

Физика

**КРЕДИТНО-МОДУЛЬНАЯ
СИСТЕМА**

Учебное пособие

**для иностранных студентов
инженерных специальностей**

В четырех модулях

Модуль

3

Колебания и волны

Оптика



Киев 2013

УДК 53:378.14(078.5)

ББК В30я7

Ф 503

Авторы: *В. В. Кулиш, А. Н. Соловьев, Е. Я. Кузнецова,
В. В. Гоженко, Ж. Н. Нетреба, Т. Н. Сакун*

Рецензенти:

Ю. И. Джежера — д-р физ.-мат. наук, проф.
(Национальный технический университет «КПИ»);

Б. С. Карпинос — д-р физ.-мат. наук, проф.
(Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко
Национальной академии наук Украины);

И. П. Ильчишин — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
(Институт физики Национальной академии наук Украины)

*Утверждено методическим редакционным советом
Национального авиационного университета
(протокол № 1/8 от 11.12.2008).*

Навчальний посібник — навчально-методичний комплекс робочих матеріалів для впровадження кредитно-модульної системи безпосередньо в студентську аудиторію. Весь матеріал поділено на навчальні модулі. Для кожного модуля подано мінімально необхідний лекційний матеріал (теоретичне ядро), де зазначено, яку його частину призначено для аудиторного вивчення, а яку — для самостійної роботи, включено повноцінні задачники з умовами завдань і прикладами розв'язання відповідно до тем предметного елемента, перелік тестових питань для поточного і модульного контролю, опис реальних і віртуальних лабораторних робіт тощо.

Для іноземних студентів інженерних спеціальностей.

Кулиш В. В.

Ф 503 Физика : учеб. пособие. В 4 м. М. 3. Колебания и волны. Оптика /
В. В. Кулиш, А. Н. Соловьев, Е. Я. Кузнецова [и др.]. — К. : НАУ,
2013. — 196 с.

ISBN 978-966-598-553-2

ISBN 978-966-598-742-0 (Модуль 3)

Учебное пособие — учебно-методический комплекс рабочих материалов для внедрения кредитно-модульной системы непосредственно в студенческую аудиторию. Весь материал разбит на учебные модули. Для каждого модуля представлен минимально необходимый лекционный материал (теоретическое ядро), где указано, какая его часть предназначена для аудиторного изучения, а какая — для самостоятельной работы, включены полноценные задачники с условиями задач и примерами решения в соответствии с темами предметного элемента, перечень тестовых вопросов для текущего и модульного контроля, описание реальных и виртуальных лабораторных работ и т. п.

Для иностранных студентов инженерных специальностей.

**УДК 53:378.14(078.5)
ББК В30я7**

ISBN 978-966-598-553-2

ISBN 978-966-598-742-0 (Модуль 3)

© Кулиш В. В., Соловьев А. Н.,
Кузнецова Е. Я. [и др.], 2013
© НАУ, 2013



Дайте мне материю и движение, и я построю Вселенную.

Рене Декарт

Путешествуя на корабле, кажется, что океан состоит из волн, а не из воды.

Э. С. Эдингтон

Нужно отметить, что над идеей Юнга сначала грубо смеялись. Однако понадобилось четверть столетия, чтобы она одержала победу над корпускулярной теорией света. Такая быстрая смена взглядов стала возможной в значительной степени благодаря блестящим исследованиям французского ученого Огюстена Френеля, которые он начал в 1815 году. Вот те причины, на основании которых физики XIX столетия пришли к выводу, что свет – это волны, а не частицы.

Бенеш Гофман (ученик А. Эйнштейна)

Модуль 3

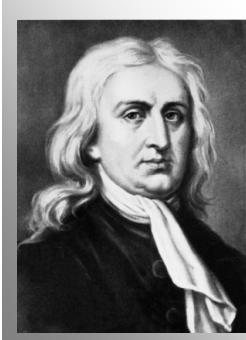
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ОПТИКА



Без опыта не существует достоверного знания.

Х. Гюйгенс

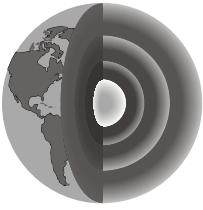


Если я видел дальше, то только потому, что стоял на плечах гигантов.

Исаак Ньютона

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Амплитуда силы тока	A, a_m, q_m, S_0	Напряженность электрического поля	E
	I_m	магнитного поля	H
Вектор волновой Пойтинга	J_n	Напряжение	σ
Пойтинга	S	Объём	V
Умова–Пойтинга	k	Падение напряжения	U_R, U_C, U_L
Время релаксации	t, τ	Плотность	
Высота	h	энергии объёмная	Ω
Декартовы координаты	x, y, z	полная	ϖ
Декремент затухания колебаний логарифмический	γ	кинетической энергии	ϖ_k
Радиус	δ	потенциальной энергии	ϖ_p
Диаметр	ε	Путь	s
Длина волн	d	Радиус-вектор	r, l
Длина волны	l, d	Разность хода оптическая	Δ
Добротность	λ	Работа	A
Емкость электрическая	Q	Сила	F
Заряд	C	электродвижущая (ЭДС)	ε
электрический		самоиндукции	ε_{si}
электрона	Q	тока	I
Импульс	e	Скорость	v
Индуктивность	p	групповая	u
Интенсивность	L	угловая	ω
Количество атомов	I	света в вакууме	c
Концентрация	N, n_0	фазовая	v
Коэффициент затухания колебаний	c	Смещение	x, x_0, s, r
поглощения	β	Сопротивление активное	R
сопротивления	k	волновое	R_x
упругости	r	реактивное	X, X_C, X_L
Масса	k	цепи переменного	
молярная		тока (импеданс)	Z
Модуль смещения	m	Угол	$\theta, \varphi, \alpha, \beta, \gamma$
объёмной деформации	μ	Энергия внутренняя	U
упругости	G	электрического поля	E_q
Напряжение (разность потенциалов)	K	кинетическая	E_k, W_k
	E	магнитного поля	E_m
	U	полная	E, W
		потенциальная	U, W_p



ПРЕДИСЛОВИЕ

Болонский этап реформы высшей школы Украины и переход к кредитно-модульной системе (КМС) организации учебного процесса поставили перед кафедрой задачу, решением которой является организационное обеспечение внедрения КМС непосредственно в студенческую аудиторию. Именно в таком направлении и проводилась в течение последних лет учебно-методическая работа в Национальном авиационном университете на кафедре теоретической физики. Авторы пришли к выводу, что основным организационным способом в данном случае может стать специальный учебно-методический комплекс рабочих материалов.

Авторы разделов «Теоретическое ядро», «Примеры решения задач», «Модульный контроль» — профессоры кафедры теоретической физики В. В. Кулиш, А. Н. Соловьев, Е. Я. Кузнецова, ассистент Т. Н. Сакун.

Задачи для самостоятельного решения по теме «Колебания и волны» подготовил доцент кафедры теоретической физики В. В. Гоженко, по теме «Оптика» ассистент кафедры теоретической физики Ж. Н. Нетреба.

Описание экспериментальных лабораторных работ «Интерференция света. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона», «Изучение явления дифракции света с помощью дифракционной решётки», «Изучение явления поляризации света» подготовила ассистент кафедры теоретической физики Ж. Н. Нетреба, описания виртуальных работ — доцент кафедры теоретической физики Э. С. Денисов.

**ПЛАН ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ФИЗИКЕ
ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ДВУХСЕМЕСТРОВОГО
И ТРЕХСЕМЕСТРОВОГО КУРСОВ**

Общее количество академических часов в рабочем учебном плане составляет соответственно 297 (пример)

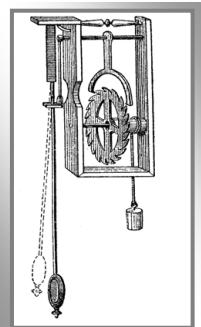
Номер недели	Модуль	Темы лекций	Темы практических занятий	Обязательные задачи	Индивидуальные задачи	Лабораторные работы по подгруппам
1	III Колебания и волны. Оптика	1. Свободные незатухающие колебания	Вводное занятие. Выдача заданий	Выдача заданий	Вводное занятие. Выдача заданий	Работа по графику
2		2. Сложение колебаний				
3		3. Свободные затухающие колебания	Свободные незатухающие и затухающие колебания	5, 8, 25, 36	Сдача задания № 1	Работа по графику
4		4. Механические волны				
5		5. Электромагнитные волны	Волны механические и электромагнитные	49, 55, 58, 63	Сдача задания № 2	Работа по графику
6		6. Интерференция световых волн				
7		7. Дифракция световых волн	Интерференция, дифракция световых волн	8, 12, 17, 28	Сдача задания № 3	Работа по графику
8		8. Поляризация света				
9	IV Квантовая и атомная физика	9. Дисперсия и рассеивание света	Поляризация и дифракция света	32, 37, 39, 44	Сдача задания № 4	Модульный контроль III
10		10. Квантовая оптика				
11		11. Теория Бора атома водорода	Квантовая оптика	4, 19, 21, 32	Сдача задания № 5	Работа по графику
12		12. Квантово-механическая теория излучения				

Окончание таблицы

Номер недели	Модуль	Темы лекций	Темы практических занятий	Обязательные задачи	Индивидуальные задачи	Лабораторные работы по подгруппам		
13	IV Квантовая и атомная физика	13. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры	Теория атома водорода	43, 50, 62, 78	Сдача задания № 6	Работа по графику		
14		14. Теория теплоёмкости кристаллов						
15		15. Квантовые статистики. Фононы				Работа по графику		
16		16. Электропроводность металлов и полупроводников. Магнитные свойства вещества	МОДУЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ IV					
17		17. Ядерная физика. Элементарные частицы	Заключительное занятие			Заключительное занятие		
18		18. Заключительная лекция	Заключительное занятие					

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Вектор Умова–Пойтинга 64
- Волновое уравнение 54
- Дифракция света
 - ◆ Фраунгофера 80
 - ◆ Френеля 80
- Декремент
 - ◆ затухания 14
 - ◆ логарифмический 14
- Закон Брюстера 94
 - ◆ Малюса 90
- Интерференция света 69
- Когерентные волны 71
- Колебания
 - ◆ свободные 9
 - ◆ затухающие 9, 12
 - ◆ незатухающие 9
 - ◆ вынужденные 17
- Метод зон Френеля 81
- Оптическая разность хода 73
- Период колебаний 13, 51
- Принцип
 - ◆ Гюйгенса 80
 - ◆ Гюйгенса–Френеля 80
- Разность фаз 71
- Резонанс 19
- Скорость волны
 - ◆ групповая 59
 - ◆ фазовая 51, 59
- Сложение колебаний 23, 24, 25, 26
- Уравнение
 - ◆ дифференциальное 9, 10, 13, 17
 - ◆ колебаний 9, 10, 13, 18
 - ◆ волны стоячей 55
- Частота колебаний
 - ◆ собственная 10
 - ◆ циклическая 13
- Энергия
 - ◆ колебаний 12, 14, 20
 - ◆ волны 63
 - ◆ механической 62, 63
- Эффект Допплера 65



ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЯДРО

*Аудиторный лекционный материал
и материал для самостоятельного изучения*

КОЛЕБАНИЯ

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

1.1. Понятие свободных незатухающих и затухающих колебаний

Свободными называются колебания, которые совершают система, выведенная из положения равновесия и предоставленная самой себе. При отсутствии сил трения и сопротивления полная механическая энергия системы будет сохраняться и колебания будут незатухающими. При наличии сил трения и сопротивления полная механическая энергия убывает, и колебания будут затухающими.

1.2. Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний и его решение

Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний можно получить на основании второго закона Ньютона.

Рассмотрим конкретную колебательную систему: груз, подвешенный на пружине (рис. 1.1).

Полагаем, что вся масса системы сосредоточена в грузе, силы трения и сопротивления отсутствуют. Сместим груз на величину x от положения равновесия, тогда на груз будет действовать сила упру-

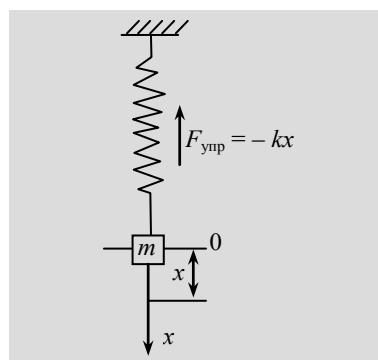


Рис. 1.1

гости пружины $F_{\text{упр}} = -kx$, где k — коэффициент упругости. Под действием этой силы груз начнет двигаться к положению равновесия. Достигнув положения равновесия, груз будет иметь некоторую скорость и, двигаясь по инерции, начнет сжимать пружину.

Израсходовав свою кинетическую энергию на работу сжатия пружины, груз остановится и под действием возвращающей силы начнет вновь двигаться к положению равновесия. В системе возникнут свободные колебания.

Сила, которая возвращает тело, отклонённое от положения равновесия в это положение, называется *возвращающей*. Возвращающая сила в колебательной системе может возникать также и за счёт других сил, например, силы тяжести для математического маятника, электрических сил для колебаний атомов и молекул в твердом теле.

Согласно второму закону Ньютона

$$\sum F = \frac{dx^2}{dt^2},$$

так как

$$\sum F = -kx, \quad v = \frac{dx}{dt},$$

то

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}.$$

После преобразований получаем дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0,$$

где $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$.

Решив это уравнение, определяем

$$x = A \cos(\omega_0 t + \phi),$$

т. е. свободные незатухающие колебания являются гармоническими.

Здесь x — смещение тела от положения равновесия; A — амплитуда, т. е. наибольшее смещение; $\omega_0 t + \phi$ — фаза колебаний; ϕ —

начальная фаза; $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — собственная круговая частота.

График гармонических колебаний изображен на рис. 1.2.

Частота ω_0 зависит только от параметров системы: массы груза и жесткости пружины

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

или длины нити для математического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

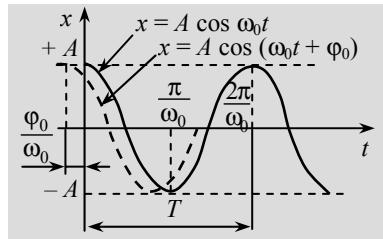


Рис. 1.2

1.3. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях

Скорость тела при гармонических колебаниях

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Ускорение

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Сравним по фазе смещение, скорость и ускорение тела. Для этого приведём формулы для v и a к такому же виду, как $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$:

$$v = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$a = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi).$$

Сравнив фазы, найдем, что скорость опережает смещение на $\frac{\pi}{2}$,

т. е. когда $x = A$, $v = 0$, и наоборот, $v = A\omega_0$, $x = 0$.

Смещение и ускорение находятся в противофазе: когда $x = +A$, то $a = -A\omega_0^2$, и наоборот, если $x = -A$, то $a = A\omega_0^2$.

Это хорошо видно на графиках (рис. 1.3).

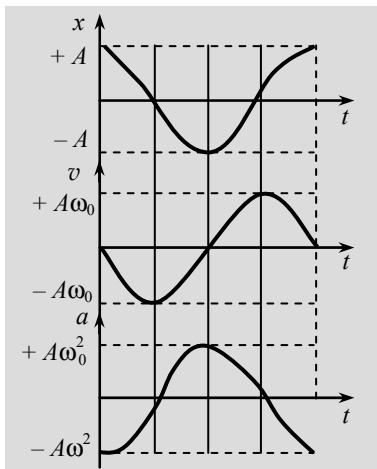


Рис. 1.3

1.4. Полная энергия гармонических колебаний

Полная энергия тела при гармонических колебаниях слагается из кинетической и потенциальной энергий:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi);$$

$$\begin{aligned} E_{\text{п}} &= \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega_0^2}{2} x^2 = \\ &= \frac{m\omega_0^2 A^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi); \end{aligned}$$

$$W_{\text{пол}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2} [\sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi)] = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2}.$$

Это означает, что для гармонических колебаний выполняется закон сохранения механической энергии.

1.5. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний и его решение

Колебания всегда происходят в какой-то среде, которая оказывает сопротивление движению колеблющегося тела. Это приводит к затуханию колебаний. Если в воздухе силы сопротивления малы, то в жидкости ими пренебрегать нельзя.

Введем в систему (см. рис. 1.1) элемент, создающий силу сопротивления. Для этого присоединим к грузу пластинку и опустим ее в стакан с жидкостью (рис. 1.4).

Теперь на систему, кроме силы упругости $F = -kx$, будет действовать сила сопротивления, возникающая при движении пластины

$$F_{\text{сон}} = -rv,$$

где r — коэффициент сопротивления среды.

Согласно второму закону Ньютона

$$-kx - rv = \frac{d(mv)}{dt}.$$

Отсюда, обозначив $r/m = 2\beta$, получим дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0.$$

Его решение

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

где $\beta = r/2m$ — коэффициент затухания; $\omega = \sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}$ — круговая частота затухающих колебаний; A_0 — начальная амплитуда.

На рис. 1.5 изображен график свободных затухающих колебаний.

