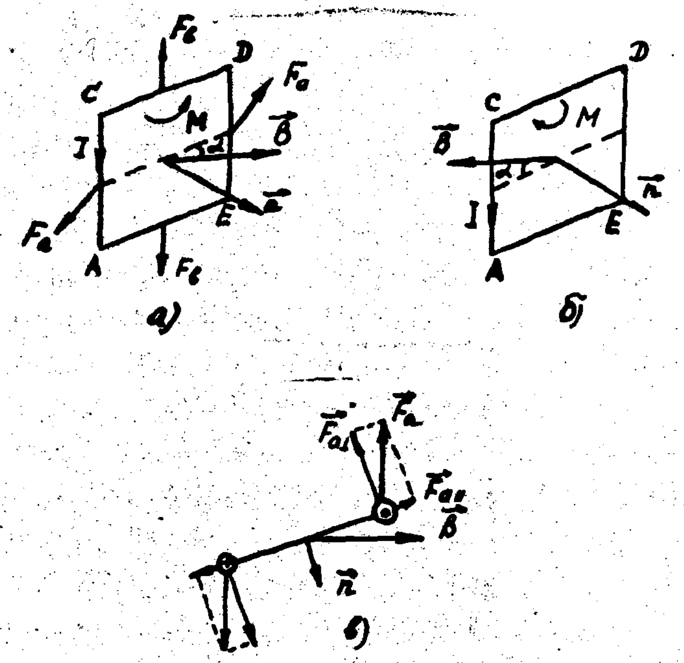


Рис. 3.6

силы F_b, растягивающие стороны АС и ДЕ. Во втором случае (рис.3.6б) вращающий момент направлен по часовой стрелке, а возникающие силы стремятся сжать проводники рамки.

Пренебрегая магнитным полем тока в рамке, по закону Ампера получим:

$$F_a = IaB \quad , \quad F_b = IbB\sin\alpha .$$

Поскольку действующий на рамку момент сил F_a
$M = F_{a\perp} b = F_a b\cos\alpha$, а силы натяжения проводников АС, ДЕ и СД, АЕ равны соответственно

$T_a = \frac{1}{2} F_b$, $T_b = \frac{1}{2} F_{a\parallel}$, то
$M = IabB\cos\alpha = 0{,}28$ мН·м , $T_a = \frac{1}{2} IbB\sin\alpha = 0{,}8$ мН,
$T_b = \frac{1}{2} IaB\sin\alpha = 0{,}5$ мН .

Итак, на рамку с током, находящуюся в однородном магнитном поле, действует вращающий момент, стремящийся повернуть рамку так, чтобы направление поля в центре рамки, создаваемого током в ней, совпало с направлением внешнего поля, а проводники рамки могут испытывать растягивающие или сжимающие усилия.

Задача 3.4.3

В однородное магнитное поле с индукцией B = 52 мТл со скоростью v = 500 км/с, направленной под углом α = 30° к магнитным линиям, влетает протон. Определить траекторию движения протона, если его заряд e = 1,60·10^{-19}Кл, а масса m = 1,67·10^{-27}кг;

B = 5,2·10^{-2}Тл;
v = 5·10^{5}м/с;
e = 1,6·10^{-19}Кл;
m = 1,67·10^{-27}кг;

---

r – ?
h – ?

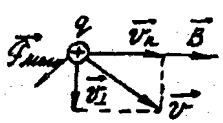


Рис. 3.7

Решение

Разложим скорость протона $\vec{v}$ на две составляющие: параллельную $\vec{v}_\parallel$ и перпендикулярную $\vec{v}_\perp$ вектору индукции поля $\vec{B}$. Поскольку $\vec{v}_\perp$ отлично от нуля, на протон действует сила $F_{маг} = q v_\perp B$, направленная перпендикулярно как вектору $\vec{v}_\perp$, так и вектору $\vec{B}$ (рис.3.7). Если бы составляющая скорости $\vec{v}_\parallel$ была бы равна нулю, то под действием силы $\vec{F}_{маг}$ протон двигался бы по окружности радиуса

$$r = \frac{m v_\perp^2}{F_{маг}} = \frac{m v_\perp}{qB} = \frac{m v \sin\alpha}{qB} = 5 \text{ см}$$

в плоскости, перпендикулярной линиям индукции. В рассматриваемом же случае ($v_\parallel \neq 0$) протон одновременно смещается вдоль линий индукции, т.е. движется по винтовой линии (рис. 3.8) с шагом $h = v_\parallel \Delta t$, где Δt – время одного оборота протона.

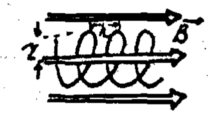


Рис. 3.8

Поскольку $\Delta t = \frac{2\pi r}{v_\perp}$,

$$h = v_\parallel \frac{2\pi r}{v_\perp} = \frac{2\pi m v_\parallel}{qB} = \frac{2\pi m v \cos\alpha}{qB} = 0{,}55 \text{ м}.$$

Задача 3.4.4

Разность потенциалов между точками A и C (рис. 3.9), лежащими на противоположных сторонах алюминиевой ленты толщиной d = 0,05 мм, по которой течет ток I = 10 А, становится отличной от нуля, если включить внешнее магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, перпендикулярной плоскости ленты (эффект Холла). Определить полярность и величину возникающей разности потенциалов U при B = 1,5 Тл. Магнитное поле считать однородным, а распределение тока по ленте равномерным.

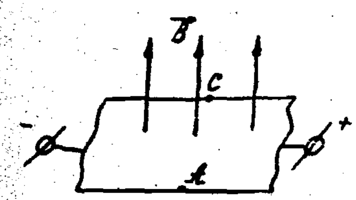


Рис. 3.9

Решение

Пользуясь правилом левой руки, можно убедиться, что на движущиеся в ленте носители электрического заряда q действует сила $F_{маг}$ (рис.3.10), направленная вне зависимости от

d = 5·10^{-5}м;
I = 10 А;
B = 1,5 Тл;

U – ?

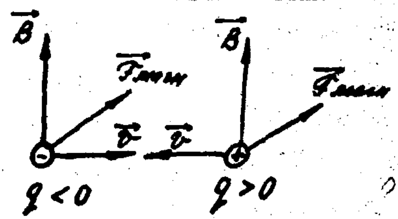


Рис. 3.10

знака q от точки А к точке С (рис. 3.9). Поскольку электрический ток в металлах обусловлен движением свободных электронов (q = $-1{,}60\cdot 10^{-19}$ Кл), край ленты, на котором расположена точка С, относительно противоположного края приобретает избыточный отрицательный заряд, а в ленте возникает дополнительное электрическое поле $\vec{E}$, направленное от точки А к точке С, противодействующее силе $\vec{F}_{маг}$. Поперечное смещение зарядов прекращается при условии $E = F_{маг}/q$. Так как поле E однородно, то искомая разность потенциалов $U = Ea$, где a – ширина ленты. В рассматриваемом случае $F_{маг} = qvB$, причем скорость v движения зарядов q связана с текущим по ленте током соотношением $I = |q|vnS$, где n – концентрация носителей, а $S = ad$ – площадь поперечного сечения ленты.

Оценим n, полагая все валентные электроны свободными. Для этого разделим плотность алюминия ρ = 2,7 г/см^3 на его атомную массу A = 27 г/моль, а затем умножим результат на число Авогадро N_A и валентность алюминия n = 3. Тогда

$$v = \frac{IBA}{|q|\,ad\rho n N_A},$$

а искомая разность потенциалов

$$U = \frac{IBA}{|q|\,d\rho n N_A} = 10\ мкВ.$$

3.5. Электромагнитная индукция

В замкнутом проводящем контуре явление электромагнитной индукции проявляется в возникновении тока - индукционного тока - при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур. Изменение магнитного потока через контур может быть обусловлено как изменением индукции поля, так и движением самого контура или его отдельных частей, так как магнитным потоком (потоком индукции магнитного поля) через плоский контур, ограничивающий площадь S и находящийся в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, называют величину

$$\Phi = BS\cos\alpha ,$$

где α - угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к плоскости контура. Направление нормали $\vec{n}$ к плоскости контура выбирается по правилу буравчика при задании положительного направления обхода контура.