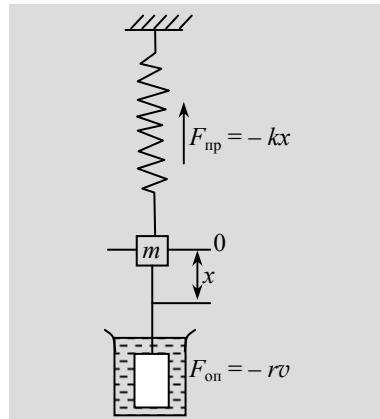


Рис. 1.4

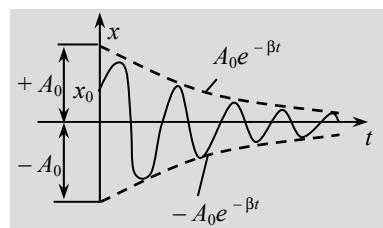


Рис. 1.5

1.6. Характеристики затуханий

Затухание колебаний, т. е. уменьшение их амплитуды, зависит от коэффициента затухания β :

$$A = A_0 e^{-\beta t}.$$

При $\beta = \omega_0$ период колебаний обращается в бесконечность, так как

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

Это означает, что в случае $\omega_0 \leq \beta$ движение перестаёт быть периодическим и становится апериодическим. Выведенная из положения равновесия система, не совершая колебаний, стремится к положению равновесия.

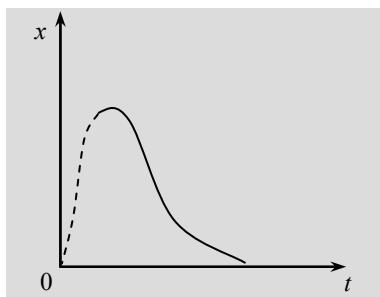


Рис. 1.6

Движение перестает быть периодическим. График апериодического процесса показан на рис. 1.6.

Характеристиками затухания, кроме \$\beta\$, являются декремент затухания \$\gamma\$ и логарифмический декремент затухания \$\delta\$.

Декремент затухания равен отношению двух соседних амплитуд

$$\gamma = \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta t},$$

а логарифмический декремент затухания

$$\delta = \ln \gamma = \beta T.$$

Энергия затухающих колебаний со временем уменьшается

$$W = \frac{m\omega_0^2 A_0^2 e^{-2\beta t}}{2} = W_0 e^{-2\beta t},$$

так как под действием сил трения и сопротивления механическая энергия колебаний превращается во внутреннюю энергию окружающих тел.

Методические указания



Необходимо понять и усвоить

- Свободные колебания возникают только при наличии возвращающей силы, которая появляется при отклонении системы от положения равновесия.
- Возвращающая сила независимо от ее природы всегда пропорциональна смещению системы из положения равновесия $F = -kx$.
- Система, выведенная из положения равновесия, обладает потенциальной энергией, численно равной работе возвращающей силы

$$E_{\text{п}} = \int_0^x |F| dx = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2}.$$

4. В процессе колебаний всё время происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую и наоборот.

5. Если силы трения и сопротивления отсутствуют, то на систему действует только возвращающая сила, являющаяся консервативной. Для системы будет выполняться закон сохранения механической энергии.

Полная механическая энергия колебаний сохраняется, и колебания будут незатухающими или гармоническими.

6. При наличии диссипативных сил (трения, сопротивления) полная механическая энергия системы уменьшается, так как часть этой энергии расходуется на работу против этих сил и переходит во внутреннюю энергию колеблющейся системы и окружающей среды.



Следует запомнить

$F = -kx$ — возвращающая сила;

$F = -rv$ — сила сопротивления;

$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ — уравнение свободных незатухающих колебаний;

$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi)$ — уравнение свободных затухающих колебаний;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — собственная циклическая частота груза, подвешенного на пружине;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ — собственная циклическая частота математического маятника;

$\omega = \sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}$ — циклическая частота свободных затухающих колебаний;

$\gamma = \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta t}$ — декремент затухания;

$\delta = \ln \gamma = \beta T$ — логарифмический декремент затухания.



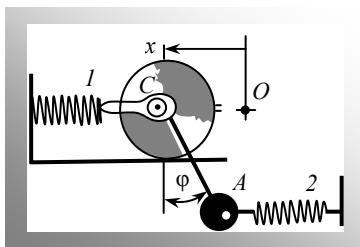
Надо уметь

1. Составлять дифференциальные уравнения свободных незатухающих и затухающих колебаний.
2. Строить графики гармонических и затухающих колебаний.
3. Анализировать уравнения колебаний и раскрыть физическое содержание входящих в эти уравнения величин.
4. Вычислять скорость и ускорение по уравнению гармонических колебаний.



Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются свободными?
2. При каких условиях колебания будут незатухающими или затухающими?
3. Что такое возвращающая сила?
4. На основании какого закона составляются дифференциальные уравнения колебаний?
5. Выполняется ли закон сохранения механической энергии для гармонических и затухающих колебаний?
6. Что такое декремент затухания и логарифмический декремент затухания?
7. При каком условии колебательное движение становится апериодическим?



2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

2.1. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение

Вынужденными называются колебания, которые совершают система под действием внешней периодически изменяющейся силы. Эта сила называется *вынуждающей*.

Введем в систему (см. рис. 1.4) элемент, создающий вынуждающую силу. Соединим с системой магнитный сердечник и поместим его внутрь катушки (рис. 2.1). Подведем к катушке переменное напряжение, изменяющееся со временем по гармоническому закону $U = U_0 \cos(\omega t)$.

На систему действуют теперь три силы: сила упругости пружины $F_{\text{упр}} = -kx$, сила сопротивления $F_c = -rv$ и вынуждающая сила $F_b = F_0 \cos(\omega t)$.

По второму закону Ньютона

$$-kx - rv + F_0 \cos(\omega t) = \frac{d(mv)}{dt}.$$

Отсюда после преобразований получаем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t).$$

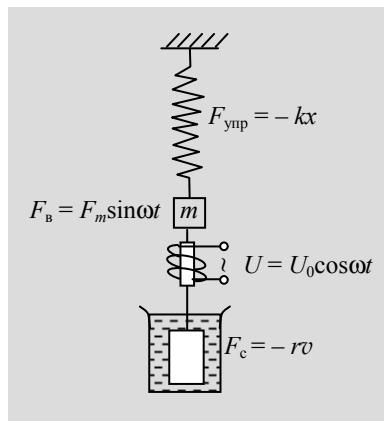


Рис. 2.1

При наличии вынуждающей силы в системе одновременно возникают свободные и вынужденные колебания. Свободные колебания со временем затухают и в системе устанавливаются вынужденные колебания с частотой, равной частоте вынуждающей силы

$$x = A \cos(\omega t + \phi).$$

Амплитуда вынужденных колебаний A зависит от вынуждающей силы F_0 и частоты вынуждающей силы ω , от массы m , собственной частоты колебаний системы ω_0 и от коэффициента затухания β :

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}.$$

Начальная фаза вынужденных колебаний ϕ или отставание по фазе смещения x от вынуждающей силы F определяется формулой:

$$\phi = \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

2.2. Амплитудные характеристики, условие резонанса, добротность колебательной системы

Амплитудными характеристиками вынужденных колебаний называется зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы для различных значений β , т. е. $A = A(\omega)$. Для построения этой зависимости проанализируем выражение для амплитуды вынужденных колебаний.

Если $\omega = 0$, то для всех β

$$A = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{k} = x_0,$$

где x_0 — это смещение системы из положения равновесия под действием постоянной силы F_0 .

Если $\omega \rightarrow \infty$, то для всех β $A \rightarrow 0$.

Это означает, что при очень большой частоте вынуждающей силы система вследствие инертности не успевает смещаться из положения равновесия.

Если $\omega = \omega_0$, то для $\beta = 0$ $A = \infty$.

Явление резкого возрастания амплитуды ($A \rightarrow \infty$) при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний системы ($\omega = \omega_0$) называется *резонансом*.

В реальной системе при наличии затухания ($\beta \neq 0$) явление резонанса наступает при некоторой частоте, отличной от ω_0 .

Условие резонанса для $\beta \neq 0$ можно получить, исследовав выражение для амплитуды вынужденных колебаний на экстремум. Амплитуда будет максимальна при минимуме выражения $\left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2 \right]$, стоящего в знаменателе. Из условия равенства нулю первой производной

$$\frac{d}{d\omega} \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2 \right] = 0$$

находим значение резонансной частоты

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

В случаях, когда резонанс нежелателен, так как может привести к разрушению системы, необходимо выполнить условие $\omega_0^2 \leq 2\beta^2$. В этом случае резонанс в системе не наступает.

Проведенный анализ позволяет построить амплитудные характеристики вынужденных колебаний (рис. 2.2).

Во многих областях техники (радиотехника, акустика и т. д.) явление резонанса полезно и широко используется. Качество колебательной системы, её способность накапливать энергию, поступающую от внешнего источника, характеризуется добротностью Q .

Добротность определяется отношением амплитуды колебаний при $\omega = \omega_0$ к смещению системы при $\omega = 0$ ($A_{\omega=0} = x_0$).

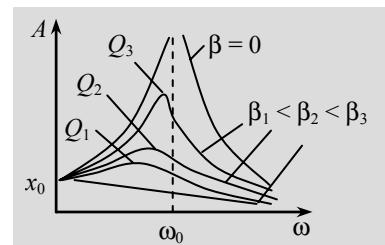


Рис. 2.2

$$Q = \frac{A_{\omega=\omega_0}}{x_0} = \frac{\omega_0}{2\beta}.$$

Чем меньше β , тем больше амплитуда колебаний и меньше работа против сил сопротивления.

Энергия колебаний зависит и от ω_0

$$W = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2}.$$

Поэтому с энергетической точки зрения добротность определяется отношением энергии, накопленной системой в процессе колебаний, к работе против сил сопротивления.

Чем больше добротность системы, тем выше и уже пик резонансной кривой: $Q_1 < Q_2 < Q_3$ (рис. 2.2).

2.3. Фазовые характеристики

Фазовыми характеристиками вынужденных колебаний является зависимость сдвига фаз от частоты вынуждающей силы $\varphi = \varphi(\omega)$.

Проанализируем выражение для $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

При $\omega \rightarrow \omega_0 - \Delta\omega$ $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow +\infty$, при $\omega \rightarrow \omega_0 + \Delta\omega$ $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow -\infty$, т. е. в точке $\omega = \omega_0$ значение $\operatorname{tg} \varphi$ меняется скачком от $+\infty$ до $-\infty$, что соответствует изменению фазы колебаний φ на величину π . При малых β этот скачок фазы колебаний выражен более ярко (рис. 2.3).

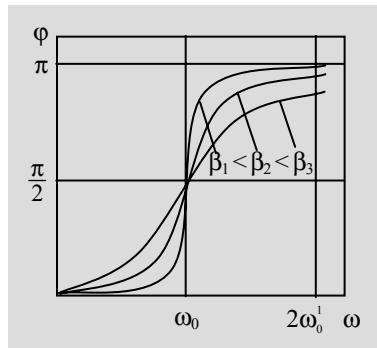


Рис. 2.3



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Внешняя периодически действующая сила $F = F_0 \cos(\omega t)$ вынуждает систему колебаться с частотой, равной частоте вынуждающей силы. При этом в систему непрерывно поступает энергия от внешнего источника и расходуется на работу против сил сопротивления.
2. При резонансной частоте создаются условия для накопления системой энергии, поступающей от внешнего источника, что приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний, в особенности при малых β (малом затухании).



Следует запомнить

1. Определение вынужденных колебаний.
2. Формулы:

$x = A \cos(\omega t + \varphi)$ — уравнение вынужденных колебаний;

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \quad \text{— амплитуда вынужденных колебаний;}$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad \text{— фаза вынужденных колебаний;}$$

$$Q = \frac{A_{\omega=\omega_0}}{x_0} = \frac{\omega_0}{2\beta} \quad \text{— добротность системы.}$$



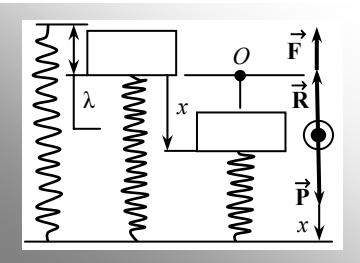
Надо уметь

1. Составлять дифференциальное уравнение вынужденных колебаний.
2. Анализировать выражения для амплитуды и фазы вынужденных колебаний.
3. Вывать формулу резонансной частоты.
4. Строить амплитудные и фазовые характеристики вынужденных колебаний.



Контрольные вопросы

1. Почему при $\omega \rightarrow \infty$ амплитуда вынужденных колебаний стремится к нулю?
2. Как из выражения амплитуды вынужденных колебаний получить формулу для резонансной частоты?
3. Что происходит в системе при наступлении резонансной частоты?
4. Каков физический смысл добротности колебаний?
5. Что такое амплитудные и фазовые характеристики вынужденных колебаний?
6. Как по амплитудным характеристикам вынужденных колебаний можно судить о добротности системы?
7. Почему при $\omega = \omega_0$ фаза вынужденных колебаний изменяется скачком на π ?



3. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

3.1. Задача сложения колебаний

Одно и то же тело может одновременно участвовать в нескольких колебательных движениях. Общий случай сложения колебаний представляет сложную задачу. Поэтому рассмотрим лишь некоторые частные случаи сложения гармонических колебаний. Анализ результирующего движения заключается:

- в нахождении уравнения движения при сложении колебаний по одной оси;
- в нахождении уравнения траектории при сложении взаимно перпендикулярных колебаний.

Найдение уравнения результирующего движения в некоторых случаях упрощается и становится наглядным с помощью векторной диаграммы.

3.2. Векторная диаграмма

Гармоническое колебание $x = A \cos(\omega t + \phi_0)$, изображенное графически в виде врачающегося вектора на плоскости, называется *векторной диаграммой*. Возьмем вектор, модуль которого равен амплитуде колебания A .

Поместим его начало в точку O на оси x так, чтобы его направление с осью x составило угол ϕ_0 (рис. 3.1).

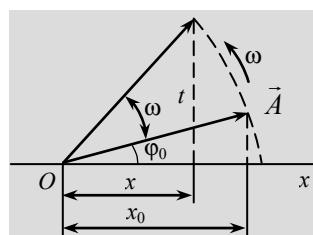


Рис. 3.1

Приведем вектор \vec{A} во вращение вокруг точки O с угловой скоростью, равной круговой частоте колебаний ω . Проекция конца вектора \vec{A} на ось x будет совершать колебания в соответствии с уравнением $x = A \cos(\omega t + \phi_0)$.

3.3. Сложение колебаний одинаковой частоты, происходящих по одной оси

Тело одновременно участвует в двух колебаниях, заданных уравнениями

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1);$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_2).$$

Колебания происходят по одной оси, поэтому результирующее смещение в любой момент времени равно алгебраической сумме смещений

$$x = x_1 + x_2.$$

Это сложение удобно выполнить графически.

Представим оба колебания x_1 и x_2 в виде вращающихся векторов \vec{A}_1 и \vec{A}_2 (рис. 3.2). Найдем по правилу сложения векторов результирующий вектор

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

Вектор \vec{A} вращается также с угловой скоростью ω , равной частоте складываемых колебаний.

Проекция его на ось x в любой момент времени определяется

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega t + \phi),$$

т. е. результирующее колебание является также гармоническим.

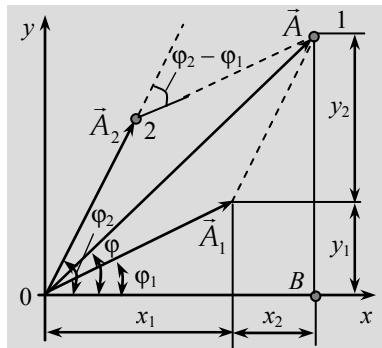


Рис. 3.2

Амплитуду результирующего колебания определим из треугольника OA_2A по теореме косинусов

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos[\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)]$$

или

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Если $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$, то $A = A_1 + A_2$, если $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm\pi$, то $A = |A_1 - A_2|$ и в случае $A_1 = A_2, A = 0$, т. е. складываемые колебания полностью гасят друг друга.

Начальную фазу результирующего колебания найдем, определив из треугольника OAB

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{x_1 + x_2} = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

3.4. Сложение колебаний одинаковой амплитуды и мало различающиеся частоты. Биения

Складываются два колебания

$$x_1 = A \cos(\omega t)$$

и

$$x_2 = A \cos[(\omega + \Delta\omega)t].$$

Поскольку частоты колебаний отличаются мало, то $\Delta\omega \ll \omega$. Начало отсчёта времени выбрано таким образом, что начальные фазы складываемых колебаний равняются нулю. Это нетрудно сделать, так как фазы складываемых колебаний различны.

Сложим уравнения для x_1 и x_2 по формуле суммы косинусов и получим

$$x = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos \omega t.$$

Во втором члене пренебрегаем $\frac{\Delta\omega}{2}$, поскольку $\Delta\omega \ll \omega$.

Множитель $\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)$ изменяется со временем намного медленнее, чем $\cos\omega t$, поэтому полученное уравнение можно рассматривать как гармоническое колебание с периодически изменяющейся амплитудой (рис. 3.3). Такое колебание называется биением.

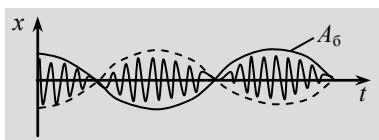


Рис. 3.3

Так как амплитуда колебаний всегда положительна, то амплитудой биений является

$$A_b = 2A \left| \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \right|.$$

Частота изменения амплитуды равна $\Delta\omega$, так как частота изменения функции $\left| \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \right|$ вдвое больше, чем $\cos\frac{\Delta\omega}{2}t$.

Биения являются частным случаем амплитудной модуляции.