Первичным в явлении электромагнитной индукции является возникновение сторонних сил, действие которых на электрические заряды и вызывает индукционный ток. При этом в качестве сторонних могут выступать две силы: сила Лоренца $\vec{F}_{маг}$ и сила $\vec{F}_{в}$ со стороны вихревого электрического поля, возникающего при изменении во времени индукции магнитного поля. Линии напряженности вихревого поля, в отличие от линий электростатического - кулоновского - поля, замкнуты. Вихревое поле не является потенциальным.

Энергетической характеристикой сторонних сил служит ЭДС: отношение работы сторонних сил A при перемещении заряда по данному участку к величине этого заряда q. Возникающую в рассматриваемом случае ЭДС называют ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$.

При возникновении тока может произойти такое перераспределение зарядов в проводнике, что появится кулоновское поле. Если проводник не замкнут, действие этого поля будет противоположно действию сторонних сил и в каждой точке проводника очень быстро установится равновесие между кулоновскими и сторонними силами. Ток прекратится, а между любыми точками проводника будет существовать разность потенциалов, равная ЭДС индукции между ними. Если же концы проводника замкнуты и ЭДС индукции вдоль всего проводника отлична от нуля, в проводнике будет ток. Если же при этом проводник однороден, имеет постоянное сечение и сторонние силы в любой его точке одинаковы, то кулоновского поля в проводнике не будет, и, следовательно, разность потенциалов между любыми точками будет равна нулю. В противном случае в проводнике будет кулоновское поле, действующее в одних местах проводника сонаправленно со сторонними силами, в других - противоположно. Наконец, если ЭДС $\mathcal{E}_i$ вдоль всего замкнутого проводника равна нулю, то после возникновения сторонних сил в проводнике очень быстро прекратится ток, т.к. действие этих сил будет уравновешено действием кулоновских сил. Подобный случай реализуется при движении жесткого контура в однородном магнитном поле.

Хотя в качестве сторонних при электромагнитной индукции могут выступать разные силы, их ЭДС в замкнутом контуре (за редким исключением) определяется единым законом электромагнитной индукции: ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Ф через контур. Единым правилом -

правилом Ленца - определяется и направление индукционного тока I_i: ток I_i направлен так, что его магнитный поток через рассматриваемый замкнутый контур стремится компенсировать изменения магнитного потока внешнего поля, вызвавшие этот ток.

С учетом правила Ленца закон электромагнитной индукции записывают в виде

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Следует помнить, что при такой записи:

1) направление действия сторонних сил (и тока I_i) и нормали к плоскости контура, используемое при вычислении потока Φ, связаны правилом буравчика;

2) если контур состоит из N последовательно соединенных витков, то под Φ следует понимать магнитный поток, равный сумме потоков, пронизывающих каждый из витков. Поэтому, если все витки контура - катушки - намотаны, как обычно в одну сторону и каждый из них пронизывает поток Φ_1, изменяющийся со скоростью $\Delta\Phi_1/\Delta t$, ЭДС индукции в контуре

$$\mathcal{E}_i = -N\frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

т.к. $\Phi = N\Phi_1$. Отметим, что в подобных случаях поток Φ обычно называют сцепленным потоком или потокосцеплением.

В случае разомкнутого проводника, движущегося в постоянном магнитном поле, ЭДС индукции возникает за счет той части силы Лоренца $\vec{F}_{маг}$, которая направлена вдоль проводника. Если проводник движется поступательно со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле, то модуль ЭДС

$$|\mathcal{E}_i| = |q| v l B_\perp ,$$

где l - длина проводника, $B_\perp$ - модуль составляющей вектора индукции, перпендикулярной оси проводника и вектору его скорости.

При изменении тока I в любом проводнике возникает ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta \Phi_s}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} ,$$

где Φ_s - поток магнитного поля, созданного током I, сцепленный с данным проводником, <u>L - индуктивность проводника,</u> определяемая его геометрией и магнитной проницаемостью μ окружающей среды. В общем случае индуктивность проводника с током I и сцепленный с ним поток Φ_s связаны соотношением

$$\Phi_s = LI$$

<u>Энергия магнитного поля</u> $W_{маг}$, созданного током I в проводнике с индуктивностью L,

$$W_{маг} = \frac{1}{2} L I^2$$

может быть вычислена и через индукцию магнитного поля B, т.к. плотность энергии $w_{маг}$ - энергия, приходящаяся на единицу объема поля,- определяется выражением

$$w_{маг} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} .$$

<u>Задача 3.5.1</u>

Электромотор питается от источника с ЭДС $\mathcal{E}$ = 12 В. Какую механическую мощность N развивает мотор при токе в его обмотках I = 2А, если при остановленном якоре в цепи течет ток I_0 = 3 А ?

Решение

$\mathcal{E} = 12$ В;

$I = 2$ А;

$I_0 = 3$ А;

N - ?

При вращении якоря мотора в его витках индуцируется ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$, противодействующая внешней ЭДС. Поэтому закон Ома для такой цепи иметь вид:

$$\mathcal{E} = IR + \mathcal{E}_i,$$

где R - сопротивление обмоток мотора и источника ЭДС $\mathcal{E}$. При неподвижном якоре $\mathcal{E} = I_0 R$, поэтому $\mathcal{E} = \mathcal{E}\frac{I}{I_0} + \mathcal{E}_i$. Умножив это равенство на I, получим

$$\mathcal{E}I = \mathcal{E}\frac{I^2}{I_0} + \mathcal{E}_i I.$$

Здесь $\mathcal{E}I$ - мощность сторонних сил источника, $\mathcal{E}I^2/I_0$ - мощность тепловых потерь, а $\mathcal{E}_i I$ - механическая мощность мотора. Таким образом,

$$N = \mathcal{E}_i I = \mathcal{E}I - \mathcal{E}\frac{I^2}{I_0^2} = 8 \text{ Вт}.$$

Задача 3.5.2

Кольцо из сверхпроводника помещено в однородное магнитное поле, индукция которого нарастает от нуля до величины B_0. Плоскость кольца перпендикулярна линиям индукции магнитного поля. Определить силу индукционного тока I в кольце. Радиус кольца r, индуктивность L.

Решение.

Поскольку сопротивление сверхпроводящего кольца равно нулю, то ЭДС в нем всегда должна быть равна нулю. Это возможно только в том случае, когда изменение полного магнитного потока, пронизывающего кольцо и равного сумме потоков внешнего магнитного поля и поля, порожденного индукционным током, равно нулю. Отметим, что, когда речь идет об обычных проводящих контурах, потоком магнитного поля, порожденного индукционным током, можно, как правило, пренебречь (т.е.пренебречь индуктивностью самого контура).

Поскольку индукционный ток в кольце изменяется от нуля до I, обусловленный им поток магнитного поля $\Phi_S = LI$. Поток же внешнего магнитного поля, пронизывающий кольцо, $\Phi_{вн} = \pi r^2 B_0$. Поэтому

$$I = \frac{\pi r^2 B_0}{L}.$$

Направление индукционного тока, как и обычно, определяется правилом Ленца.

Задача 3.5.3

На железный сердечник с проницаемостью $\mu = 10^4$, который представляет собой кольцо со средним радиусом $R = 5$ см и сечением площадью $S = 25$ мм^2, намотано плотно $N = 1000$ витков. Найти индуктивность L этой катушки и объемную плотность энергии магнитного поля, возникающего в сердечнике при токе $I = 20$ мА .

$N = 1000$;
$\mu = 10^4$;
$S = 2{,}5\cdot 10^{-5}$ м^2;
$R = 0{,}05$ м;
$I = 2\cdot 10^{-2}$ А;

L – ?
w – ?

Решение

При протекании тока I по обмотке поперечное сечение сердечника и каждый ее виток пронизывает поток

$$\Phi_1 = BS = \mu B_0 S.$$

Индукция поля внутри соленоида без сердечника $B_0 = \mu_0 I n$, где n – число витков на единицу длины.

В данном случае $n = \frac{N}{2\pi R}$.

Т.о., полный поток $\Phi_S = N\Phi_1 = \dfrac{\mu\mu_0 I N^2 S}{2\pi R}$,

а индуктивность

$$L = \frac{\Phi_S}{I} = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{2\pi R} = 1\ Гн.$$

Энергия магнитного поля в катушке $W_{маг} = \frac{1}{2}LI^2$.

В данном случае индукция магнитного поля внутри сердечника везде одинакова по величине, объем сердечника $V = 2\pi R S$, плотность энергии магнитного поля равна

$$w_{маг} = \frac{W_{маг}}{V} = \frac{LI^2}{2V} = \mu\mu_0 N^2 \frac{I^2}{8\pi^2 R^2} = 25\ \frac{Дж}{м^3}.$$

Если учесть, что $B = \dfrac{\mu\mu_0 I N}{2\pi R}$, то $w_{маг} = \dfrac{B^2}{2\mu\mu_0}$.

3.6. Колебания и волны

Колебаниями называют процессы, повторяющиеся во времени периодически (через определенные промежутки времени).

Свободные колебания возникают в системе под действием внутренних сил после выведения системы из положения равновесия.

Гармоническими называются колебания, при которых периодическое изменение физической величины, характеризующей колебания, в зависимости от времени происходит по закону синуса или косинуса.

Уравнение гармонических колебаний дает зависимость физической величины (смещения x, например, при механических колебаниях) от времени: $x = x_м \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Физические величины, входящие в это уравнение, следующие: $x_м$ – амплитуда, ω – круговая частота колебаний, $\omega t + \varphi_0$ – фаза колебаний, φ_0 – начальная фаза колебаний. Минимальный промежуток времени T, через который движение тела полностью повторяется, называется периодом колебаний. Число колебаний в единицу времени называется частотой колебаний:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Круговая частота ω и частота ν связаны соотношением

$$\omega = 2\pi\nu.$$

Причиной возникновения гармонических колебаний тела является действие силы, пропорциональной смещению тела из положения равновесия и направленной к этому положению. Это могут быть силы упругости (например, в пружинном маятнике) или другие силы различной природы (сила тяжести в математическом маятнике).

Период колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

m - масса тела, k - жесткость пружины.

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Задачи по определению периода или частоты колебаний часто могут быть сведены к анализу сил, действующих на колеблющееся тело, и к определению коэффициента пропорциональности k между равнодействующей силой и смещением. Зная k, период колебаний можно найти по формуле для периода колебаний пружинного маятника.

Для нахождения частоты колебаний может быть также использовано уравнение движения, записанное на основе второго закона Ньютона. Оно должно быть приведено к виду $a_x = -\omega^2 x$, которому удовлетворяет ускорение и смещение пружинного маятника.

При решении ряда задач нужно использовать закон сохранения энергии. Полная энергия складывается из кинетической и потенциальной энергии колеблющегося тела

$$E = K + П = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

Электромагнитные колебания представляют собой периодические изменения зарядов, тока и напряжения, а также электрического и магнитного полей.

Простейшей системой, в которой могут происходить электромагнитные колебания, является колебательный контур, состоящий из конденсатора емкостью C и катушки индуктивности L. Если пренебречь потерями энергии на тепло, выделяющееся в проводниках при прохождении электрического тока, то период свободных колебаний в таком контуре можно определить по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

При наличии колебаний в контуре происходит последовательное превращение энергии электрического поля, сосредоточенного в конденсаторе, в энергию магнитного поля катушки.

Полная электромагнитная энергия контура равна сумме энергий электрического и магнитного полей:

$$E = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu^2}{2}.$$

Переменный ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания, происходящие в цепях, где напряжение меняется по закону:

$$u(t) = U_м \cos \omega t,$$

где $U_м$ - амплитуда напряжения, ω - круговая частота переменного тока.

Мгновенное значение силы тока определяется по формуле

$$i(t) = I_м \cos(\omega t + \varphi),$$

где $I_м$ – амплитуда силы тока, а φ – сдвиг фаз между изменением тока и напряжения.

Действующее значение силы переменного тока I определяется как сила такого постоянного тока, который выделяет на участке цепи сопротивлением R за единицу времени энергию, равную средней мощности переменного тока.

Действующие значения тока и напряжения связаны с амплитудными значениями следующим образом :

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}}, \qquad U = \frac{U_м}{\sqrt{2}}.$$

Для увеличения или уменьшения напряжения переменного тока служит трансформатор. Коэффициент трансформации K определяется отношением действующих значений э.д.с. в первичной и вторичной обмотках

$$K = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$$

и связан с числом витков в этих обмотках:

$$K = \frac{n_1}{n_2}.$$

Волной называют колебания, распространяющие в пространстве с течением времени.

В продольных волнах колебания происходят вдоль направления распространения волны.

В поперечных волнах колебания совершаются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны.

Скорость волны равна произведению длины волны на частоту колебаний $v = \lambda \nu$.

Звуковые волны - это упругие волны, распространяющиеся в твердой, жидкой или газообразной среде и имеющие частоту в пределах 16 ÷ 20000 Гц.

Скорость звука в воздухе при 0°C $v \approx 330$ м/с.

Электромагнитные волны - это колебания электрического и магнитного полей, распространяющиеся в среде или в вакууме.

Скорость электромагнитных волн в вакууме

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Задача 3.6.1

Материальная точка совершает гармонические колебания вдоль прямой. В момент времени $t = 5$ с фаза колебаний была равна $\varphi = \frac{5}{6}\pi$, а смещение точки из положения равновесия составляло $a = 2$ см. Написать уравнение гармонических колебаний материальной точки, выбирая ось X вдоль прямой, по которой движется материальная точка. Начальная фаза $\varphi_0 = 0$.

$t = 5$ с;

$\varphi = \frac{5}{6}\pi$;

$a = 0{,}02$ см;

$\varphi_0 = 0$;

$x(t) - ?$

Решение

Уравнение колебаний точки вдоль оси можно записать в виде

$$x(t) = x_м \sin(\omega t + \varphi_0),$$

если считать, что координата положения равновесия $x_0 = 0$.

Учитывая, что $\varphi = \omega t + \varphi_0$, на основании условия задачи имеем

$$\varphi = \omega t + \varphi_0;$$

$$a = x_м \sin\varphi.$$

Из этих соотношений получаем, что частота

$$\omega = \frac{\varphi - \varphi_0}{t} = \frac{1}{6}\pi \text{ рад/с},$$

а амплитуда

$$x_м = \frac{a}{\sin\varphi} = 0,04 \text{ м}.$$

Уравнение колебаний примет вид:

$$x(t) = 0,04 \sin\frac{1}{6}\pi t,$$

где смещение x выражается в метрах, а время t –в секундах.

Задача 3.6.2

Шарик, подвешенный на пружине, растягивает ее на $\Delta\ell$ = 4 см. Каков период T свободных колебаний такого пружинного маятника ?

$\Delta\ell$ = 0,04 м

T – ?

Решение

Период собственных колебаний пружинного маятника определяется массой шарика m и жесткостью пружины k:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Для нахождения отношения m/k запишем условие, при котором шарик находится в равновесии:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{упр} = 0.$$

Учитывая направление сил и закон Гука $F_{упр} = k\Delta\ell$, получаем: $\frac{m}{k} = \frac{\Delta\ell}{g}$.

Окончательно

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta\ell}{g}} = 0,4 \text{ с}.$$

Задача 3.6.3

Деревянный кубик с ребром ℓ = 5 см плавает в воде. Его слегка погружают в воду и отпускают. Определить период T возникающих колебаний.