3.5. Сложение колебаний одинаковой частоты, происходящих по двум взаимно перпендикулярным осям

Тело одновременно участвует в двух колебаниях, происходящих вдоль координатных осей X и Y . Выберем начало отсчёта времени так, чтобы начальная фаза одного из колебаний равнялась нулю.

$$\begin{aligned} x &= A \cos \omega t; \\ y &= B \cos(\omega t + \phi). \end{aligned}$$

Для нахождения траектории результирующего движения исключим время из уравнений колебаний.

Из первого уравнения

$$\cos \omega t = \frac{x}{A}, \quad \sin \omega t = \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}.$$

Во втором уравнении раскроем $\cos(\omega t + \phi)$ по формуле косинуса суммы и, подставив вместо $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ их значения, получим

$$\frac{y}{R} = \frac{x}{A} \cos \phi - \sin \phi \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}.$$

Это уравнение преобразуем к виду

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

Полученное уравнение есть уравнение эллипса, оси которого ориентированы произвольно относительно координатных осей x и y .

Рассмотрим форму траектории для некоторых частных случаев.

Если $\Delta\varphi = \varphi = 0$, уравнение принимает вид

$$\left(\frac{x}{A} - \frac{y}{B} \right)^2 = 0; \quad y = \frac{B}{A}x.$$

Это уравнение прямой, проходящей через начало координат под углом к оси x , тангенс которого равен B/A (рис. 3.4).

При $\Delta\varphi = \varphi = +\pi$

$$\left(\frac{x}{A} + \frac{y}{B} \right)^2 = 0; \quad y = -\frac{B}{A}x.$$

Это также уравнение прямой с тангенсом угла наклона к оси x , равным B/A .

При $\Delta\varphi = \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ получаем уравнение эллипса, приведенного к координатным осям x и y (рис. 3.5).

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1.$$

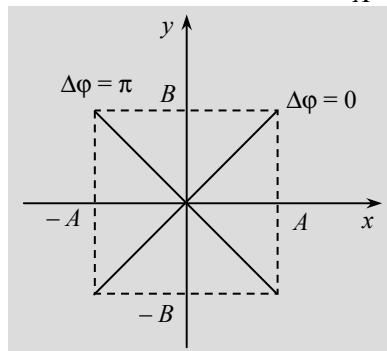


Рис. 3.4

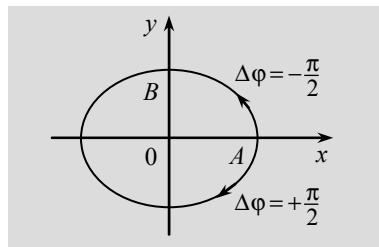


Рис. 3.5

При $A = B$ эллипс превращается в окружность (рис. 3.6).

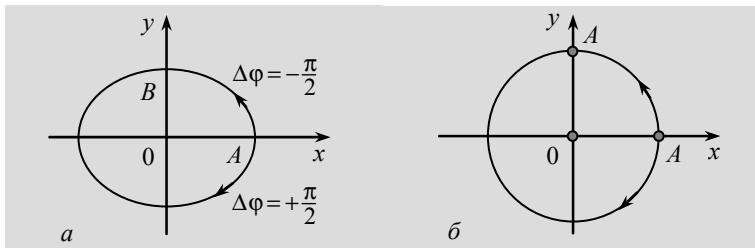


Рис. 3.6

Случаи $\Delta\phi = \phi = -\frac{\pi}{2}$ и $\Delta\phi = \phi = +\frac{\pi}{2}$ отличаются направлением движения по эллипсу или окружности.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

Задача сложений колебаний основывается на принципе независимости движения: если тело одновременно участвует в нескольких движениях, то каждое из движений совершается независимо от других.



Следует запомнить

1. Любое гармоническое колебание можно представить в виде вектора, врачающегося на плоскости. Такое представление называется векторной диаграммой.

2. Задача сложения колебаний одинаковой частоты, происходящих по одной оси, заключается в нахождении уравнения результирующего колебания. Для этого следует использовать векторную диаграмму.

3. Сложение двух колебаний по одной оси с одинаковыми амплитудами и близкими частотами производится аналитически по

формуле суммы косинусов. Полученное уравнение представляет собой гармоническое колебание с изменяющейся амплитудой и называется биением. Биение — это частный случай амплитудной модуляции.

4. Задача сложения двух колебаний, происходящих по двум взаимно перпендикулярным осям X и Y , заключается в нахождении уравнения траектории результирующего движения путем исключения времени из уравнений движения по осям X и Y .



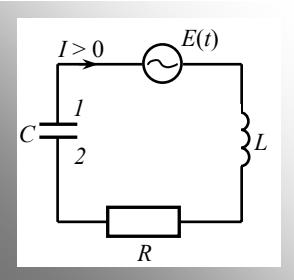
Надо уметь

1. Строить векторную диаграмму. С помощью векторной диаграммы найти амплитуду и фазу результирующего колебания при сложении колебаний с одинаковыми частотами, происходящими по одной оси.
2. Выводить и анализировать формулу биений.
3. Получать уравнение траектории при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний и анализировать частные случаи для сдвига фаз $\varphi = 0; \varphi = \pm \pi; \varphi = \pm \pi/2$.



Контрольные вопросы

1. Что такое векторная диаграмма?
2. В каком случае колебания по одной оси полностью гасят друг друга?
3. Почему частота биений равна $\Delta\omega$, а не $\Delta\omega/2$, как это может показаться при рассмотрении уравнения биений $x = A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos \omega t$?
4. Проанализировать, чем отличаются случаи $\varphi = +\pi/2$ и $\varphi = -\pi/2$ при сложении взаимно перпендикулярных колебаний.



4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

4.1. Свободные незатухающие электрические колебания

Свободные незатухающие колебания возникают в колебательном контуре, изображенном на рис. 4.1. Контур состоит из конденсатора ёмкости C и катушки индуктивности L .

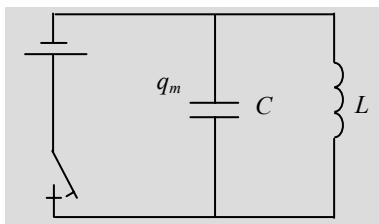


Рис. 4.1

Если зарядить конденсатор до значения заряда q_m , а потом замкнуть цепь, то конденсатор начнет разряжаться. В цепи появится электрический ток и в катушке индуктивности возникнет ЭДС самоиндукции ε_{si} . Энергия электрического поля конденсатора будет переходить в энергию магнитного поля катушки, и наоборот.

Таким образом, будут происходить незатухающие колебания заряда, если энергия контура не будет рассеиваться.

Чтобы получить дифференциальное уравнение электрических колебаний, воспользуемся обобщенным законом Ома для неоднородной цепи:

$$IR = \Delta\phi + \sum \varepsilon_i .$$

Активное сопротивление отсутствует: $R = 0$. Падение напряжения также равно нулю: $IR = 0$. Разница потенциалов на обкладках конденсатора

$$\Delta\phi = -\frac{q}{C} .$$

Сумма ЭДС равна ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Но

$$I = \frac{dq}{dt}$$

и тогда

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Подставив выражение для разницы потенциалов и ЭДС в закон Ома, получим

$$0 = -\frac{q}{C} - L \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Введя обозначение

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2$$

получаем **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ НЕЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0.$$

По форме уравнение полностью идентично уравнению свободных незатухающих механических колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

Видно, что заряд q — аналог смещения x ; индуктивность L — аналог массы m ; $1/C$ — аналог жесткости k .

Решение дифференциального уравнения также имеет аналогичный вид:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi_0).$$

Примечание. Константы в этом уравнении имеют такой же смысл, как и для механических колебаний:

q_m — амплитуда колебаний заряда;

$\omega_0 \sqrt{\frac{1}{LC}}$ — собственная циклическая частота;

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ — период собственных колебаний;

$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ — фаза колебаний;

φ_0 — начальная фаза.

СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДА, которая равна первой производной от заряда по времени, — это **СИЛА ТОКА**:

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right).$$

Сила тока в колебательном контуре производит гармонические колебания, частота которых равна собственной частоте контура ω_0 , амплитуда силы тока зависит не только от амплитуды заряда, но и от частоты, а фаза колебаний силы тока отличается от фазы колебаний заряда на $\frac{\pi}{2}$.

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ — это энергия заряженного конденсатора:

$$E_q = \frac{q}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2 \omega_0 t.$$

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ — это энергия, накопленная в катушке:

$$E_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_0 t.$$

Поскольку L и C связаны через собственную частоту:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

то формулу для энергии магнитного поля можно записать так:

$$E_m = \frac{q_m^2}{2C} \sin \omega_0 t.$$

Таким образом, амплитуды колебаний электрической и магнитной энергий одинаковы, а частота колебаний в два раза больше чем у колебаний заряда и тока.

ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ электромагнитных колебаний равна сумме электрической и магнитной энергий:

$$E = E_q + E_m = \frac{q_m^2}{2C} (\cos^2 \omega_0 t + \sin^2 \omega_0 t) = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Как видно, полная энергия не зависит от времени, она постоянна. Полная энергия равна максимальному значению энергии магнитного поля в катушке, или максимальному значению энергии электрического поля в конденсаторе.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

Свободные незатухающие колебания производит система, к которой не подводится энергия снаружи и которая не тратит свою энергию.

Во время электрических колебаний энергия электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля, и наоборот.



Следует запомнить

Формулы:

$q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi_0)$ — уравнение свободных незатухающих колебаний;

$\omega_0 = \frac{1}{LC}$ — собственная циклическая частота колебательного контура.



Надо уметь

- Составлять дифференциальное уравнение свободных незатухающих электрических колебаний.
- Анализировать уравнение незатухающих колебаний и раскрыть физическое значение величин, входящих в это уравнение.

4.2. Затухающие электрические колебания

Затухающие электрические колебания происходят в цепи, где кроме емкости C и индуктивности L есть еще и активное сопротивление R (рис. 4.2).

Энергия, накопленная в конденсаторе во время его зарядки, постепенно рассеивается при прохождении тока через активное сопротивление соответственно закону Джоуля–Ленца. Колебания заряда и тока при этом затухают.

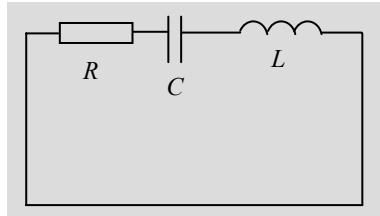


Рис. 4.2

Уравнение колебаний

Обобщенный закон Ома:

$$IR = \Delta\varphi + \sum \varepsilon_i.$$

Для данного случая:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad \Delta\varphi = -\frac{q}{C}, \quad \sum \varepsilon_i = \varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Подставим все это в обобщенный закон Ома

$$R = \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{C} - L \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Обозначив

$$\frac{R}{L} = 2\beta, \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2,$$

получим **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0.$$

Примечание. Это уравнение полностью совпадает по форме с уравнением свободных затухающих механических колебаний. Поэтому и решение, и характеристики затухания будут полностью совпадать с механическими колебаниями.

Решение:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi_0).$$

Частота затухающих электрических колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Амплитуда затухающих электрических колебаний:

$$q_m = q_0 e^{-\beta t} = q_0 \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right).$$

Характеристика затухающих электрических колебаний

КОЭФФИЦИЕНТ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

$$\beta = \frac{R}{2L}.$$

ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2L}{R}.$$

ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

$$\gamma = \frac{A_n}{A_{n+1}} = \exp(\beta T) = \exp\left(\frac{RT}{2L}\right) = \exp\left(\frac{R\pi}{\sqrt{L/C}}\right).$$

ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

$$\delta = \ln \gamma = \beta T = \left(\frac{\pi R}{\sqrt{L/C}} \right).$$

ДОБРОТНОСТЬ

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \frac{1}{R} \sqrt{L/C} = \frac{R_x}{R}.$$

Величину $\sqrt{L/C} = R_x$ называют **ВОЛНОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ**. Поэтому можно сказать, что добротность определяется соотношением волнового сопротивления к активному сопротивлению.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Механические колебания будут затухать, если в системе действуют силы трения или сопротивления. Тогда полная механическая энергия системы тратится на работу против неконсервативных сил и переходит во внутреннюю энергию колебательной системы и окружающей среды,
2. Электрические колебания будут затухать, если в колебательном контуре есть активное сопротивление R . Согласно закону Джоуля–Ленца на нем во время прохождения тока выделяется теплота. Полная энергия колебательного контура уменьшается.
3. Аналогом сил сопротивления в электрических колебаниях выступает активное сопротивление, аналогом массы, то есть характеризирует инертные свойства, — индуктивность.



Следует запомнить

1. Характеристики затухающих колебаний.
2. Формулы:

$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi_0)$ — уравнение свободных затухающих электрических колебаний;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$
 — частота затухающих колебаний;



Надо уметь

1. Составлять дифференциальное уравнение свободных затухающих электрических колебаний.
2. Анализировать уравнение затухающих колебаний и раскрыть физическое значение величин, входящих в это уравнение.
3. Анализировать влияние характеристик затухания на скорость затухания колебаний.

4.3. Электрические вынужденные колебания (для самостоятельного изучения)

Вынужденные электрические колебания происходят в цепи, где кроме R , L , C существует также источник тока с периодически изменяющейся ЭДС (рис. 4.3).

ЭДС изменяется по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Обобщенный закон Ома:

$$IR = \Delta\phi + \sum \varepsilon_i.$$

Для рассматриваемой цепи:

$$\Delta\phi = -\frac{q}{c}, \quad I = \frac{dq}{dt}, \quad \sum \varepsilon_i = \varepsilon_{si} + \varepsilon.$$

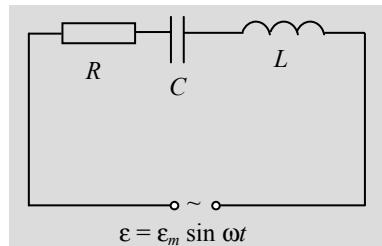


Рис. 4.3

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2}, \quad \varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Тогда

$$R \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{C} - L \frac{d^2q}{dt^2} + \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Поделив на L и обозначив

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad \frac{R}{L} = 2\beta,$$

получим **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**:

$$\boxed{\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t.}$$

Замечание. Оно по форме такое же, как и дифференциальное уравнение вынужденных механических колебаний. Поэтому совпадает и решение:

$$\boxed{q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0).}$$

В рассмотренной электрической цепи происходят незатухающие колебания заряда. Решение справедливо после завершения переходного процесса.

Формула для амплитуды колебаний заряда аналогична формуле для амплитуды механических колебаний

$$q_m = \frac{\epsilon_m / L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} = \frac{\epsilon_m / L}{\sqrt{(1/LC - \omega^2)^2 + \omega^2 L^2 / R^2}}.$$

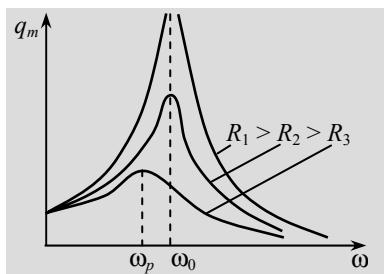


Рис. 4.4

На рис. 4.4 изображены амплитудные характеристики, то есть зависимость амплитуды заряда q_m от частоты источника переменного тока ω при различных значениях электрического сопротивления R .

Индуктивность L и ёмкость C остаются неизменными. Остается также неизменной собственная частота колебаний контура

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Эти амплитудные характеристики для заряда обычно такие же, как и для механических колебаний, поскольку формулы совпадают. При $\omega \rightarrow 0$ имеет место **СТАТИЧЕСКАЯ АМПЛИТУДА ЗАРЯДА**:

$$q_c = \epsilon_m C = q_0,$$

где q_0 — это тот заряд, который накапливается на конденсаторе под действием постоянной ЭДС, равной ϵ_m .

«Чистый» резонанс возникает, если $\omega = \omega_0$, а $R = 0$. Амплитуда заряда стремится к бесконечности, поскольку нет потери энергии на джоулево тепло.

Для произвольного значения электрического сопротивления R максимум амплитуды заряда достигается при резонансной частоте, равной:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \omega_0 \sqrt{1 - R^2 / 2R_x^2},$$

где $R_x = \sqrt{L/C}$ — **ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**.

Максимальная амплитуда заряда в резонансе:

$$q_p = \frac{\epsilon_m / L}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}} = \frac{\epsilon_m}{R\omega_0\sqrt{1 - R^2/R_x^2}}.$$

Фазовые характеристики для заряда также полностью повторяют фазовые характеристики для смещения механических колебаний.

Сдвиг фаз между ЭДС источника переменного тока и колебаниями заряда определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_q = \frac{2\beta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} = \frac{R}{1/\omega C - \omega L}.$$

На рис. 4.5 показана зависимость сдвига фаз φ_q от частоты возбуждающей силы ω для разных значений электрического сопротивления R , то есть фазовые характеристики.

Видно, что при чистом резонансе, когда $\omega = \omega_0$, сдвиг фаз равен $\pi/2$ для любых R .

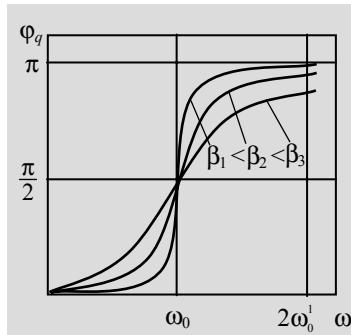


Рис. 4.5

Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Внешняя сила, которая действует периодически, заставляет систему производить колебания с частотой, которая равна частоте этой внешней силы. При этом в систему непрерывно поступает энергия от внешнего источника и тратится на работу против сил сопротивления.