Плотность дерева $\rho = 0{,}8$ г/см³ плотность воды

$\rho_0 = 1$ г/см³;

$\ell = 0{,}05$ м ;

$\rho = 0{,}8 \cdot 10^3$ кг/м³;

$\rho_0 = 10^3$ кг/м³ ;

T - ?

Решение

Для нахождения периода колебаний запишем на основе второго закона Ньютона уравнение движения кубика, а затем приведем его к виду

$$a_x = -\omega^2 x \; . \qquad (1)$$

Направим ось X вертикально вниз, начало координат $x_0 = 0$ совместим с поверхностью воды. Высоту погруженной в воду части кубика в положении равновесия обозначим через h (рис. 3.11а).

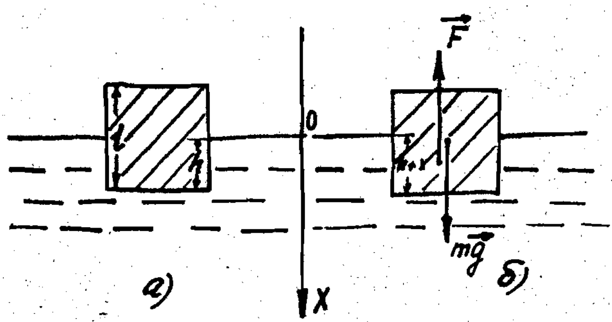


Рис. 3.11

Рассмотрим момент времени, когда глубина погружения равна $h + x$ (рис. 3.11б).

На кубик действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Архимеда $\vec{F}$. Поэтому

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}$$

или в проекциях на ось X :

$$ma_x = mg + F_x \; .$$

Проекция силы Архимеда $F_x = -\rho_0 g l^2(h+x)$, поэтому

$$a_x = g - \frac{\rho_0 g l^2 (h+x)}{m}.$$

Учитывая условие плавания кубика $mg = \rho_0 g l^2 h$ и выражая массу кубика через плотность и объем: $m = \rho l^3$, получаем:

$$a_x = -\frac{\rho_0 g}{\rho l} x. \qquad (2)$$

Сравнивая (I) и (2), имеем: $\omega^2 = \frac{\rho_0 g}{\rho l}$, а $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{\rho l}{\rho_0 g}} = 0{,}4$ с

Задача 3.6.4

Период колебаний груза, подвешенного на нити, T = 2 с, а максимальное отклонение нити от вертикального направления составляет угол α = 5°. Какова величина скорости груза v при прохождении положения равновесия ?

T = 2 с ;
α = 5° ;

---

v - ?

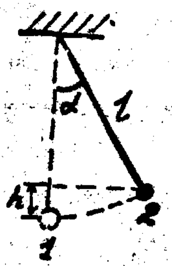


Рис. 3.12

Решение

Для решения этой задачи применим закон сохранения энергии. Полная энергия груза E равна сумме кинетической K и потенциальной $П$ энергии:

$$E = K + П.$$

Будем отсчитывать высоту нахождения груза от уровня положения равновесия. При прохождении положения равновесия (положение I на рис. 3.12)

$$K_1 = \frac{mv^2}{2},\ П_1 = 0,\ E_1 = \frac{mv^2}{2}.$$

При максимальном отклонении (положение 2) скорость груза равна нулю, поэтому $K_2 = 0,\ П_2 = mgh,\ E_2 = mgh.$

В силу закона сохранения энергии $E_1 = E_2$ или

$v^2 = 2gh.$

Из геометрических соотношений $h = l(1-\cos\alpha) = 2l\sin^2\frac{\alpha}{2}$, а длина нити может быть найдена из ее связи с периодом колебаний: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Окончательно

$$v = \frac{1}{\pi} g T \sin\frac{\alpha}{2} = 0{,}27 \text{ м/с}.$$

При вычислении можно воспользоваться, что $\sin\alpha \approx \alpha$ (в радианах) для малых углов.

Задача 3.6.5

При изменении емкости переменного конденсатора на $\Delta C =$ 50 пФ резонансная частота контура увеличилась с $\nu_1 =$ 100 кГц до $\nu_2 =$ 120 кГц. Какова величина индуктивности контура L ?

$\Delta C = 50\cdot10^{-12}$ Ф;

$\nu_1 = 10^5$ Гц ;

$\nu_2 = 1{,}2\cdot10^5$ Гц ;

L - ?

Решение

Период свободных колебаний в контуре определяется по формуле Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$, а частота $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Обозначим начальную емкость переменного конденсатора C_1, конечную - C_2. Тогда

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}, \quad \nu_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}$$

или

$$LC_1 = \frac{1}{4\pi^2\nu_1^2}, \quad LC_2 = \frac{1}{4\pi^2\nu_2^2}.$$

Вычитая из первого равенства второе, получим:

$$L(C_1 - C_2) = \frac{1}{4\pi^2}\,\frac{\nu_2^2-\nu_1^2}{\nu_2^2\nu_1^2}.$$

Так как $\nu_2 > \nu_1$, то $\Delta C = C_1 - C_2$ и окончательно

$$L = \frac{1}{4\pi^2}\,\frac{\nu_2^2-\nu_1^2}{\nu_1^2}\,\frac{1}{\nu_2^2\Delta C} = 1{,}6\cdot10^{-2}\text{ Гн}.$$

Задача 3.6.6

К источнику тока параллельно подключены конденсатор емкостью C = 20 мкФ и катушка индуктивностью L = 0,02 Гн. Напряжение на конденсаторе U_0 = 100 В, ток через катушку I_0 = 2А. Затем источник отключают. Какой заряд q будет на конденсаторе, когда ток в катушке равен I = 1 А? Потерями энергии на нагревание проводов пренебречь.

$C = 2\cdot 10^{-5}$Ф;

L = 0,02 Г;

U_0 = 100 В;

I_0 = 2 А;

I = 1 А;

---

q - ?

Решение

Полная электромагнитная энергия, сосредоточенная в контуре после отключения источника тока,

$$E = \frac{CU_0^2}{2} + \frac{LI_0^2}{2}.$$

В пренебрежении потерями она остается постоянной в любой момент времени, в том числе и тогда, когда ток в катушке I: $E = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}$; U - напряжение на конденсаторе в этот момент. Оно связано с зарядом на конденсаторе соотношением $q = CU$.

Таким образом,

$$q = CU = C\sqrt{\frac{2E - LI^2}{C}} = \sqrt{C^2U_0^2 + LC(I_0^2 - I^2)} = 2,3\cdot 10^{-3} Кл.$$

Задача 3.6.7

Трансформатор включен в сеть с переменным напряжением U_1 = 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки U_2 = 20В, ее сопротивление R_2 = 2 Ом, сила тока I_2 = 2 А.

Найти коэфициент трансформации K и к.п.д. трансформатора η, пренебрегая потерями в первичной обмотке и сердечнике.

$U_1 = 220$ В;
$U_2 = 20$ В;
$R_2 = 10$ м;
$I_2 = 2$ А;

κ - ?
η - ?

Решение

Действующее значение э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора

$$\mathcal{E}_2 = U_2 + I_2 R_2 ,$$

в первичной обмотке (ее сопротивление мало) $\mathcal{E}_1 = U_1$.

Коэффициент трансформации

$$\kappa = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R_2} = 10.$$

Для нахождения к.п.д. трансформатора учтем, что полезная мощность, выделяемая во внешней цепи, подключенной ко вторичной обмотке,

$$P_{полез} = U_2 I_2 ,$$

а полная мощность

$$P_{полн} = \mathcal{E}_2 I_2 = I_2 (U_2 + I_2 R_2).$$

Поэтому к.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{U_2}{U_2 + I_2 R_2} = 0,91.$$

3.7. Законы отражения и преломления света

Луч, падающий на границу раздела двух сред, разделяется на отраженный и преломленный лучи. Их ход определяется законами отражения и преломления.