2. В электрических вынужденных колебаниях аналогом внешней силы есть периодически изменяющаяся ЭДС.

3. При резонансной частоте создаются условия для накопления системой энергии, которая поступает от внешнего источника.

Результатом такого накопления энергии есть резкое увеличение амплитуды колебаний, особенно при малом коэффициенте затухания.



Следует запомнить

1. Амплитудные и фазовые характеристики вынужденных электрических колебаний.

2. Формулы:

$q = q_m \cos(\omega t + \phi_q)$ — уравнение вынужденных электрических колебаний;

$$q_m = \frac{\epsilon_m / L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \text{ — амплитуда колебаний заряда.}$$

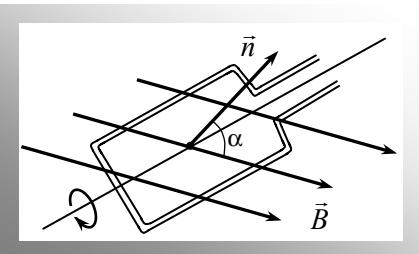


Надо уметь

1. Составлять дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний.

2. Строить амплитудные и фазовые характеристики вынужденных электрических колебаний.

3. Анализировать уравнение для амплитуды и фазы вынужденных электрических колебаний.



5. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК (для самостоятельного изучения)

5.1. Вынужденные колебания силы тока

Если заряд производит незатухающие гармонические колебания, то и сила тока, как скорость изменения заряда, будет производить гармонические колебания той же частоты ω :

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega \sin(\omega t + \varphi_q) = q_m \omega \cos(\omega t + \varphi_q + \pi/2),$$

где $q_m \omega = I_m$ — амплитуда силы тока; $\varphi_q + \pi/2 = \varphi_x$ — разность фаз между силой тока и ЭДС.

Таким образом, мы получили формулу гармонических колебаний силы тока

$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi_x).$$

Амплитуда силы тока

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{(\omega L - 1/\omega C)^2 + R^2}}.$$

Амплитуда силы тока зависит от амплитуды ЭДС ε_m , частоты ω и всех параметров электрической цепи R, L, C .

Амплитудные характеристики для силы тока изображены на рис. 5.1. Они несколько отличаются от амплитудных характеристик заряда.

Во-первых, при $\omega \rightarrow 0$ амплитуда тока также стремится к нулю, а амплитуда заряда стремится к статическому заряду q_0 . Постоянный ток не может проходить через конденсатор, поэтому и нет *статической амплитуды силы тока*.

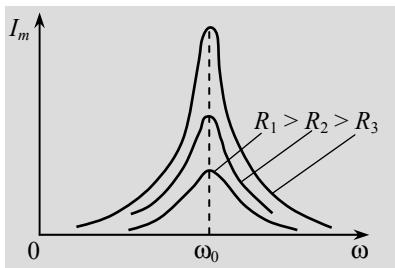


Рис. 5.1

Во-вторых, при любых значениях R резонанс всегда будет при одной частоте источника тока, которая равна собственной частоте колебательного контура

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Тогда $\omega L = 1/\omega C$ и амплитуда силы тока при резонансе будет определяться только амплитудой ЭДС и активным электрическим сопротивлением

$$I_p = \frac{\epsilon_m}{R}.$$

Разность фаз между силой тока и ЭДС определяется по формуле:

$$\boxed{\text{tg } \varphi_x = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}}.$$

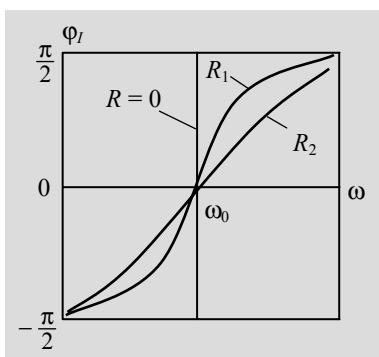


Рис. 5.2

Фазовыми характеристиками силы тока называют зависимость разности фаз между силой тока и ЭДС источника переменного тока φ_I от частоты источника ω (рис. 5.2).

В условиях резонанса разность фаз всегда равна нулю, независимо от значения электрического сопротивления.

При изменении частоты от нуля до бесконечности разность фаз меняется от $-\pi/2$ до $+\pi/2$.

5.2. Закон Ома для переменного тока

Запишем еще раз выражение для амплитуды силы переменного тока

$$\boxed{I_m = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{(\omega L - 1/\omega C)^2 + R^2}}}.$$

Амплитуда силы переменного тока пропорциональна амплитуде ЭДС

Это очень похоже на формулу закона Ома для замкнутой цепи постоянного тока.

Сила постоянного тока пропорциональна ЭДС

Поэтому выражение для амплитуды переменного тока вполне можно интерпретировать как **ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА** (для амплитудных значений). Тогда выражение

$$Z = \sqrt{(\omega L - 1/\omega C)^2 + R^2}$$

представляет собой аналог электрического сопротивления в цепи постоянного тока и имеет значение **ПОЛНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**. Его иногда называют **ИМПЕДАНСОМ**.

Импеданс состоит из двух членов:

R — АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, $X = \omega L - 1/\omega C$ — РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

В свою очередь, реактивное сопротивление также состоит из двух членов:

$X_L = \omega L$ — ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, $X_C = 1/\omega C$ — ЁМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

С увеличением либо активного, либо реактивного сопротивления сила тока будет уменьшаться, и в этом реактивное сопротивление аналогично активному. Но есть и принципиальная разница.

Примечание. Активное сопротивление R — это свойство самого проводника, и оно определяется, как и для цепей постоянного тока, удельным электрическим сопротивлением ρ и геометрией проводника. А реактивное сопротивление X зависит не только от емкости конденсатора C и индуктивности катушки L , а и от частоты тока ω .

При этом индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ с увеличением частоты увеличивается, а емкостное $X_C = 1/\omega C$ уменьшается.

В граничном случае, если в цепи будет источник постоянного тока ($\omega = 0$), это сопротивление стремится к бесконечности. Конденсатор эквивалентен разрыву цепи, и ток сквозь него не проходит.

Примечание. Вспомним, что конденсатор пропускает сквозь себя переменный ток потому, что в нем возникает ток смещения, который замыкает ток проводимости.

И, наоборот, индуктивное сопротивление при этом стремится к нулю и катушка имеет только активное сопротивление. Это также легко объяснить. Электродвижущая сила самоиндукции и ток самоиндукции направлены против основного тока, который изменяется со временем, и уменьшают его. В этом и состоит смысл индуктивного сопротивления. При расчете импеданса мы не просто суммируем активное и реактивное сопротивления, а берем корень квадратный из суммы квадратов

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}.$$

Это наводит на мысль, что спады напряжения на активном и реактивном сопротивлениях пребывают в разных фазах.

5.3. Падение напряжения на элементах цепи переменного тока

В замкнутом электрическом контуре, соответственно с законом сохранения энергии, сумма падений напряжения на всех элементах цепи равна сумме ЭДС. Для цепи, изображенной на рис. 5.3, имеем:

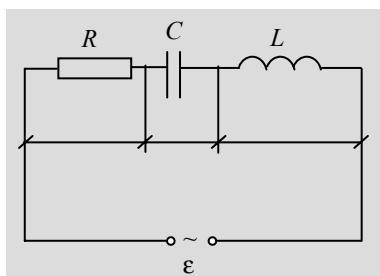


Рис. 5.3

Падение напряжения на активное сопротивление

$$U_R = IR = RI_m \cos(\omega t + \phi_I).$$

Это падение напряжения производит гармонические колебания с частотой источника тока ω и совпадает по фазе с колебаниями силы тока.

Просчитаем последовательно каждое падение напряжения.

Падение напряжения на активном сопротивлении. Как и для цепи постоянного тока, падение напряжения на активном сопротивлении равно произведению силы тока на активное сопротивление

Падение напряжения на конденсаторе емкостью C равно разности потенциалов

$$U_C = \Delta\varphi = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} q_m \cos(\omega t + \varphi_q).$$

Учитывая, что $q_m = I_m / \omega$, а $1/\omega C = X_C$, получаем формулу

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \varphi_q) = X_C I_m \cos(\omega t + \varphi_q).$$

Падение напряжения на конденсаторе производит гармонические колебания с частотой источника переменного тока ω . Фаза колебаний совпадает с фазой колебаний заряда φ .

Падение напряжения на конденсаторе отстает по фазе от падения напряжения на активном сопротивлении φ_I на $\pi/2$.

Падение напряжения на катушке индуктивности равно ЭДС самоиндукции

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \varphi_I + \pi/2) = X_L I.$$

Падение напряжения на катушке индуктивности производит гармонические колебания с частотой источника переменного тока ω . Оно опережает по фазе падение напряжения на активном сопротивлении на $\pi/2$.

Примечание. Все падения напряжения рассчитываются как произведение силы тока на соответственное сопротивление: $U_R = IR$, $U_C = IX_C$, $U_L = IX_L$;

все падения напряжения производят гармонические колебания с одинаковой частотой, равной частоте источника тока ω ;

падения напряжения на разных элементах электрической цепи производят колебания в разных фазах;

падение напряжения на емкостном сопротивлении ОТСТАЁТ от падения напряжения на активном сопротивлении на $\pi/2$;

падение напряжения на индуктивном сопротивлении ОПЕРЕЖАЕТ падение напряжения на активном сопротивлении на $\pi/2$ и пребывает в противофазе с падением напряжения на ёмкости;

падение напряжения на активном сопротивлении и ЭДС отличаются по фазе в зависимости от отношения реактивного и активного сопротивлений согласно формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_I = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

5.4. Векторная диаграмма для падения напряжения

Чтобы построить векторные диаграммы, представим гармонические колебания в виде вращающегося вектора.

Каждое падение напряжения представим в виде вектора, длина которого равна соответственной амплитуде, начальный угол равен сдвигу фаз, а круговая скорость вращения — циклической частоте колебаний. Все падения сопротивлений производят колебания с одинаковой частотой, поэтому их угловая скорость вращения одинакова, и они все время неподвижны относительно друг друга.

Векторная сумма всех векторов амплитуд падений напряжения и ЭДС должна равняться нулю:

$$\bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C + \bar{\epsilon} = 0.$$

Векторную диаграмму строим таким образом: вектор U_R откладываем по оси x . Тогда вектор U_L , который опережает вектор U_R на $\pi/2$, следует отложить в положительном направлении оси y , а вектор U_C , который отстает от вектора U_R на $\pi/2$, следует отложить в отрицательном направлении оси y .

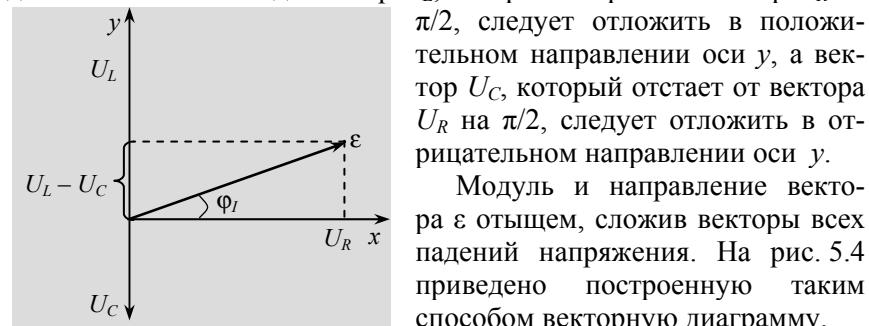


Рис. 5.4

Модуль и направление вектора ϵ отыщем, сложив векторы всех падений напряжения. На рис. 5.4 приведено построенную таким способом векторную диаграмму.

Вектор ϵ оказался в первом квадранте из-за того, что мы взяли амплитуду падения напряжения на индуктивности большую, нежели амплитуду падения на емкости. Поэтому вектор амплитуды ЭДС опережает вектор падения напряжения на активном сопротивлении на ϕ_I . При другом соотношении параметров электрической цепи вектор ϵ может оказаться в четвертом квадранте. Это следует из формулы для разницы фаз:

$$\operatorname{tg} \phi_I = \frac{U_L - U_C}{U_R},$$

откуда видно, что ϕ_I может изменяться от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

Также видно, что в случае резонанса, когда падение напряжения на индуктивности $U_L = X_L I$ равно падению напряжения на емкости $U_C = X_C I$, разность фаз между ЭДС и током равна нулю ($\phi_I = 0$). А это значит, что падение напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с ЭДС. Поэтому сила тока определяется только активным сопротивлением

$$I = \frac{\varepsilon}{R}.$$

Полезно самостоятельно построить векторные диаграммы, меняя значения R , L и C .

5.5. Потери в цепи переменного тока

Если переменный ток возник в цепи, которая не имеет активного сопротивления, то он не затухнет даже после отключения источника тока, поскольку не выделяется джоулево тепло и энергия из системы не уходит. При этом происходит преобразование энергии электрического поля в конденсаторе в энергию магнитного поля в катушке индуктивности, и происходят свободные незатухающие колебания. Мощность тепловыделения на активном сопротивлении называют **ПОТЕРЯМИ МОЩНОСТИ**

$$P = I^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t.$$

Мощность изменяется со временем с двойной частотой 2ω .

Среднее значение мощности, которая выделяется за один период,

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{I_m^2 R}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} I_m^2 R.$$

Напомним, что для постоянного тока мощность тепловыделения

$$P = I^2 R.$$

Сравнивая эти две формулы, введем понятие **ЭФФЕКТИВНОЕ, или ДЕЙСТВУЮЩЕЕ, ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА** $I_{\text{эфф}}$ как такое значение силы постоянного тока, при котором потери мощности совпадают с потерями переменного тока, амплитуда которого равна I_m :

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично вводят эффективные значения ЭДС и напряжения:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad U_{\text{эфф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Потери мощности удобно подавать через эффективные значения ЭДС и силы тока:

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R = \frac{1}{2} I_m (I_m R) = \frac{1}{2} I_m U_R^m.$$

Поскольку

$$\cos \varphi_I = \frac{U_R^m}{\epsilon_m}, \quad \text{то} \quad U_R^m = \epsilon_m \cos \varphi_I,$$

а потому

$$P = I_{\text{эфф}} \epsilon_{\text{эфф}} \cos \varphi_I.$$

Таким образом, полезная мощность в цепи переменного тока зависит не только от силы тока и ЭДС, а и от косинуса разницы фаз между ними:

$$\cos \varphi_I = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{(\omega L - 1/\omega C)^2 + R^2}}.$$

Чем больше реактивное сопротивление, тем меньше значение $\cos \varphi_I$ и тем меньшая полезная мощность.

Косинус разницы фаз $\cos \varphi_I$ называют **КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ**.

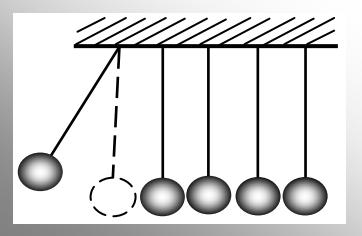
Примечание. Источник тока всегда выдает большую мощность, нежели та, которую употребляет.

Остаток мощности перекачивается в реактивную мощность, то есть она зря превращается в энергию электрического и магнитного полей. Поэтому стремятся увеличить коэффициент мощности за счет уменьшения реактивного сопротивления.



Контрольные вопросы

1. В какой системе осуществляются незатухающие электрические колебания?
2. Выведите уравнение незатухающих электрических колебаний.
3. Выведите уравнение вынужденных электрических колебаний.
4. Почему свободные электрические колебания являются затухающими?
5. Что такое импеданс цепи переменного тока?
6. Какое падение напряжения опережает падение напряжения на активном сопротивлении?
7. Что такое действующее значение силы тока, напряжения, ЭДС?



ВОЛНЫ

6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

6.1. Возникновение волны, продольные и поперечные волны

Приведём в колебания какую-либо частицу или группу частиц упругой среды. Между частицами среды существуют силы взаимодействия. За счёт этих сил каждая из частиц будет вовлекать в колебательный процесс соседние частицы. Вследствие этого колебания будут распространяться в среде с некоторой скоростью v .

Процесс распространения колебаний в упругой среде называется *упругой* или *механической* волной. Частицы среды не переносятся волной, а лишь совершают колебания около положений равновесия. Волна переносит только энергию колебательного движения.

Различают волны продольные и поперечные. В продольной волне частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны. В поперечной волне частицы среды колеблются перпендикулярно к направлению распространения волны.

Механические поперечные волны возникают лишь в твёрдых телах, обладающих сопротивлением к сдвигу. Газы и жидкости такими свойствами не обладают. Силы упругости в них возникают лишь при деформациях сжатия и растяжения. Поэтому в газах и жидкостях распространяются только продольные волны. В твердых телах возможно распространение как продольных, так и поперечных волн.

6.2. Характеристики волны

Основными параметрами волны являются фазовая скорость v , период колебаний T и соответственно циклическая частота $\omega = \frac{2\pi}{T}$, длина волны λ и волновое число k .

Частицы среды, находящиеся на разном расстоянии от источника колебаний, приходят в колебательное движение не одновременно. Даже самые ближайшие частицы колеблются по отношению к источнику с некоторым сдвигом по фазе. Это объясняется инерционностью частиц. Чтобы привести в колебательное движение любую из частиц, требуется некоторое время. Поэтому распространению колебаний соответствует перемещение в пространстве фазы колебаний.

Фазовая скорость или скорость распространения волны — это скорость, с которой перемещается в пространстве фаза колебаний. Фазовая скорость зависит от плотности среды и её упругих свойств. Например, для продольных волн

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль упругости среды или модуль Юнга; ρ — плотность среды.

Период колебаний T — это время, в течение которого любая из частиц среды совершают одно полное колебание.

Длина волны λ — это расстояние, на которое распространяется волна за один период,

$$\lambda = vT.$$

Частицы, находящиеся на расстоянии λ друг от друга, колеблются со сдвигом фаз 2π .

Волновым числом называют величину

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется *волной поверхностью*. В зависимости от формы волновой поверхности различают волны плоские, сферические и т. д.

Вообще волновая поверхность может иметь любую форму.

Фронтом волны называется поверхность, отделяющая колеблющиеся частицы от частиц, ещё не пришедших в колебания. Фронт волны имеет форму волновой поверхности и перемещается в среде со скоростью, равной скорости распространения волны. Нормаль, восстановленная к фронту волны в данной точке, совпадает с направлением распространения волны в этой точке.

6.3. Уравнение плоской волны

Частицы среды, в которой распространяется волна, колеблются около своих положений равновесия. Формула, позволяющая найти смещение любой частицы для любого момента времени, называется уравнением волны:

$$\xi = \xi(x, y, z, t),$$

где ξ — смещение произвольной частицы от положения равновесия; x, y, z — координаты положения равновесия этой частицы.

Составим уравнение плоской гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси X со скоростью v . Выделим две волновые поверхности, одна из которых проходит через начало координат, другая — через произвольную точку с координатой x (рис. 6.1).

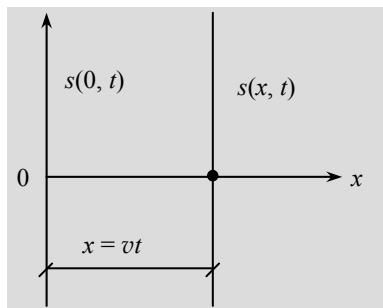


Рис. 6.1

Пусть частицы, лежащие в плоскости $x = 0$, колеблются по закону

$$\xi = A \cos \omega t.$$

Рассмотрим колебания частиц в плоскости находящейся на расстоянии x от начала координат. Для того, чтобы колебания распространялись на расстояние x , требуется время

$$\tau = \frac{x}{v}.$$

Поэтому колебания частиц в плоскости x будут отставать во времени от колебаний частиц в плоскости $x = 0$ на величину τ . Для этих частиц

$$\xi = A \cos \omega(t - \tau) \text{ или } \xi = A \cos \omega\left(t - \frac{x}{v}\right).$$

Полученная формула является уравнением «бегущей» плоской волны, распространяющейся в положительном направлении оси X . Здесь ξ — смещение частицы с координатой x от положения равновесия, A — амплитуда колебаний. Она одинакова для всех час-

тиц, если энергия волны не поглощается средой, величина $\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$ — фаза колебаний.

Так как

$$\frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{Tv} = \frac{2\pi}{\lambda} = k,$$

то это уравнение примет вид

$$\xi = A \cos(\omega t - kx),$$

а для плоской волны, распространяющейся в противоположном направлении,

$$\xi = A \cos(\omega t + kx).$$

Для плоской волны, распространяющейся в положительном направлении оси x , рассмотрим графики смещений частиц для двух моментов времени t_1 и t_2 (рис. 6.2). Каждая из косинусоид — это «мгновенный снимок» волны. Распространению волны за время $\Delta t = t_1 - t_2$ соответствует перемещение косинусоиды как целого на величину $v\Delta t$.

Если плоская волна распространяется в пространстве произвольно вдоль прямой, образующей с осями координат углы α , β и γ , то её уравнением будет

$$\xi = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}),$$

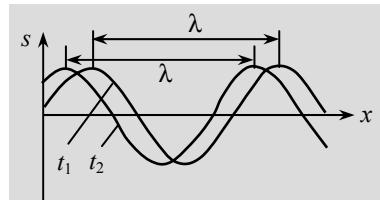


Рис. 6.2

где $\vec{k}\vec{r}$ — скалярное произведение векторов \vec{k} и \vec{r} , \vec{k} — волновой вектор.

Он направлен по нормали к волновой поверхности в данной точке, радиус-вектор которой \vec{r} . Его модуль $|\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Раскроем $\vec{k}\vec{r}$ через проекции векторов на координатные оси

$$\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z,$$

где

$$k_x = k \cos \alpha; k_y = k \cos \beta; k_z = k \cos \gamma;$$

$$x = r \cos \alpha; y = r \cos \beta; z = r \cos \gamma.$$

Тогда уравнение плоской волны, распространяющейся в пространстве в произвольном направлении, примет вид

$$\xi = A \cos(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z).$$

6.4. Уравнение сферической волны

Если скорость распространения волны во всех направлениях одинакова, то возникающая от точечного источника волна будет сферической. Пусть колебания источника происходят по закону $\xi = A_0 \cos \omega t$. Точки, соответствующие произвольной волновой по-

верхности радиуса r , будут колебаться с фазой $\omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$, так как

$\frac{r}{v}$ — время, за которое волна распространится на расстояние r .

Даже при отсутствии затуханий амплитуда колебаний частиц будет убывать с удалением от источника колебаний как $\frac{A_0}{r}$. Это связано с тем, что площадь фронта волны пропорциональна r^2 , а энергия колебаний каждой частицы — A^2 . Уравнение сферической волны имеет вид

$$\xi = \frac{A_0}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right).$$

6.5. Волновое уравнение

Уравнение плоской волны $\xi = A \cos(\omega t \pm kx)$ является решением дифференциального уравнения, которое называется волновым

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

Это легко проверить, подставив значения $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$, найденные из уравнения волны.

Если плоская волна распространяется в произвольном направлении, то в левой части волнового уравнения появляются также частные производные по y и z :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

Это уравнение может быть записано компактно с помощью оператора Лапласа Δ :

$$\Delta \xi = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2},$$

где

$$\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

Решением этого уравнения в зависимости от дополнительных условий может быть уравнение плоской, сферической и т. д. волн.

6.6. Стоячие волны

При наложении (интерференции) двух одинаковых волн, распространяющихся в среде навстречу друг другу, образуется стоячая волна:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx);$$

$$\xi_2 = A \cos(\omega t + kx).$$

Результирующее смещение, полученное по формуле суммы косинусов, является уравнением стоячей волны

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t.$$

Множитель $2A \cos kx$ не зависит от времени и определяет амплитуду колебаний частиц

$$A_{\text{ср}} = 2A |\cos kx| = 2A \left| \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \right|.$$

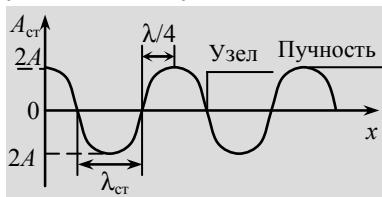
Точки, в которых амплитуда максимальна, называются *пучностями*:

$$A_{\text{ср}} = 2A; \left| \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \right| = 1; x = \frac{2\lambda}{4}; \frac{4\lambda}{4}; \frac{6\lambda}{4} \text{ и т. д.}$$

Точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются **узлами**:

$$A_{\text{ср}} = 0; \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 0; x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda \text{ и т. д.}$$

В отличие от бегущей волны, энергия стоячей волны не переносится. Частицы среды между двумя соседними узлами колеблются в одинаковой фазе (рис. 6.3). Расстояние между двумя соседними узлами или пучностями называется длиной стоячей волны и равно



$\frac{\lambda}{2}$. В теле, имеющем ограниченный размер l , стоячая волна образуется только тогда, когда l кратно целому числу $\frac{\lambda}{2}$, т. е. $l = n \frac{\lambda}{2}$.

Рис. 6.3

6.7. Ударная волна

Тело, движущееся со сверхзвуковой скоростью v , является источником особой ударной или баллистической волны. Возмущения в воздухе передаются со скоростью звука $v_{\text{зв}}$. Если $v > v_{\text{зв}}$, то частицы, находящиеся перед телом, не получают сигнала о его приближении, не успевают смещаться и создают непосредственно перед движущимся телом зону уплотнения. По этой же причине фронт волны отстает от тела.

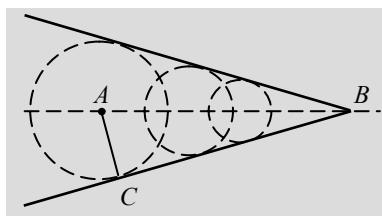


Рис. 6.4

Пусть тело, движущееся со сверхзвуковой скоростью v , за время Δt перемещается из точки A в точку B (рис. 6.4).

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка на пути тела является источником сферической волны. Тогда волна, возникшая в точке A за время Δt , распространится на расстояние $v_{\text{зв}} \Delta t$. Огибающая всех волн является фронтом ударной волны.

Фронт волны принимает форму конуса с углом

$$\sin \alpha = \frac{AC}{AB} = \frac{v_{\text{зв}}}{v} = \frac{1}{M},$$

где $M = \frac{v}{v_{\text{зв}}}$ — отношение скорости движения тела к скорости звука и называется числом Маха. Ударная волна не имеет периодического характера, она является областью сжатия, распространяющейся со звуковой скоростью. Такая волна создается при движении сверхзвуковых самолётов, снарядов и т. д.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Волна — это процесс распространения колебаний в среде. Частицы волной не переносятся (они лишь колеблются около положений равновесия), переносится энергия колебательного движения.
2. Распространение колебаний в упругой среде происходит путем передачи колебательного движения от одной частицы к другой за счёт сил взаимодействия между частицами.
3. Частицы среды обладают массой и вследствие этого — инертностью, поэтому даже ближайшие частицы колеблются с некоторым сдвигом по фазе. Распространению колебаний соответствует перемещение в пространстве фазы колебаний.
4. Наложение (интерференция) волн происходит в соответствии с принципом независимости движений, т. е. каждая из волн распространяется независимо от других.



Следует запомнить

1. Определение волновой поверхности и фронта волны.
2. Принцип Гюйгенса: любая частицы среды, в которой распространяется волна, является источником сферической волны.
3. Формулы:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx) \text{ или } \xi = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \text{ — уравнение плоской}$$

волны, распространяющейся в положительном направлении оси x ;

$\xi = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$ или $\xi = A \cos(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)$ — уравнение плоской волны, распространяющейся в произвольном направлении; $\xi = \frac{A_0}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$ — уравнение сферической волны; $\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$ — волновое уравнение; $\Delta \xi = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа.



Надо уметь

1. Выводить уравнение плоской и сферической волны.
2. Раскрывать физическое содержание величин, входящих в уравнение волны.
3. Проверить подстановкой, что уравнение $\xi = A \cos(\omega t - kx)$ является решением частного случая волнового уравнения $\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$.
4. Выводить и анализировать уравнение стоячей волны.
5. Объяснить, почему при движении тела со сверхзвуковой скоростью возникает ударная волна.



Контрольные вопросы

1. Что такое волна?
2. Почему в твердых телах возможно распространение как продольных, так и поперечных волн, а в газах и жидкостях — только продольных?
3. Выведите и проанализируйте уравнения плоской и сферической волн.
4. Как возникают стоячие волны? Выведите и проанализируйте уравнение стоячей волны.
5. Что такое узлы и пучности в стоячей волне?
6. Почему стоячая волна не переносит энергию колебаний?
7. С помощью принципа Гюйгенса проанализируйте формулу фронта ударной волны.
8. Что такое число Маха?



7. СКОРОСТЬ И ЭНЕРГИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ

7.1. Фазовая скорость волны

Скорость волны — это скорость распространения возмущений. Упругость тел является причиной того, что всякое механическое воздействие передается телом с конечной скоростью. Деформации в упругом теле передаются последовательно от одной точки тела к другой. Рассмотрим скорость распространения продольных волн в твердом теле. Нанесем удар по торцу стержня молотком (рис. 7.1). На конце стержня образуется уплотнение. За время удара Δt стержень деформируется на Δl и продольная волна (волна сжатия) распространится по стержню со скоростью v на расстояние $l = v\Delta t$.

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса точек тела, пришедших в движение на длине l , равно импульсу силы

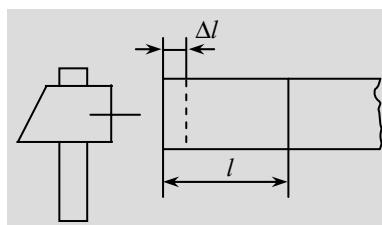


Рис. 7.1

где $m = lS\rho = v\Delta t S \rho$ — масса участка стержня длиной l ; S — площадь поперечного сечения стержня; ρ — его плотность; $w = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l}{v\Delta t}$ — скорость точек участка стержня длиной l .

Применим закон Гука $\sigma = E\varepsilon$, где $\sigma = \frac{F}{S}$ — напряжение, E — модуль Юнга, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ — относительная деформация.

Отсюда сила, сжимающая стержень

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}; \quad F = ES \frac{\Delta l}{l}.$$

Тогда

$$ES \frac{\Delta l}{l} \Delta t = v \Delta t S \rho \frac{\Delta l}{\Delta t}.$$

Учитывая, что $l = v \Delta t$ получим

$$v^2 \rho = E \quad \text{и} \quad v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Покажем, что скорость распространения волны есть фазовая скорость. Зафиксируем значение фазы в уравнении волны

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \text{const.}$$

Отсюда, продифференцировав и определив значение dx/dt , найдем скорость, с которой перемещается по оси X данное значение фазы колебаний

$$\omega \left(1 - \frac{dx}{dt} \frac{1}{v} \right) = 0; \quad \frac{dx}{dt} = v.$$

7.2. Групповая скорость волны

Уравнение плоской волны $\xi = A \cos(\omega t - kx)$ описывает монохроматическую волну, т. е. волну с одной частотой. Её можно изобразить в виде бесконечной косинусоиды, распространяющейся в среде со скоростью v (рис. 7.2).

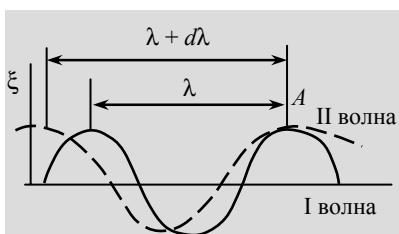


Рис. 7.2

Встречаются случаи распространения волн сложной не косинусоидальной формы. Эту сложную волну можно рассматривать как группу (наложение) гармонических монохроматических волн. Если фазовая скорость гармонических волн одинакова, то волна сложной формы будет распространяться с той же скоростью.

Может иметь место случай, когда фазовая скорость гармонических монохроматических волн зависит от частоты. Это явление называется дисперсией. В среде, обладающей дисперсией, сложная волна распадается на составляющие ее косинусоидальные волны. В этом случае скорость распространения максимума результирующего колебания и соответственно скорость переноса энергии будет отлична от фазовой скорости. Эта скорость называется групповой.

Рассмотрим распространение волны, являющейся суммой двух гармонических волн, в среде, обладающей дисперсией. Пусть для первой волны фазовая скорость будет v , длина волны λ , а для второй — $v + dv$ и $\lambda + d\lambda$. Предположим, что в некоторый момент времени их максимумы совпадают в точке A (рис. 7.2). Так как скорость распространения второй волны больше, чем первой, она обгонит первую волну, и максимум в точке A расстроится.

Через некоторый промежуток времени τ совпадение максимумов произойдет в точке B (рис. 7.3).

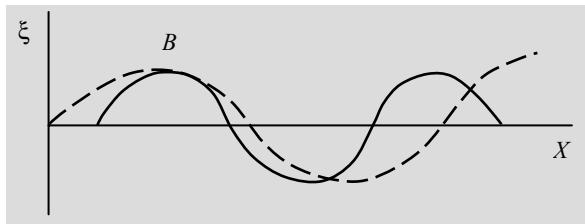


Рис. 7.3

Таким образом, по отношению к первой волне максимум результирующего колебания окажется смешенным назад на расстояние λ . Поэтому скорость распространения максимума, т. е. групповая скорость будет меньше на величину λ/τ фазовой скорости первой волны

$$v_{gp} = v - \frac{\lambda}{\tau}.$$

Вторая волна за время τ обгоняет первую на величину $d\lambda$ потому, что её скорость на dv больше.

Тогда $\tau = \frac{d\lambda}{dv}$ и

$$v_{gp} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

Эта формула выражает связь между групповой и фазовой скоростями.

В зависимости от $dv/d\lambda$ возможны следующие случаи:

$\frac{dv}{d\lambda} = 0$; $v_{\text{рп}} = v$ — дисперсия отсутствует;

$\frac{dv}{d\lambda} > 0$; $v_{\text{рп}} < v$ — нормальная дисперсия;

$\frac{dv}{d\lambda} < 0$; $v_{\text{рп}} > v$ — аномальная дисперсия.

7.3. Энергия упругой волны, плотность потока энергии

Выделим в среде, в которой распространяется плоская продольная волна, некоторый элементарный объём ΔV (рис. 7.4). Этот объём обладает потенциальной энергией упругой деформации ΔE_{n} , так как участки среды испытывают деформации растяжения, сжатия. Выделенный объём обладает также кинетической энергией ΔE_{k} равной кинетической энергии колеблющихся частиц.