Законы отражения:

1. Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения γ равен углу падения α (рис.3.13).

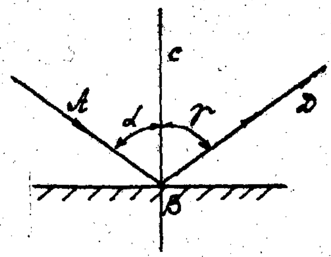


Рис. 3.13

Лучи обладают свойствами обратимости. Если на плоское зеркало направить луч ДВ, то он отразится в направлении ВА.

Плоское зеркало дает мнимое изображение предмета.

Построим изображение светящейся точки S в плоском зеркале СД (рис. 3.14).

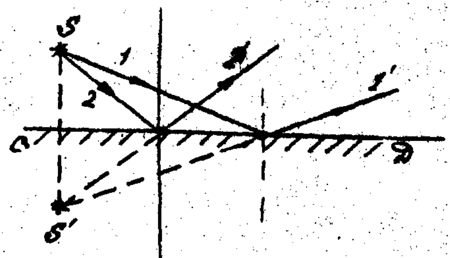


Рис. 3.14

Из точки S направим на зеркало два луча I и 2. Отраженные лучи пойдут в направление I^I и 2^I. Изображение будет находится на пересечении не самих отраженных лучей, а их продолжений. Такое изображение называется мнимым.

Сферическим зеркалом называют поверхность тела, имеющую форму сферического сегмента и зеркально отражающую свет.

Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют оптическим центром зеркала (точка 0 на рис. 3.15 и 3.16). Вершину сферического сегмента P называют полюсом зеркала.

Любая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью зеркала.

Главная оптическая ось OP –прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала.

Фокус зеркала F – точка, в которой пересекаются после отражения лучи (рис. 3.15) или их продолжения (рис.3.16), падающие на сферическое зеркало параллельно главной оптической оси. Фокусное расстояние F в два раза меньше радиуса кривизны $F = \frac{1}{2} R$.

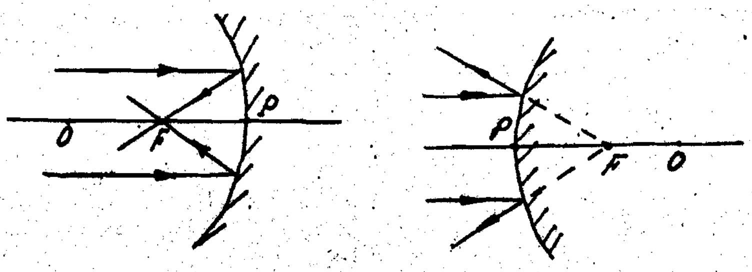


Рис.3.15. Вогнутое зеркало. Фокус действительный

Рис.3.16. Выпуклое зеркало. Фокус мнимый

Рассмотрим примеры построения изображений в сферических зеркалах.

Выгнутое зеркало (рис. 3.17 и 3.18).

Пусть AB – предмет, A_1B_1 – изображение. При построении изображения точки A берутся 2 луча: луч 1 падает на зеркало параллельно главной оптической оси. и, отразившись, проходит через фокус F ; луч 2 – падает на зеркало, проходя через оптический центр 0 и возвращается по этому же направлению, так как радиус перпендикулярен сферической поверхности.

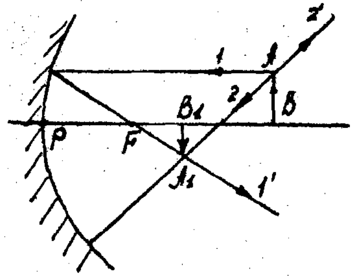


Рис. 3.17

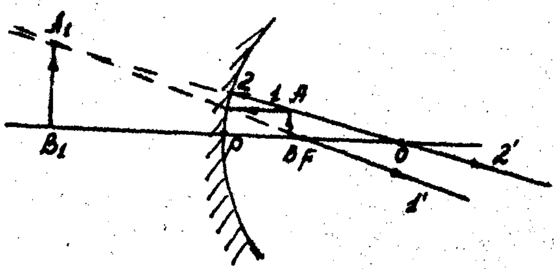


Рис. 3.18

Пересечение отраженных лучей I^I и 2^I дает точку A_I.

Выпуклое зеркало

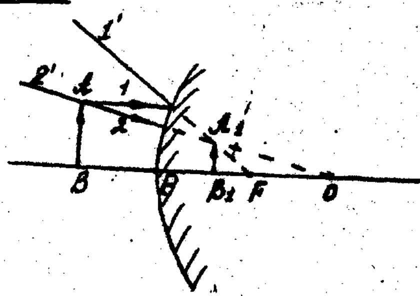


Рис. 3.19

В нем изображение всегда мнимое, уменьшенное и прямое (рис. 3.I9).

Для нахождения положения точки A_I снова берутся два луча: луч I, падающий параллельно главной оптической оси и отраженный в направлении луча I, на продолжении которого лежит фокус зеркала - точка F; луч 2 падает и отражается по перпендикуляру к поверхности сферы (направление AO).

Для расчетов пользуются формулой зеркала

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где F - фокусное расстояние, d - расстояние от предмета до зеркала, f - расстояние от зеркала до изображения.

Эти величины могут быть положительными или отрицательными: если предмет, изображение или фокус являются действительными, то соответствующая величина должна быть положительной, если мнимые, то отрицательной. Формула зеркала для случаев, показанных на рис. 3.I7, 3.I8 и 3.I9, имеет вид соответственно I,2,3:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}; (1) \qquad \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|}; (2); \qquad -\frac{1}{|F|} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|} (3)$$

Линейное увеличение, даваемое зеркалом, равно $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$, где h - высота предмета, H - высота изображения.

<u>Законы преломления света</u> заключаются в следующем:

I) преломленный луч лежит в той же плоскости, в которой лежат падающий луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред;

2) при всех изменениях углов падения и преломления отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная, называемая показа-

телем преломления второй среды относительно первой

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n ,$$

где α - угол падения;

β - угол преломления;

n - показатель преломления.

На рис. 3.20 луч I - падающий, луч 2 - преломленный, луч 3 - отраженный. Показатель преломления данного вещества по отношению к вакууму, называется <u>абсолютным показателем преломления вещества.</u>

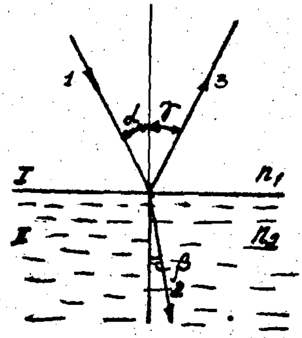


Рис. 3.20

Относительный показатель преломления n связан с абсолютными показателями n_2 второй среды и n_1 первой среды соотношением $n = \frac{n_2}{n_1}$.

С учетом этого закон преломления запишется в виде:

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

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную может иметь место <u>явление полного отражения.</u>

Угол падения α_0, соответствующий углу преломления 90^0, называют предельным углом полного отражения: $\sin\alpha_0 = \frac{1}{n}$.

Задача 3.7.I

Построить изображение точки А в плоском зеркале СД, показанном на рис. 3.2I. Где следует расположить глаз наблюдателя, чтобы он видел изображение ?

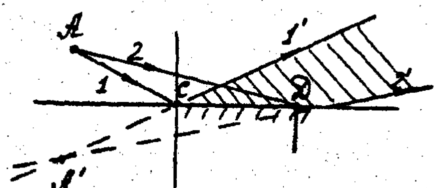


Рис. 3.2I

Решение.

В точках С и Д восстановим перпендикуляры и направим в эти точки лучи I и 2 из точки А. Отраженные лучи I′ и 2′, построим согласно закону отражения. Продолжения этих отраженных лучей пересекутся в точке А′ за зеркалом.

А′ является мнимым изображением точки А. Чтобы увидеть это изображение, глаз наблюдателя должен находиться в области, заштрихованной на рис. 3.2I(область ограничена лучами I′ и 2′ и плоскостью зеркала СД).

Задача 3.7.2

На вогнутое зеркало падает АВ, пересекающий главную оптическую ось зеркала в точке М. Отраженный от зеркала луч ВС пересекает эту ось в точке М′(рис. 3.22). Найти построением положение фокуса зеркала.

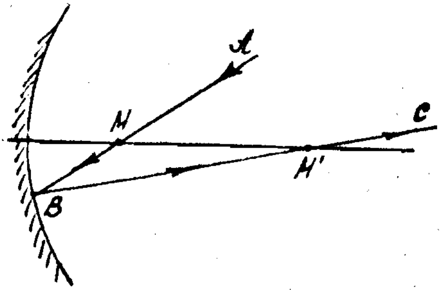


Рис. 3.22

Решение

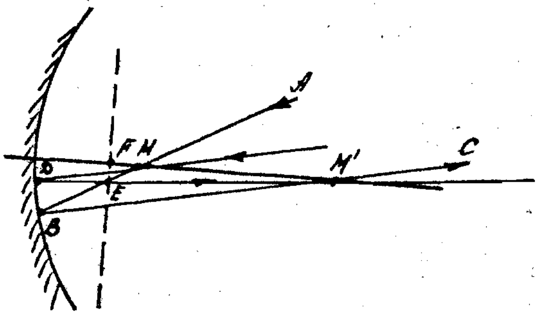


Рис. 3.23

Если бы точка М была источником, то точка М$'$ явилась бы изображением. Следовательно, любой луч (например, МД), упавший на зеркало из точки М, после отражения пройдет через точку М$'$. Проведем МД ВМ, и соединим точки Д и М$'$(рис.3.23). Используя свойство обратимости лучей, будем считать, что на зеркало падает параллельный пучок лучей МД и СВ. Параллельные лучи после отражения от зеркала сходятся в точке Е, лежащей на фокальной плоскости зеркала.

Опустив из точки Е перпендикуляр на главную оптическую ось, определим положение фокуса F.

Задача 3.7.3

Предмет высотой h = 10 см находится на расстоянии d = 18 см от вогнутого сферического зеркала, радиус кривизны которого R = 32 см. Где и какого размера получится изображение ?

R = 32 см;
h = 10 см;
d = 18 см;

---

f - ? H - ?

Решение

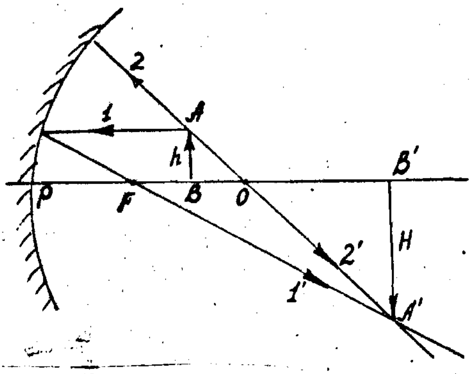


Рис.3.24

Построим изображение в вогнутом зеркале (рис. 3.24). Формула для фогнутого сферического зеркала

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

где $d = PB$ - расстояние от предмета до зеркала;
$f = PB'$ - расстояние от изображения до зеркала;
F - фокусное расстояние зеркала, равное $\frac{R}{2} = 16$ см.
Из формулы (I) получаем

$$f = \frac{dF}{d-F} = 144 \text{ см}.$$

Из подобия треугольников ABO и A'B'O имеем

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BO}{B'O}, \quad \frac{h}{H} = \frac{2F-d}{f-2F},$$

откуда для H находим

$$H = h\,\frac{f-2F}{2F-d} = 80\ см.$$

Задача 3.7.4.

На дне водоема, глубина которого $H = 2$ м, находится предмет. На какой глубине увидит этот предмет наблюдатель, смотрящий по вертикали сверху. Показатель преломления воды $n = 1{,}33$;

$H = 2\ м;$
$n = 1{,}33;$

$h - ?$

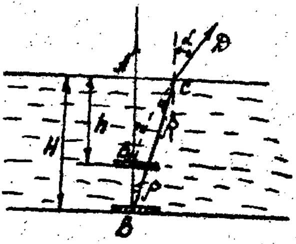


Рис. 3.25.

Решение

Проводим из точки B, где лежит предмет, два луча: BA и BCD (рис. 3.25). Луч BA не преломляется, так как он перпендикулярен поверхности раздела, луч BCD преломляется. Эти два расходящиеся луча попадают в глаз наблюдателя. Наблюдатель увидит изображение предмета в точке пересечения расходящихся лучей BA и CD, то есть в точке B_1.

Искомая глубина $h = AB_1$.

Из прямоугольного треугольника AB_1C для стороны AC можно записать: $AC = h\,tg\,\alpha$ (1).

Эту же величину АС можно определить из другого прямоугольного треугольника АСВ:

$$AC = H\,tg\,\beta. \quad (2)$$

Равенства (I) и (2) позволяет найти h :

$$h = H\,\frac{tg\,\beta}{tg\,\alpha}. \quad (3)$$

Так как углы α и β малы, то вместо отношений тангенсов можно взять отношение синусов:

$$h = H\,\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = H\frac{1}{n} = 1{,}5\,м.$$

Задача 3.7.5

Каков преломляющий угол φ призмы из стекла с показателем преломления n = I,56, если луч, падающий нормально на одну ее грань, выходит вдоль другой ?

Решение

n = I,56

φ - ?

По условию задачи вышедший из призмы луч идет вдоль грани (рис. 3.26).

Следовательно, угол падения на эту грань является предельным углом отражения (α_0).

$$\sin\alpha = \sin\alpha_0 = \frac{1}{n},$$

$$\sin\alpha_0 = 0{,}64.$$

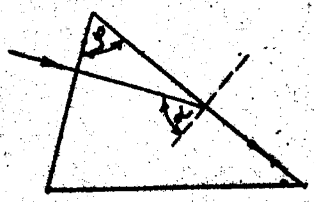


Рис.3.26

Углы φ и α равны, как углы со взаимноперпендикулярными сторонами:

$$\varphi = \alpha = 40^\circ$$

Задача 3.7.6

На стеклянную пластинку с показателем преломления n = 1,5 падает луч света. Каков угол падения луча α, если угол между отраженным и преломленным лучами равен $\varphi = 90^\circ$?

n = 1,5;

$\varphi = 90^\circ$;

α - ?

Решение

По закону отражения $\gamma = \alpha$, из геометрического построения (рис.3.27) следует, что

$$\gamma + \beta + 90^\circ = 180^\circ, \quad \beta = 90^\circ - \alpha.$$

По закону преломления

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n, \quad \frac{\sin\alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = n,$$

$$tg\,\alpha = n$$

или

$$\alpha = arc\,tg\,n = 56^\circ.$$

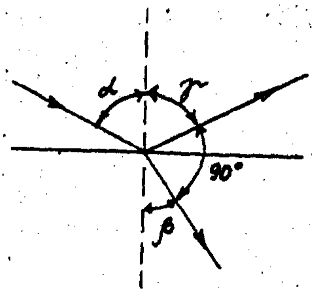
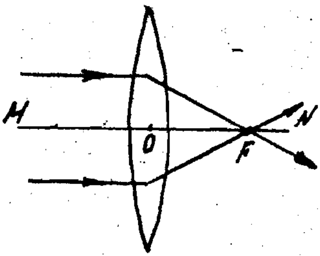


Рис.3.27

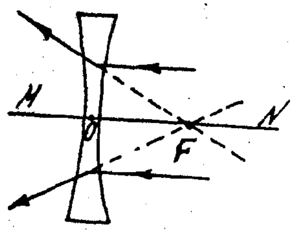
3.8. Линзы. Оптические приборы

Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называют линзой.

Линзы бывают собирающими и рассеивающими (рис.3.28).



а)



б)

Рис.3.28

MN – главная оптическая ось линзы.