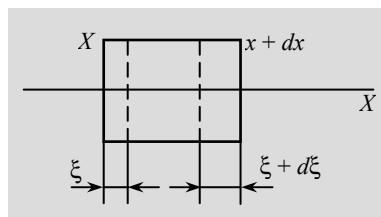


Рис. 7.4

Обозначим ω — плотность энергии упругой деформации. Это энергия, которой обладает единица объёма упруго деформированного тела. Для продольной деформации

$$\omega = \frac{E\varepsilon^2}{2},$$

где E — модуль продольной упругости; ε — относительная деформация.

Очевидно,

$$\Delta E_{\text{n}} = u \Delta V = \frac{E\varepsilon^2}{2} \Delta V.$$

Найдем относительную деформацию объёма ΔV . Пусть для некоторого момента времени смещение точек в основании x будет равно ξ , а в основании $x + dx$ будет $\xi + d\xi$. Тогда в этот момент времени относительная деформация объёма ΔV

$$\epsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x}.$$

Так как

$$E = v^2 \rho; \text{ то } \Delta E_n = \frac{\rho v^2}{2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \Delta V.$$

Скорости всех точек в объёме ΔV ввиду его малости можно считать одинаковыми и равными $w = \frac{\partial \xi}{\partial t}$.

Кинетическая энергия объёма ΔV

$$\Delta E_k = \frac{m}{2} w^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 \Delta V.$$

Найдем значения $d\xi/dx$ и $d\xi/dt$ из уравнения плоской волны

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = A k \sin(\omega t - kx);$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -A \omega \sin(\omega t - kx).$$

Учитывая, что $kv = \omega$, после подстановки можно получить

$$\Delta E_n = \frac{1}{2} \Delta V \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx);$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \Delta V \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx).$$

Как видно, потенциальная и кинетическая энергии рассматриваемого объёма изменяются в одной фазе.

Плотность энергии упругой волны

$$u = \frac{\Delta E_n + \Delta E_k}{\Delta V} = \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx).$$

Она различна в разных точках среды и в одной и той же точке изменяется со временем по закону квадрата синуса.

Таким образом, в одной и той же точке среды плотность энергии пульсирует, т. е. изменяется от 0 до максимального значения. Это объясняется тем, что энергия переносится волной от одной точки среды к другой.

Так как среднее по времени значение квадрата синуса равно 1/2, то среднее значение плотности энергии для данной точки

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2.$$

Количество энергии, переносимое волной через площадку ΔS в единицу времени, называется потоком энергии Φ . Если ΔW — количество энергии, переносимое волной за время Δt , то

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

Поток энергии в разных точках среды может быть различен. Количество переносимой энергии в данной точке среды характеризуется плотностью потока энергии.

Количество энергии, переносимое в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, называется *плотностью потока энергии* j .

За единицу времени через единичную площадку волна приносит энергию в объём, равный объёму цилиндра с высотой v и площадью основания, равной единице, поэтому $j = \bar{u}v$.

Рассматривая фазовую скорость как вектор, совпадающий с направлением распространения колебаний и переноса энергии, можно записать

$$\vec{j} = \bar{u}\vec{v}.$$

Вектор плотности потока энергии носит название вектора **Умова–Пойтинга**.

7.4. Элементы акустики, эффект Допплера

Волны, распространяющиеся в упругой среде и имеющие частоту от 20 до 20000 Гц, называются *звуковыми волнами*. Эти волны воспринимает человеческое ухо.

Упругие волны с частотами, большими 20 000 Гц, называются ультразвуками, а волны с частотами меньше чем 20 Гц, называются инфразвуками. Эти волны человеческое ухо не воспринимает.

Основными физическими характеристиками звука являются сила или интенсивность, частота колебаний и спектральный состав.

Аналогичными физиологическими характеристиками звука являются громкость, высота и тембр звука.

Сила или интенсивность звука определяется плотностью потока энергии звуковой волны $j = \bar{u}v$. Так как плотность энергии

$$\bar{u} = \frac{1}{2}\rho A^2 \omega^2,$$
 то сила звука пропорциональна квадрату амплитуды.

Таким образом, сила звука является энергетической характеристикой звуковой волны, не зависящей от особенностей слухового аппарата человека.

Сила звука оценивается субъективно как громкость звука. Человеческое ухо имеет разную чувствительность к волнам различной частоты, даже если их интенсивность одинакова. Высота звука определяется частотой звуковых колебаний.

Тембр звука — это оттенок или окраска звука. Он определяется акустическим спектром, т. е. набором частот колебаний, присутствующих в данном звуке.

Рассмотрим эффект Допплера в акустике.

Эффект Допплера заключается в изменении воспринимаемой приёмником частоты колебаний (высоты звука) при движении приёмника или источника звука относительно неподвижной среды.

Звуковая волна, вышедшая от источника, распространяется совершенно независимо от движения источника и приёмника. При движении относительно среды источник и приёмник могут надвигаться или убегать от движущейся волны. Частота колебаний, воспринимаемая приёмником, будет равна количеству длин волн, которые приходят в приёмник за 1 с.

Пусть частота звука, испускаемого источником — v_0 , а скорость распространения v . Если приёмник будет двигаться навстречу источнику со скоростью $v_{\text{пп}}$, то за 1 с он зарегистрирует количество длин волн во столько раз больше v_0 , во сколько раз скорость волны относительно приёмника $v + d v_{\text{пп}}$ больше v . Таким образом,

$$v = v_0 \frac{v + v_{\text{пп}}}{v}.$$

Если источник движется к приёмнику со скоростью $v_{\text{ист}}$, то приёмник снова зарегистрирует большее количество колебаний (звук будет выше). Источник за 1 с испускает v_0 колебаний и смещается в направлении распространения колебаний на $v_{\text{ист}}$. Поэтому v_0 колебаний уложатся не на длине v , а на длине $v - v_{\text{ист}}$, что соответствует уменьшению длины волны

$$\lambda = \frac{v - v_{\text{ист}}}{v_0}.$$

Теперь приёмник за 1 с зарегистрирует количество колебаний

$$v = v_0 \frac{v}{v - v_{\text{ист}}}.$$

Если приёмник и источник будут двигаться одновременно навстречу друг другу, то частота, воспринимаемая приёмником, будет

$$v = v_0 \frac{v + v_{\text{пр}}}{v - v_{\text{ист}}}.$$

Эта формула справедлива и для случая, когда приёмник и источник удаляются друг от друга. В этом случае значения $v_{\text{пр}}$ и $v_{\text{ист}}$ следует взять отрицательными и частота v будет меньше v_0 , т. е. звук будет ниже.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

- Явление дисперсии возникает при распространении волны сложной формы, если фазовая скорость составляющих ее гармонических монохроматических волн зависит от частоты (длины волны).
- Любой объём упругой среды, в которой распространяется волна, обладает потенциальной и кинетической энергией.
- Плотность потока энергии упругой волны в любой точке среды периодически изменяется со временем, так как волна переносит энергию от одной точки среды к другой.
- Звук — это волны в упругой среде с частотой колебания 20–20 000 Гц, которые воспринимает ухо человека.
- Эффект Допплера возникает потому, что распространение волны и движение приёмника или источника колебаний происходят независимо друг от друга.



Следует запомнить

1. Определение потока и плотности потока энергии.

2. Формулы:

$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — фазовая скорость продольной волны; $v_{rp} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$ — связь между групповой и фазовой скоростью; $u = \frac{E\varepsilon^2}{2}$ — плотность энергии упругодеформированного тела для деформации растяжения или сжатия; $\bar{u} = \frac{1}{2}\rho A^2 \omega^2$ — средняя плотность энергии упругой волны; $\vec{j} = \bar{u}\vec{v}$ — вектор плотности потока энергии или вектор Умова–Пойтинга.



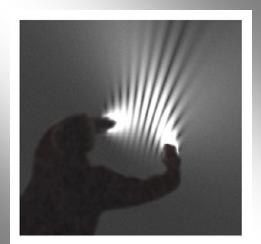
Надо уметь

1. Выводить формулу для фазовой скорости продольной волны.
2. Выводить формулу, выражающую связь между групповой и фазовой скоростями.
3. Получить и анализировать формулу для плотности энергии упругой волны.
4. Получить формулу, описывающую эффект Допплера.



Контрольные вопросы

1. Что такое групповая скорость волны?
2. Проанализируйте возможные соотношения между групповой и фазовой скоростями.
3. Какими видами энергии обладает любой объём упругой среды, в которой распространяется волна?
4. Перечислите и сопоставьте физические и физиологические характеристики звука.
5. В чём заключается эффект Допплера?



ОПТИКА

Оптика является разделом физики, который зародился в древности. Понятия и термины оптики формировались на протяжении многих веков. Этот процесс формирования не окончен и до настоящего времени. Это связано как с развитием самой оптики, так и с развитием основных разделов современной физики, оказывающих существенное влияние на оптику.

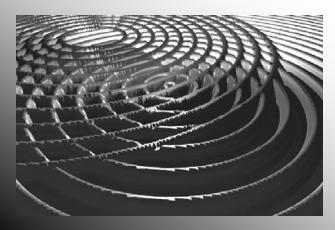
Вопрос о природе света у разных народов в каждой эпохе решался по-своему. В настоящее время общепризнанной считается двойственная природа света: свет представляет собой, с одной стороны, излучение квантов (корпускул), с другой — электромагнитные волны. Электромагнитные волны количественно характеризуются длиной волны λ , изменение которой приводит к их качественному различию. Электромагнитные излучения бывают: радиоизлучение, инфракрасное, оптическое (свет), ультрафиолетовое и гаммаизлучение. Все виды излучений составляют единую и непрерывную электромагнитную шкалу. Электромагнитное излучение с длиной волны 0,400–0,750 мкм называется *светом*.

На основании анализа изучения таких оптических явлений, как интерференция, дифракция, поляризация света подтверждается волновая природа света как часть общего учения о распространении и взаимодействии волн. А тепловое излучение, давление света, явление Комптона подтверждают квантовую природу света.

Краткие теоретические сведения позволят учащимся вспомнить основные понятия, законы, формулы, а указания по методике изучения каждой темы помогут глубоко усвоить пройденный материал.

При изучении волновой природы света следует вспомнить результаты, полученные при изучении механических колебаний и волн, так как колебаниям и волнам разной физической природы свойственны общие закономерности.

После изучения основных терминов и определений, а также прослушивания лекций по каждой теме раздела студентам необходимо ответить на контрольные вопросы.



8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Интерференцией называют сложение двух или нескольких волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Интерферировать могут волны любой природы (упругие, световые, волны на поверхности жидкости).

Частным случаем интерференции является сложение двух одинаковых волн, идущих навстречу друг другу. В результате образуется стоячая волна, локализованная в данной точке пространства.

Каждая волна распространяется в пространстве независимо от других волн. Поэтому результирующее колебание в данной точке пространства представляет собой геометрическую сумму колебаний, соответствующих каждой из волн, т. е. волны можно складывать. Это утверждение называется *принципом суперпозиции*. Опыт показывает, что принцип суперпозиции обычно выполняется с высокой точностью. Отклонения наблюдаются лишь при очень больших значениях амплитуды складываемых волн.

Пример. Сложение двух одинаковых плоских упругих волн, распространяющихся навстречу друг другу вдоль оси x .

Уравнение первой волны:

$$S_1 = S_0 \cos(\omega t - kx),$$

уравнение второй волны:

$$S_2 = S_0 \cos(\omega t + kx),$$

где S_0 — амплитуда волны; ω — круговая частота; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

Сумма смещений:

$$\begin{aligned} S_1 + S_2 &= S_0 \cos(\omega t - kx) + S_0 \cos(\omega t + kx) = \\ &= 2S_0 \cos kx \cos \omega t = A \cos \omega t, \end{aligned}$$

где $A = 2S_0 \cos kx$ — амплитуда результирующей волны.

В точках пространства, где $\cos kx = 0$, т. е. $x = \frac{\lambda}{4}; \frac{3}{4}\lambda; \frac{5}{4}\lambda$ и т. д., амплитуда результирующей волны A равна нулю (волны как бы гасят друг друга).

Поскольку интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, то в данных точках пространства наблюдаются минимумы интенсивности.

В точках пространства, где $\cos kx = 1$, т. е. при $x = \frac{\lambda}{2}; \frac{3}{2}\lambda$ и т. д., амплитуда колебаний — максимальна. В других точках амплитуда колебаний будет принимать значения от нуля до $2S_0$.

Световая волна — это электромагнитная волна. Колебания совершают одновременно вектор напряженности электрического поля \vec{E} и вектор напряженности магнитного поля \vec{H} .

Уравнение плоской световой волны, распространяющейся в направлении оси x ,

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \alpha);$$

$$H = H_m \cos(\omega t - kx + \alpha),$$

где E_m и H_m — амплитуды колебаний напряженностей электрического и магнитного полей; $\omega = 2\pi\nu$ — круговая (циклическая) частота; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; $(\omega t - kx + \alpha)$ — фаза колебаний; α — начальная фаза.

Графически эта волна изображена на рис. 8.1. Частота изменения электрического поля совпадает с частотой изменения магнитного поля. Колебания векторов происходят в одинаковой фазе, во взаимоперпендикулярных плоскостях, а скорость распространения волны совпадает с направлением оси x .

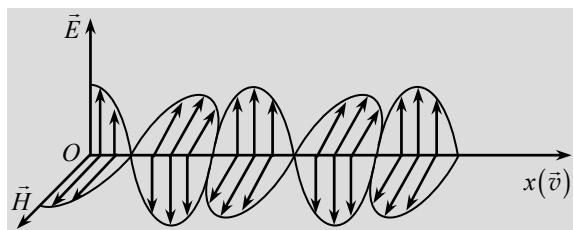


Рис. 8.1

При сложении волн различной частоты нельзя получить устойчивую интерференционную картину. Следует использовать монохроматические волны.

Монохроматической называется волна определённой и строго постоянной частоты. Реальное естественное излучение обычно содержит ряд монохроматических волн различных амплитуд. Близко к монохроматическому находится излучение, соответствующее отдельным линиям испускания свободных атомов.

Напомним, что каждая из таких линий соответствует переходу электрона из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. При этом испускается квант света с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$.

Однако, согласно соотношению неопределённостей для энергии и времени $\Delta E \Delta t \geq h$, каждое из значений энергии (E_2 или E_1) задается лишь с точностью до ΔE , т. е. $E_2 \pm \Delta E$, поэтому невозможно получить идеальное монохроматическое излучение.

Обычно монохроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом. Монохроматическое излучение можно получить также с помощью приборов — монохроматоров. Очень высокую монохроматичность излучения имеют лазеры. Ширина спектрального интервала, у них может достигать 10^{-6} Å. Устойчивую интерференционную картину можно получить лишь тогда, когда разность фаз волн, пришедших в данную точку, постоянна:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (\omega t - kx_1 - \omega t + kx_2) = \text{const}.$$

Такие волны называются *когерентными*.

Световые волны, излучаемые двумя источниками, никак не согласованы по фазе и поэтому не могут быть когерентными. Обычно для получения когерентных волн берут один источник, но выделяют два луча, идущие по разным направлениям.

В качестве примера получения когерентных волн рассмотрим метод бипризмы Френеля (рис. 8.2, а) или бизеркала Френеля (рис. 8.2, б).

Устройство состоит из двух призм с малым преломляющим углом, сложенных основаниями, и источника света S . После преломления в призмах лучи 1 и 2 сходятся в точке M . Можно рассматривать эти лучи как посланные «мнимыми источниками» S_1 и S_2 .

Свет может распространяться как в вакууме, так и в прозрачных средах.

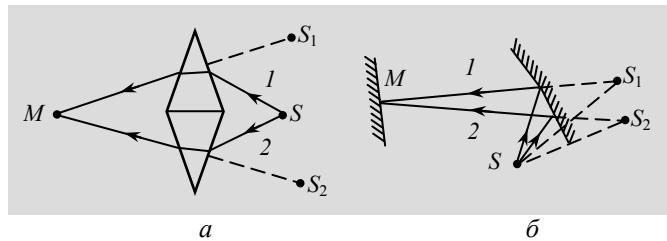


Рис. 8.2

Скорость света в вакууме всегда постоянна, не зависит от частоты или длины волны и равна $c = 2,99\,792\,458 \cdot 10^8$ м/с $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Скорость света в среде c' отличается от скорости света в вакууме c на показатель преломления n :

$$c' = \frac{c}{n}.$$

Показатель преломления различен для излучений разной частоты или длины волны и зависит от природы вещества.

Оптической длиной пути $L_{\text{опт}}$ между точками A и B называют расстояние, которое прошел бы свет в вакууме за то же время, за которое он проходит путь от A до B в среде:

$$L_{\text{опт}} = l_{AB} n.$$

В вакууме $L_{\text{опт}} = l_{AB}$ (l_{AB} можно назвать *геометрической длиной пути*). Оптическая длина пути в данной среде зависит от длины волны излучения, поскольку от неё зависит коэффициент преломления. Оптическую длину пути надо знать для того, чтобы определить фазу волны, дошедшей до данной точки в данный момент времени. Рассмотрим интерференционную картину от двух когерентных источников (рис. 8.3, a и δ).

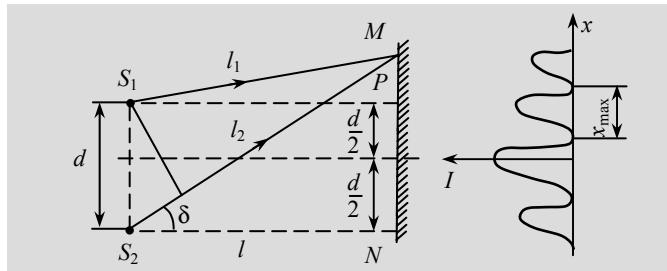


Рис. 8.3

Даны два когерентных источника S_1 и S_2 (рис. 8.3, *a*), l_1 — оптическая длина пути, которую проходит свет от источника S_1 до точки P с координатой x , l_2 — оптическая длина пути, которую проходит свет от источника S_2 до точки P с координатой x .