Точка O – оптический центр линзы.

Любая прямая, проходящая через оптический центр, называется побочной оптической осью.

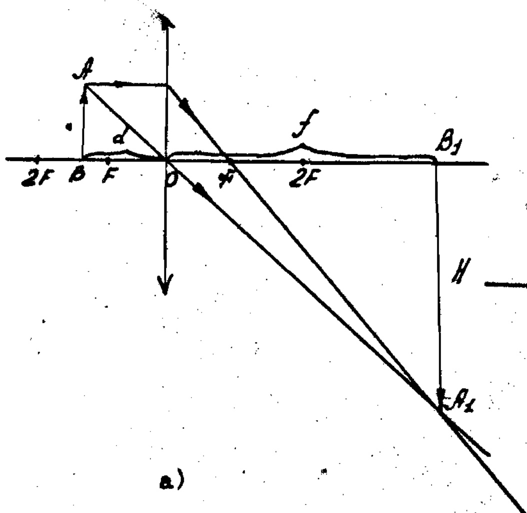
Точка F, в которой пересекаются после преломлений в линзе лучи (или их продолжения), падающие на линзу параллельно главной оптической оси, называется фокусом линзы.

У собирающей линзы (рис. 3.28а) фокус действительный, а у рассеивающей линзы (рис. 3.28б) – фокус мнимый.

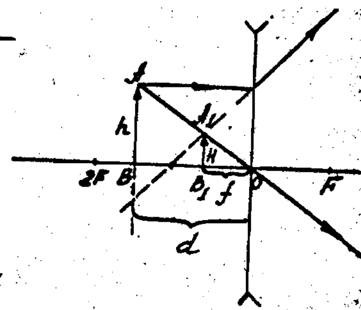
Величину, обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы D. Измеряют оптическую силу в диоптриях (дптр):

$$D = \frac{1}{F}.$$

На рис. 3.29 даны примеры построений в собирающей и рассеивающей линзах.



а)



б)

Рис. 3.29

На рис. 3.29. отмечены:

AB – предмет высотой h,

A_1B_1 – изображение высотой H,

d – расстояние от предмета до линзы,

f – расстояние от изображения до линзы.

Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

F, f, d будут положительны, если фокус, изображение или предмет действительны, в противном случае соответствующая величина считается отрицательной.

Запишем формулу линзы для случаев изображенных на рис.3.29, а и б.

$$а)\ \frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}; \qquad б)\ -\frac{1}{|F|} = -\frac{1}{|f|} + \frac{1}{d}.$$

Линейным увеличением линзы называется отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета

$$Г = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Задача 3.8.I

Тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием $F_* = 10$ см закрыта наполовину непрозрачной пластинкой (рис. 3.30). Каким будет изображение предмета, расположенного на расстоянии $d = 15$ см, и где оно будет расположено ?

$F = 10$ см

$d = 15$ см

f - ?

Решение

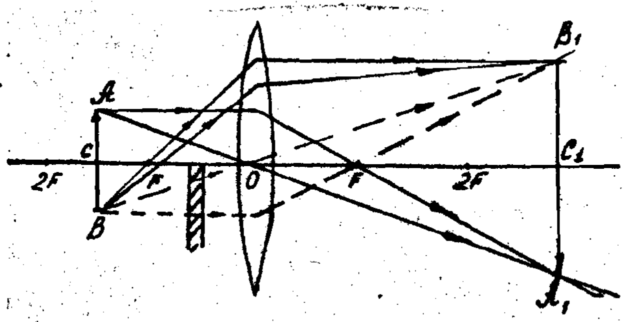


Рис.3.30

Обычно при построении изображений пользуются двумя лучами: лучом, параллельным главной оптической оси, и лучом, проходящим через оптический центр линзы. При этом не учитывается, что из каждой точки предмета можно провести бесконечное число лучей, которые сходятся в соответствующей точке изображения. В частности, все лучи, исходящие из точки B (рис.3.30) и падающие на верхнюю не закрытую часть линзы, сойдутся в точке B_1. Непрозрачная пластинка задержит лучи, падающие на нижнюю половину линзы, но в соответствующей точке сойдутся лучи, прошедшие через верхнюю половину линзы. Таким образом, изображение предмета по виду и по месту расположения не будет отличаться от изображения, которое получилось бы в отсутствии пластинки. Разница будет лишь в яркости изображения, так как через закрытую половину линзы энергия светового излучения не проходит.

Для определения расстояния f воспользуемся формулой тонкой линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

откуда

$$f = \frac{Fd}{d-F} = 30 \text{ см}.$$

Задача 3.8.2

Какое увеличение Γ дает лупа с оптической силой D =20дптр? Расстояние наилучшего зрения равно f = 0,25 м.

D = 20 дптр;

f = 0,25 м;

Γ - ?

Решение

Сделаем чертеж (рис. 3.31), учитывая, что лупа - короткофокусная.

Предмет помещается между линзой и фокусом, но ближе к фокусу(примем, что $d \approx F$), а изображение получается на расстоянии наилучшего зрения (f = 0,25 м).

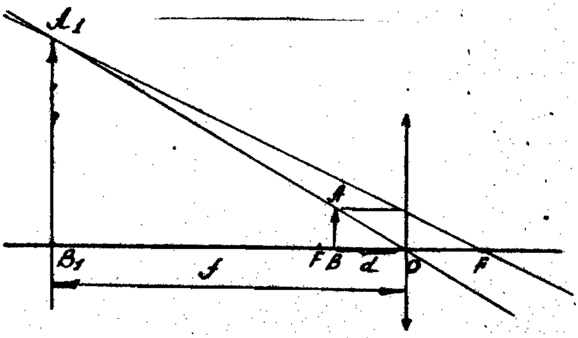


Рис. 3.31

Линейное увеличение $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$. (I)

Формула тонкой линзы $D = \frac{1}{F} = -\frac{1}{f} + \frac{1}{d}$. (2)

Решая совместно (I) и (2), получим

$$\Gamma = f\left(D + \frac{1}{f}\right) = 6 .$$

Задача 3.8.3

Построить ход произвольного луча АВ, падающего на рассеивающую линзу, после преломления в ней (рис.3.32а). Положение главной оптической оси линзы и ее фокусов заданы.

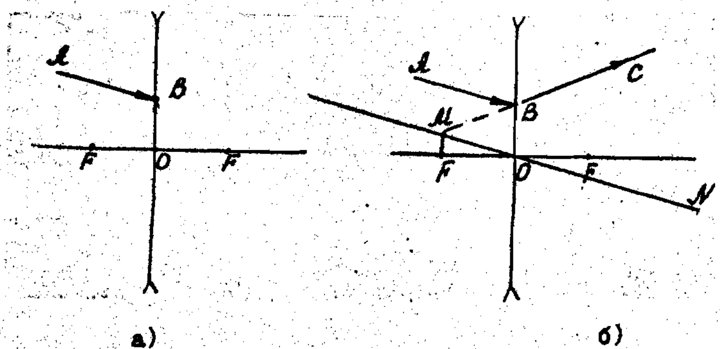


Рис.3.32

Решение

Проведем побочную оптическую ось MON, параллельно направлению падающего луча АВ (рис. 3.32б). MF – фокальная плоскость линзы. Продолжение ВМ преломленного луча ВС проходит через точку М пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью.

Метод основан на том, что параллельный пучок лучей, один из которых можно считать совпадающим с побочной оптической осью MON, после преломления идет так, что продолжения лучей собираются в точке M, лежащей на фокальной плоскости.

3.9. Волновые и квантовые свойства света

Свет представляет собой поперечные электромагнитные волны. Скорость света в среде с абсолютным показателем преломления n равна $v = \frac{c}{n}$.

Если свет переходит из одной среды с показателем преломления n_1 в другую, имеющую показатель преломления n_2, то относительный показатель преломления будет равен $n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$.

При переходе из одной среды в другую меняется скорость распространения света, а следовательно, и длина волны $\lambda = \frac{v}{\nu}$. Частота света при этом не изменяется.

Волновые свойства света проявляются в явлениях дисперсии, интерференции, дифракции, поляризации. Свет распространяется, испускается и поглощается квантами. Энергия кванта света с частотой ν $E = h\nu$, где $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж.·с – постоянная Планка.

Фотоэффектом называют явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Законы фотоэффекта:

1. Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за единицу времени, прямо пропорционально интенсивности светової волны.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности света.

3. Существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света, способного вырвать электроны из металла.

Уравнение Эйнштейна: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$, где

$h\nu$ - энергия кванта света, поглощенного катодом,

A - работа выхода электрона из металла,

$\frac{mv^2}{2}$ - кинетическая энергия фотоэлектронов.

Согласно теории относительности энергия связана с массой соотношением

$$E = mc^2,$$

тогда масса фотона $m = h\nu/c^2$,

импульс фотона $p = mc = h\nu/c = h/\lambda$.

Задача 3.9.I

Показатели преломления воды $n_1 = 1{,}33$, скипидара $n_2 = 1{,}48$. Как должны относиться толщины слоев жидкостей, чтобы времена распространения в них луча были одинаковыми ?

$n_1 = 1{,}33$;

$n_2 = 1{,}48$;

---

d_1/d_2 - ?

Решение

Показатели преломления

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2},$$

где c - скорость света в вакууме, v_1, v_2 - скорости света в воде и скипидаре.

Толщины слоев жидкостей

$$d_1 = v_1 t, \quad d_2 = v_2 t,$$

откуда

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = 1{,}11.$$

Задача 3.9.2

Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна $\lambda_M = 2750\ \mathring{A}$. Чему равно минимальное значение энергии фотона E, вызывающего фотоэффект ?

$\lambda_M = 2750\ \mathring{A} = 2,7 \cdot 10^{-7}$ м

E - ?

Решение

По определению красная граница $\nu_{кр}$ - это предельная или граничная частота падающего света, соответствующая началу фотоэффекта. Если частота падающего света меньше $\nu_{кр}$, то фотоэффект наблюдаться не будет. Формула Эйнштейна для фотоэффекта записывается

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \qquad (1)$$

где $h\nu$ - энергия падающего кванта;

A - работа выхода электрона из металла;

$\frac{mv^2}{2}$ - кинетическая энергия вырванного электрона.

Для нашего случая (начало фотоэффекта) энергия падающего света минимальна, ее хватает только, чтобы освободить электрон из металла, а на дальнейшее движение вырванного электрона энергии уже не хватает. Таким образом, в этом случае кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2} = 0$ и формула (I) будет иметь вид

$$h\nu_{кр} = A$$

или

$$E = h\nu_{кр} = h\frac{c}{\lambda_M} = 7,4 \cdot 10^{-19}\ Дж = 4,6\ эВ.$$

Задача 3.9.3

Кванты света с энергией E = 5 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода А = 4,5 эВ. Определить максимальный импульс ρ, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.

E = 5 эВ;
A = 4,5 эВ;
m = 9,1·10^{-31}кг;

P - ?

Решение

Максимальный импульс, передаваемый электроном поверхности металла ρ, определяется выражением

$$\rho = mv, \qquad (1)$$

где m - масса электрона;

v - максимальная скорость, с которой электрон покидает поверхность металла.

Значение v можно определить из основной формулы фотоэффекта

$$E = A + \frac{mv^2}{2}, \qquad (2)$$

где E - энергия падающего светового кванта;

A - работа выхода электрона из металла;

$mv^2/2$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Из (2) имеем $mv^2 = 2(E-A)$,

откуда $v = \sqrt{2(E-A)/m}$. Подставив значение v в (1), получим $\rho = \sqrt{2m(E-A)} = 3,8 \cdot 10^{-25} \frac{кг \cdot м}{с}$.

3.10. Строение атома и атомного ядра

Постулаты Бора:

1. Атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n. В стационарном

состоянии атом не излучает.

2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n .$$

Частота излучения $\nu_{kn} = E_k/h - E_n/h$.

Радиус боровской электронной орбиты с номером n, равен

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 .$$

Для $n = 1$ получается $r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$м.

Возможные частоты излучения атома водорода определяются формулой $\nu_{kn} = cR\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$,

где $R = 1{,}1 \cdot 10^7$м — постоянная Ридберга.

Переходы на второй ($n = 2$) энергетический уровень с верхних уровней образует излучение в видимой области (серия Бальмера). Частоты этой серии определяются выражением

$$\nu = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

Ядро состоит из протонов и нейтронов. Массовым числом А называют сумму числа протонов Z и числа нейтронов N:

$$A = Z + N .$$

Масса ядра $M_я$ всегда меньше суммы масс образующих его протонов и нейтронов на величину ΔM, называемую дефектом массы:

$$\Delta M = Z m_p + N m_n - M_я .$$

Между массой и энергией существует связь, даваемая соотношением Эйнштейна $E = mc^2$.

Дефекту массу ΔM соответствует уменьшение энергии ядра на величину $E_{св} = \Delta M c^2$, называемую энергией связи ядра.

Масса ядра измеряется в атомных единицах массы (а.е.м.): I а.е.м. = I,66 $\cdot 10^{-27}$кг. Этой массе соответствует энергия ($E = mc^2$), равная 93I МэВ.

Изменение ядер при взаимодействии их с элементарными частицами и друг с другом называют ядерными реакциями.

Сумма массовых чисел частиц, участвующих в ядерной реакции, а также сумма зарядов этих частиц до реакции и после нее одинаковы. Например:

$$^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n.$$

Задача 3.10.I

Найти скорость электрона v на первой боровской орбите в атоме водорода. Радиус орбиты $r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$м.

$r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$м	Решение
v - ?	Запишем второй закон Ньютона применительно к движению электрона по круговой орбите радиуса r_1 :

$$m \frac{v^2}{r_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r_1^2},$$

откуда

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r_1}} = 2{,}1 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Задача 3.10.2

Найти дефект массы ядра $^{4}_{2}He$ и вычислить удельную энергию связи, приняв $M_я = 4{,}0026$ а.е.м., $m_p = 1{,}0078$ а.е.м., $m_n = 1{,}0087$ а.е.м.

Решение

В ядре He находится 2 протона ($Z = 2$) и 2 нейтрона ($N=2$). $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я = 2 \cdot 1{,}0078 + 2 \cdot 1{,}0087 - 4{,}0026 = 0{,}0304$ а.е.м.

$E_{св} = \Delta M \cdot 931$ МэВ $= 0{,}0304 \cdot 931 = 28{,}3$ МэВ.

Удельная энергия связи-это энергия, приходящаяся на один нуклон : $\varepsilon = E_{св}/A$.

В ядре ${}^4_2He$ четыре нуклона, поэтому

$$\varepsilon = 7{,}1 \text{ МэВ}.$$

Задача 3.10.3

Ядро тория ${}^{230}_{90}Th$ превратилось в ядро ${}^{226}_{88}Ra$.

Какую частицу выбросило ядро ?

Решение

Запишем уравнение реакции:

$$ {}^{230}_{90}Th \rightarrow {}^{226}_{88}Ra + {}^{A}_{Z}X $$

Число нуклонов и полный заряд, пропорциональный числу протонов, не должны изменяться в ходе реакции, поэтому

$Z = 90 - 88 = 2$, $A = 230 - 226 = 4$.

Т.о., X - ядро атома гелия ${}^4_2He$, оно называется α - частицей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЗИКЕ

(электричество, магнетизм, оптика)

для слушателей,
обучающихся без отрыва от производства
на подготовительных отделениях
при высших учебных заведениях

Подписано в печать 15/XII-81 г. Формат 60×84¹/₁₆ Объем 6,25 п. л.
Уч.-изд. л. 5 Тираж 500 экз. Бесплатно. Изд. № 228-2 Заказ 2842

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31