В каждой точке плоскости MN будет происходить интерференция волн от этих двух источников.

Уравнение волн от этих источников в точке P :

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - kl_1);$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - kl_2).$$

Если направления векторов E_1 и E_2 совпадают, то в этой точке будут происходить колебания частотой ω .

Амплитуда результирующего колебания вычисляется по формуле:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi,$$

здесь $\Delta\varphi = (\omega t - kl_1) - (\omega t - kl_2) = k(l_2 - l_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(l_2 - l_1)$ — разность фаз.

Значение результирующей амплитуды зависит от разности фаз $\Delta\varphi$, т. е. от разности оптических длин пути $l_2 - l_1$.

Величина $\delta = l_2 - l_1$ называется оптической разностью хода.

Когда $\cos \Delta\varphi = 1$, т. е. $\delta = 2m \frac{\lambda}{2}$, амплитуда колебаний будет максимальной и $E_0^{\max} = |E_{01} + E_{02}|$.

Когда $\cos \Delta\varphi = -1$, т. е. $\delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$, амплитуда колебаний будет минимальной и $E_0^{\min} = |E_{01} + E_{02}|$. Поскольку интенсивность света J пропорциональна квадрату амплитуды $J \sim E_0^2$, то в первом случае будет максимальная интенсивность, а во втором — минимальная.

Определим координаты максимумов и минимумов интенсивности (рис. 8.3, *б*).

Из рис. 8.3, *a* следует, что

$$l_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2; \quad l_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2,$$

отсюда

$$l_2^2 - l_1^2 = (l_2 - l_1)(l_2 + l_1) = 2xd.$$

Если $d \ll l$, то $l_2 + l_1 \approx 2l$ и $l_2 - l_1 = \delta$, тогда $2l\delta = 2xd$ и $x = \frac{l}{d}\delta$.

Условия максимума: $\delta = 2m\frac{\lambda}{2}$ и $x_{\max} = \frac{m\lambda l}{d}$.

Условия минимума: $\delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ и $x_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda l}{d}$.

8.1. Интерференция света в тонких плёнках

Свет, отраженный поверхностью тонких прозрачных пластинон или плёнок, при определенных условиях дает четкую интерференционную картину. Это явление легко наблюдать на мыльных плёнках, плёнках нефти, плавающих на поверхности воды, на плёнках прозрачных окислов и т. д.

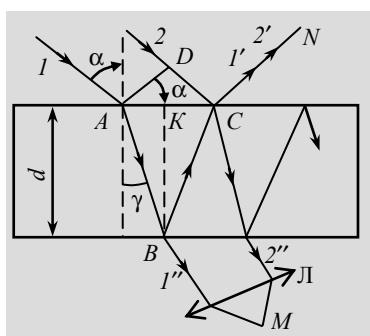


Рис. 8.4

Рассмотрим случай интерференции на примере плоскопараллельной тонкой плёнки толщиной d (рис. 8.4) с показателем преломления n . На поверхности пластинки световая волна разделяется на две части.

Часть света отражается по направлению CN , другая часть войдет в пластинку и распространится по направлению AB . В точке B преломленная волна дойдет до второй поверхности пластиинки, на которой, в свою очередь, разделится на две части. Одна часть отражается внутрь пластиинки по BC , другая — выходит наружу по BM .

Кроме этих пучков, пластиинка отбросит вверх пучки, возникающие в результате трехкратного, пятикратного и т. д. отражения.

Однако, ввиду их малой интенсивности, эти пучки во внимание принимать не будем, т. е. рассмотрим идеальный случай интерференции двух когерентных волн в тонких плёнках.

Из рис. 8.4 видно, что интерференция возникает в результате частичного отражения света от верхней и нижней поверхностей пластиинки.

При наложении лучей $1''$ и $2''$ в точке M с помощью линзы L имеет место интерференция в проходящем свете, а в направлении CN для лучей $1'$ и $2'$ — интерференция в отраженном свете.

Рассмотрим более детально случай интерференции в отраженном свете для лучей $1'$ и $2'$.

Оптическая разность хода между лучами

$$\delta = (AB + BC)n - DC, \quad (8.1)$$

однако,

$$AB = BC = \frac{d}{\cos \gamma}, \quad (8.2)$$

а

$$DC = AC \sin \alpha = 2AK \sin \alpha = 2d \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha. \quad (8.3)$$

Учитывая, что $\sin \alpha = n \sin \gamma$, и подставляя значения формул (8.2) и (8.3) в уравнение (8.1), получаем

$$\delta = \frac{2dn}{\cos \gamma} - \frac{2dn \sin \gamma}{\cos \gamma} = \frac{2dn}{\cos \gamma} (1 - \sin^2 \gamma) = 2dn \cos \gamma. \quad (8.4)$$

Принимая во внимание, что

$$n \cos \gamma = \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 \gamma} = \sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma} = \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha},$$

разность хода δ вычисляем через угол падения по формуле (8.4):

$$\delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (8.5)$$

При вычислении оптической разности хода δ между лучами $1'$ и $2'$ необходимо учесть изменение фазы на π при отражении (потеря полуволны) для луча в точке C , тогда выражение (8.5) примет вид:

$$\delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}. \quad (8.6)$$

Если $\delta = 2m \frac{\lambda}{2}$, то наблюдается максимум интенсивности, если

$\delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$ — минимум.

Из уравнения (8.6) следует, что все лучи, соответствующие одному и тому же значению α , т. е. имеющие одинаковый наклон, будут давать одну и ту же разность фаз, поэтому интерференционные линии, наблюдаемые при этом, называют линиями равного наклона.

При наблюдении интерференции лучей 1 и 2 (рис. 8.5, а и б) в плёнках переменной толщины (форма клина) также наблюдается интерференционная картина, однако каждая из полос образуется за счет отражений от мест пластиинки, имеющих одинаковую толщину d . Поэтому интерференционные полосы называют полосами равной толщины. Эти полосы могут быть локализованы вблизи пластиинки (над ней в плоскости MN или под ней). При нормальном падении лучей на пластиинку ($\alpha = 0$) полосы локализованы на верхней поверхности пластиинки. Интерференционная картина для данного случая также рассчитывается на основании формулы (8.6).

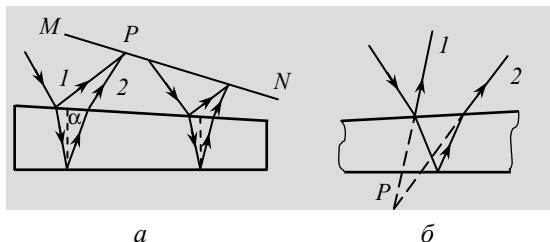


Рис. 8.5

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона, где роль тонкой плёнки играет воздушная прослойка между линзой и пластиинкой.

В реальных условиях, например при наблюдении цветов побежалости на поверхностях металлов или на мыльных и масляных тонких плёнках, может одновременно изменяться как угол падения лучей α , так и толщина плёнки d , поэтому интерференционная картина представляет собой полосы смешанного типа.

Интерференция света находит широкое распространение в практике. С ее помощью можно точно определять длины световых волн, производить точнейшие измерения линейных величин, измений размеров тел при нагревании, показателей преломления, спектральных линий, качества шлифовки поверхностей. Для физических исследований и технических измерений применяются интерферометры. Принцип действия всех интерферометров одинаков. Различия заключаются лишь в методе получения когерентных лучей.

В основе большинства интерферометров лежит двухлучевая интерференция, т. е. разделение падающего луча на две части, после чего они идут разными путями, а затем сводятся вновь для интерференции.

Один из них, как правило, пропускается через исследуемый объект, что приводит к смещению интерференционных полос. Принципиальная схема микроинтерферометра Линника для определения качества полированных поверхностей показана на рис. 8.6. Принцип действия его основан на явлении интерференции когерентных волн. Микроинтерферометр МИИ-4 позволяет измерять высоты неровностей в пределах 1 ... 0,03 мк, что соответствует чистоте поверхности 10... 14 класса.

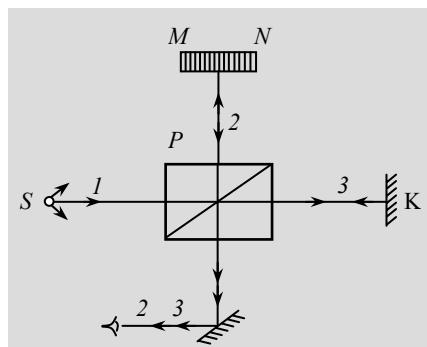


Рис. 8.6

Наблюдение можно вести в обычном и монохроматическом свете (через светофильтры). Интерференционную картину можно наблюдать и фотографировать.

Луч *I* разделяется в светоразделительном кубике *P* на лучи *2*, падающие на исследуемую поверхность *MN*, и лучи *3*, идущие к зеркалу *K*. Отражаясь от поверхности *MN* и *K*, лучи *2* и *3* интерферируют и в поле зрения наблюдается одновременно изображение исследуемой поверхности и изображение интерференционной картины в виде полос. Если на исследуемой поверхности имеются царапины, то в местах пересечения полос с царапиной, полосы имеют изгиб, высота которого пропорциональна глубине борозды, т. е. форма интерференционных полос повторяет профиль исследуемой поверхности.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Свет имеет двойственную природу — волновую и квантовую.
2. Свет — это электромагнитные волны. Длины волн видимого света заключены в диапазоне $\lambda = 4000\dots7600 \text{ \AA}$.
3. Явление интерференции света подтверждает волновую природу света.
4. Устойчивая интерференционная картина наблюдается только при сложении когерентных волн.
5. Результат интерференции определяется оптической разностью хода двух складываемых волн, а следовательно, и оптическими свойствами среды n .



Следует запомнить

1. Уравнение и график световой волны.
2. Когерентные волны имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз.
3. Оптический путь луча $L = ln$ равен геометрическому пути, умноженному на показатель преломления.
4. При интерференции в тонких плёнках различают линии равного наклона и линии равной толщины.
5. При отражении волны от оптически более плотной среды отражённая волна изменяет фазу на π , т. е. теряется полволны $\lambda/2$.
6. Условие максимума при интерференции — $\delta = 2m\frac{\lambda}{2}$, условие минимума — $\delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$.



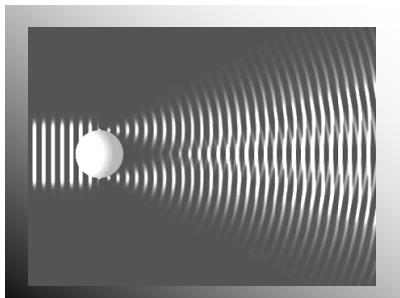
Надо уметь

1. Правильно показывать ход лучей через неоднородные оптические среды (пластиинки) на основании законов физики.
2. По разности хода определять разность фаз.
3. Определять оптическую разность хода для двух волн.
4. Определять высоту шероховатости по изгибу полосы.
5. Различать интерференцию в отражённом и проходящем свете.
6. Уметь рассчитать интерференционную картину.



Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление интерференции?
2. Что такое монохроматическая волна?
3. Какие волны называются когерентными?
4. Что такое оптическая разность хода?
5. Что такое оптическая длина пути?
6. Как получить когерентные волны?
7. Как связана разность хода с разностью фаз?
8. При каких условиях наблюдается максимум и минимум интенсивности при интерференции?
9. Почему интерференцию легко наблюдать в тонких плёнках?
10. В каких случаях наблюдаются линии равного наклона и линии равной толщины?
11. От чего зависит расстояние между интерференционными полосами на экране?
12. Каковы необходимые условия наблюдения интерференции света?
13. В чём заключается принцип действия интерферометра?



9. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракцией света называют любое отклонение света от прямолинейного хода лучей, если только оно не является следствием преломления или отражения.

Различают два вида дифракции: в параллельных лучах (Фраунгофера) и в расходящихся лучах (Френеля).

Оба типа дифракции принципиально не отличаются друг от друга. Дифракция Фраунгофера является лишь предельным случаем дифракции Френеля. Дифракцию света можно наблюдать от малых отверстий и экранов, узких щелей и т. д. Результат дифракции и интерференционные явления приводят к дифракционной картине.

Явление дифракции можно объяснить с точки зрения волновой теории на основании *принципа Гюйгенса*, согласно которому каждую точку среды, до которой дошло колебание, можно рассматривать как источник новых вторичных волн. Однако принцип Гюйгенса не позволяет определять интенсивность волн в различных направлениях. Френель дополнил этот принцип представлением об интерференции вторичных волн. Он предложил метод зон, который наглядно объясняет прямолинейное распространение света с точки зрения волновой природы.

Рассмотрим действие световой волны от источника S в произвольной точке P (рис. 9.1).

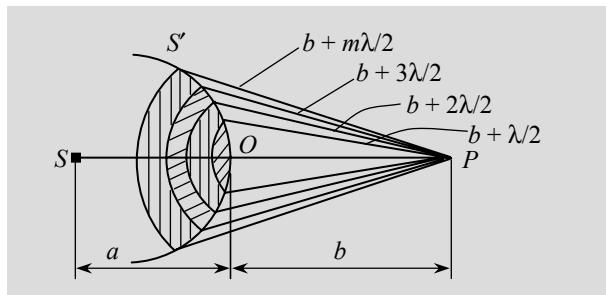


Рис. 9.1

По принципу Гюйгенса каждую точку произвольной поверхности S' можно рассматривать как источник новых вторичных волн, попадающих в точку P , где они интерферируя обусловливают определенную интенсивность в точке P .

Поверхность S' разбивается на кольцевые зоны Френеля таким образом, чтобы расстояния от границ зоны до точки P отличались на значение $\frac{\lambda}{2}$, т. е. $b_1 = b + \frac{\lambda}{2}$, $b_2 = b_1 + \frac{\lambda}{2}$, $b_3 = b_2 + \frac{\lambda}{2}$, и т. д. или $b_m = b + m \frac{\lambda}{2}$, где m — номер внешней зоны.

Поскольку колебания от двух аналогичных точек любых соседних зон в точке P будут в противофазе, то и результирующие колебания двух соседних зон отличаются по фазе на π , т. е. гасят друг друга в точке P .

Легко показать математически, что площадь любой зоны Френеля $\Delta S_m = \frac{\pi ab\lambda}{a+b}$, т. е. при небольшом m площади зон примерно равны.

Поскольку с увеличением значения m расстояние b_m возрастает, то это приводит к монотонному убыванию амплитуд, т. е.

$$E_1 > E_2 > E_3 > \dots > E_m.$$

Амплитуду результирующего колебания найдем алгебраически:

$$E = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots + E_m$$

(знак «минус» — противоположность фаз) или

$$E = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right).$$

Можно считать, что

$$E_m = \frac{E_{m-1} + E_{m+1}}{2},$$

тогда выражения в скобках равны нулю и $E = \frac{E_1}{2}$, т. е. амплитуда результирующего колебания в произвольной точке P , создаваемая сферической волновой поверхностью S' , равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной зоной, следовательно,

действие всей волновой поверхности эквивалентно половине действия центральной зоны.

Можно показать, что при $a = 1$ м; $b = 1$ м; $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м

$$\frac{\Delta S}{2} \approx 0,2 \text{ мм}^2,$$

а значит свет от поверхности S' к точке P распространяется в этом узком канале, т. е. прямолинейно.

Это наблюдается лишь в том случае, если на пути волн нет никаких преград.

Наблюдение дифракционной картины по методу Френеля производится без оптических систем по схеме: источник — преграда — экран. При этом следует исходить из того, что прикрытая преградой часть волны не оказывает действия в точке P , а неприкрытая — действует так, как будто преграды нет.

Дифракционную картину на круглом отверстии и диске можно наблюдать с помощью точечного монохроматического источника, от которого распространяются сферические волны.

В случае круглого отверстия (рис. 9.2, *а*) результат в точке P зависит от диаметра отверстия, т. е. от количества открытых этим отверстием зон (чётное количество зон дает минимум интенсивности, нечётное — максимум (рис. 9.2, *б*)).

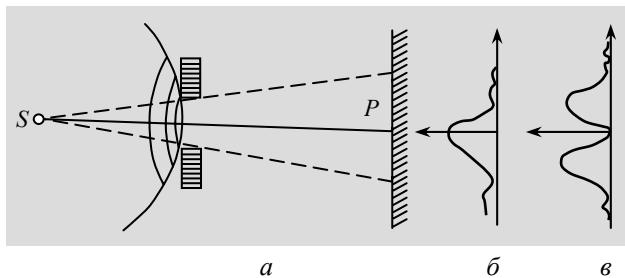


Рис. 9.2

В случае круглого диска (рис. 9.3, *а*), если он перекрывает m первых зон Френеля, то интенсивность в точке P определится половиной действия первой открытой зоны ($m + 1$).

Этим объясняется то, что в центре геометрической тени на экране всегда наблюдается максимум интенсивности (рис. 9.3, *б*)).

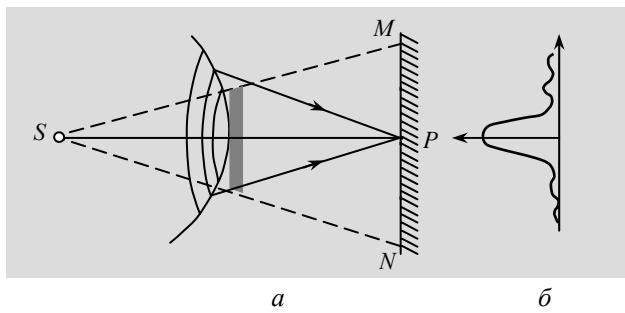


Рис. 9.3

Если на узкую щель шириной b падает нормально плоская световая волна, то, фокусируя её с помощью линзы (рис. 9.4) на экран, будем наблюдать интерференционную картину, которая представляет собой результат интерференции волн, испытавших дифракцию в различных направлениях.

Для произвольного направления под углом ϕ условием минимума в точке P есть выражение $b \sin \phi = m\lambda$, а условием максимума — $b \sin \phi = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$, $m=1, 2, 3, \dots$.

Наблюдаемая на экране дифракционная картина (чередование светлых и тёмных полос) симметрична относительно центра линзы.

Из графика распределения интенсивности на экране (рис. 9.5) видно, что на центральный максимум приходится основная доля (свыше 90 %) светового потока, прошедшего через щель. Количество минимумов интенсивности определяется отношением $m \leq \frac{b}{\lambda}$ и, если $b < \lambda$, минимумы на экране не возникают и интенсивность света монотонно спадает от середины картины к её краям. При увеличении количества щелей в препятствии дифракционные максимумы на экране становятся более узкими, а вся дифракционная картина — более отчётливой.

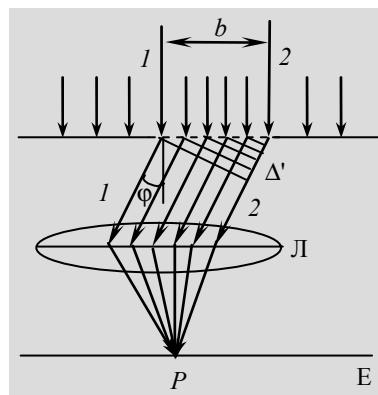


Рис. 9.4

Это позволило использовать систему большого количества щелей, равноотстоящих друг от друга, для исследования дифракции.

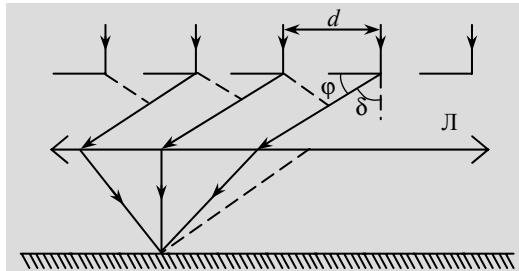


Рис. 9.5

Такая система щелей (рис. 9.6) называется дифракционной решёткой. Общая ширина щели и непрозрачного промежутка называется периодом решётки d .

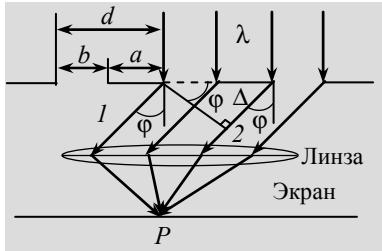


Рис. 9.6

Если на такую решётку падает плоская световая волна, то разность хода лучей от соседних щелей $\delta = d \sin \varphi$ и разность фаз $\delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi$.

Для тех направлений, для которых $\delta\varphi = \pm 2\pi m$, $d \sin \varphi = \pm m\lambda$ ($m = 0 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) определяет положение главных максимумов интенсивности.

Значение числа m — определяет порядок главного максимума, причем максимум нулевого порядка — один, а остальных порядков — по два.

Распределение интенсивности света от дифракционной решётки показано на рис. 9.7. Между главными максимумами располагаются слабые вторичные максимумы. Количество таких максимумов, приходящихся на промежуток между соседними главными максимумами, равно $N - 2$. Расчёт показывает, что интенсивность вторичных максимумов не превышает $1/23$ интенсивности ближайшего главного максимума.

Количество наблюдающихся главных максимумов определяется из условия, $d \sin \varphi = m\lambda$, так как $|\sin \varphi| \leq 1$, то $m \leq \frac{d}{\lambda}$.

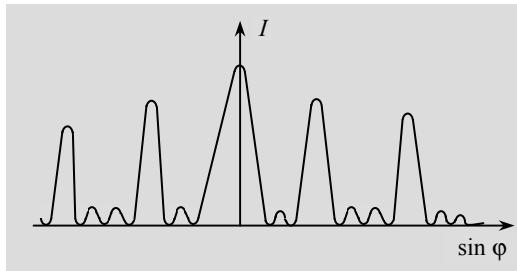


Рис. 9.7

Если на решётку падает полихроматический свет, то из условия $d \sin \varphi = m\lambda$ следует, что положение максимума (для одного и того же порядка m) для различных длин волн различно, т. е. решётка разлагает немонохроматический свет в дифракционный спектр, а, следовательно, обладает дисперсией.

Под дисперсией понимают способность решётки раздвигать на определённый угол излучения различных длин волн для малых углов

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} \approx \frac{m}{d}.$$

Другая важная характеристика решётки определяется шириной дифракционных максимумов и возможностью их резкого изображения на двух близких спектральных линиях. Это — разрешающая сила дифракционной решётки:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN,$$

где N — общее количество штрихов решётки.

Различают дифракционные решётки прозрачные и отражательные. Лучшие решётки имеют до 1500 штрихов на 1 мм и общее количество штрихов достигает порядка 10^5 .

При распространении световых волн в средах, имеющих местные неоднородности (сравнимые с длиной световой волны), наблюдаются дифракционные явления. Так, дифракция на капельках дождя приводит к образованию радуги, дифракция на капельках тумана ведет к образованию венцов вокруг Солнца и Луны, а дифракция на неоднородностях плоскостей — к помутнению сред и к другим явлениям.

Открытие рентгеновских лучей позволило использовать их для наблюдения дифракции на кристаллических решётках, так как размеры таких структур соизмеримы с длиной волны рентгеновских лучей.

В кристаллах атомы расположены упорядоченно, образуя пространственную дифракционную решётку с периодом d .

Если пучок параллельных рентгеновских лучей падает под углом Θ к атомной плоскости на кристалл (рис. 9.8), то между лучами, отраженными от соседних атомных плоскостей, возникает разность хода δ и, интерферируя между собой, лучи дают дифракционные максимумы.

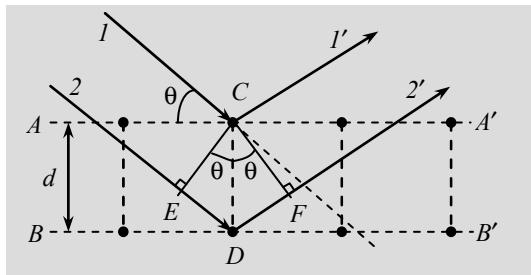


Рис. 9.8

Плоские вторичные волны, отразившиеся от разных атомных слоев, интерферируют между собой подобно волнам, посыпаемым в данном направлении различными щелями дифракционной решётки. При этом вторичные волны будут погашать друг друга во всех направлениях, кроме тех, для которых разность хода между соседними волнами кратна длине волны λ .

Разность хода между лучами I и 2 (рис. 9.8)

$$\delta = DE + DF = 2d \sin \Theta .$$

Условием максимума для межатомной интерференции будет

$$2d \sin \Theta = m\lambda , m = 0, 1, 2, 3, \dots .$$

Это условие для дифракции рентгеновских лучей в кристаллах называют *формулой Вульфа–Брэгга* по имени русского ученого Вульфа и английского Брэгга, получивших это соотношение в 1913 году.

Явление позволяет исследовать структуры тел (твердых, жидких, газообразных) и называется *рентгеноструктурным анализом*.



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Дифракция подтверждает волновую природу света.
2. Наблюдается дифракция при соизмеримости размеров препятствий и длины световой волны.
3. Явление дифракции наблюдается для всех волновых процессов независимо от природы волн. Принцип Гюйгенса–Френеля следует рассматривать как расчётный приём, заменяющий строгое и трудное решение волнового уравнения и показывающий, как согласуется волновая природа света с его прямолинейным распространением.
4. Наблюдение дифракции рентгеновских лучей позволило рассматривать их как электромагнитные волны с длиной волны в несколько ангстрем.



Следует запомнить

1. Расчёт интенсивности света при дифракции определяется принципом Гюйгенса–Френеля.

2. Формулы:

$$b \sin \varphi = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{— условие максимума на щели;}$$

$d \sin \varphi = m\lambda$ — условие главных максимумов дифракционной решётки;

$$D = \frac{\delta\Phi}{\delta\lambda} \approx \frac{m}{d} \quad \text{— дисперсия решётки;}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN \quad \text{— разрешающая сила решётки;}$$

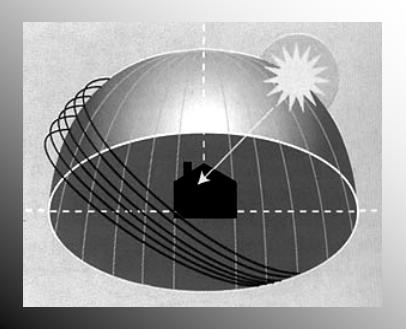
$$2d \sin \Theta = m\lambda \quad \text{— формула Вульфа–Брэгга.}$$

**Надо уметь**

1. Правильно делить фронт волны на зоны Френеля.
2. Использовать дифракционную решётку для определения длины волны света и наблюдения дифракционного спектра.
3. По имеющейся решётке определить её разрешающую силу.

**Контрольные вопросы**

1. В чём сущность явления дифракции света?
2. Что такое принцип Гюйгенса–Френеля?
3. Как объяснить прямолинейное распространение света, используя волновую теорию?
4. Что происходит с дифракционной картиной при увеличении количества щелей дифракционной решётки?
4. Как определить период решётки по известной длине волны?
5. Что можно определять с помощью формулы Вульфа–Брэгга?



10. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

В световой волне совершают колебания два вектора — \vec{E} и \vec{H} (рис. 10.1), причём по фазе они совпадают. Из опытов следует, что различные действия света на вещество вызываются электрическим вектором \vec{E} , поэтому при описании оптических явлений магнитный вектор \vec{H} можно не принимать во внимание. В естественном свете колебания вектора \vec{E} происходят в различных направлениях по отношению к распространению луча, быстро и беспорядочно сменяют друг друга (рис. 10.1).

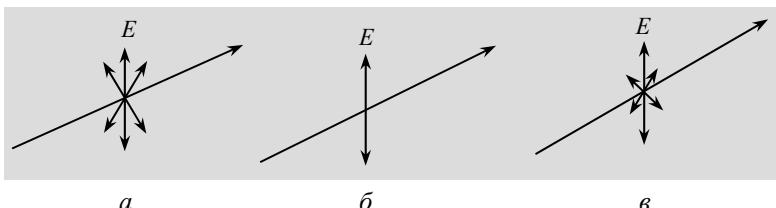


Рис. 10.1

Некоторыми приёмами можно получить свет, в котором упорядочены направления колебаний вектора \vec{E} , (рис. 10.1, *б*). Свет называют *линейнополяризованным* или *частичнополяризованным* (рис. 10.1, *в*), когда колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений.

При наложении друг на друга когерентных плоскополяризованных световых волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны, получается эллиптически поляризованная волна.

Поляризацией света называется явление, в результате которого колебания вектора \vec{E} световой волны становятся упорядоченными.

Плоскость волны E (рис. 10.1), в которой колеблется вектор \vec{E} , называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость — плоскостью поляризации.

Причиной поляризации света при прохождении через кристаллы является упорядоченное расположение атомов в пространственной решётке кристалла, в результате чего кристалл пропускает только колебания светового вектора, происходящие в некоторой характерной для данной решётки плоскости.

Приборы для получения поляризованного света называют поляризаторами, а приборы для обнаружения поляризованного света — анализаторами. Эти приборы взаимозаменяемы и имеют определённую плоскость, в которой пропускают колебания. Такую плоскость называют плоскостью поляризации. Глаз человека не отличает поляризованный свет от естественного.

Рассмотрим изменение интенсивности света при изменении угла между плоскостями анализатора и поляризатора.

Пусть плоскости главных сечений поляризатора и анализатора составляют угол φ , интенсивность света, пришедшего в поляризатор — J_0

Амплитуда плоскополяризованного света E_0 составляет угол φ с плоскостью анализатора A (рис. 10.2, *a*).

Амплитуду E_0 можно разложить на две составляющие (рис. 10.2, *б*): $E = E_0 \cos \varphi$ — амплитуду света, проходящего через анализатор, и $E_1 = E_0 \sin \varphi$ — амплитуду света, задерживающегося анализатором.

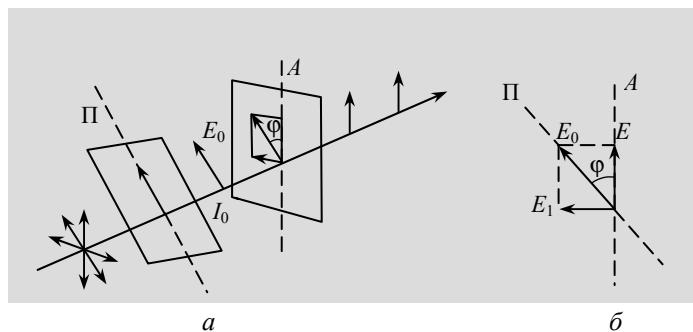


Рис. 10.2

Поскольку $J \sim E^2$, а $J_0 \sim E_0^2$, то интенсивность света, прошедшего анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла φ между главными сечениями анализатора и поляризатора, т. е.

$$J = J_0 \cos^2 \varphi.$$

Это соотношение носит название *закона Малюса*.

Следует учитывать, что при прохождении света через один поляризатор его интенсивность уменьшается вдвое, т. е. $J_0 = \frac{1}{2} J_{\text{есч}}$.

Из закона Малюса видно, что при $\phi = 90^\circ$, $J = 0$ (анализатор и поляризатор «скрещены», свет не проходит), а при $\phi = 0$, $J = J_0$ (анализатор и поляризатор параллельны, свет проходит).

Таким образом, вращая анализатор вокруг продольной оси, можно установить положение плоскости колебаний поляризованного света, степень его поляризации, а по известному углу ϕ — интенсивность света, прошедшего анализатор.

Под степенью поляризации понимают выражение

$$P = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}.$$

При падении света на границу раздела двух диэлектриков (рис. 10.3, *a*) отражённый и преломлённый лучи частично поляризуются во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Степень поляризации их зависит от угла падения α .

При угле падения, удовлетворяющем условию $\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$ (рис. 10.3, *б*), отражённый луч полностью поляризован, преломлённый же луч частично поляризован с максимальной степенью поляризации.

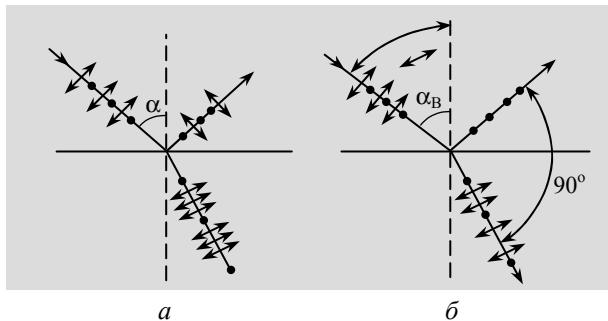


Рис. 10.3

Угол α_B называют *углом Брюстера* или *углом полной поляризации*, а n_{21} — относительным показателем преломления. При условии Брюстера угол между отражённым и преломлённым лучами равен 90° .



Методические указания

Необходимо понять и усвоить

1. Световая волна — поперечная $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{V}$.
2. Эллиптически поляризованный свет — есть наиболее общий вид поляризованного света.
3. Плоскость поляризации — это плоскость, перпендикулярная плоскости колебаний вектора \vec{E} .



Следует запомнить

1. При отражении света от диэлектрика полностью поляризуется только отражённый луч.

2. Формулы:

$J = J_0 \cos^2 \phi$ — закон Малюса; $\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$ — закон Брюстера;

$$P = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}$$
 — степень поляризации.



Надо уметь

1. Отличать естественный свет от поляризованного с помощью анализатора.
2. Определять направление лучей в кристаллах при двойном лучепреломлении.
3. Определять степень поляризации поляризованного света.



Контрольные вопросы

1. Что такое естественный и поляризованный свет?
2. Что такое плоскость колебаний и плоскость поляризации?
3. Какие существуют типы поляризованного света?



ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Примеры решения задач

Задача 1. Точка участвует в свободных гармонических колебаниях. В какой-то момент времени смещение точки от положения равновесия равно 0,05 м, скорость — 0,2 м/с, ускорение — 0,8 м/с². Определить амплитуду колебаний, собственную циклическую частоту, период колебаний и фазу колебаний в этот момент времени.

Дано:

$$\begin{aligned}x &= 0,05 \text{ м;} \\v &= 0,2 \text{ м/с;} \\a &= 0,8 \text{ м/с}^2.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A - ? \\ \omega_0 - ? \\ T - ? \\ \varphi - ?\end{aligned}$$

Решение

Уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$x = A \sin \varphi. \quad (1.1)$$

Скорость при гармонических колебаниях определяется так:

$$v = \frac{dx}{dt} = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$v = A \omega_0 \cos \varphi. \quad (1.2)$$

Ускорение точки при гармонических колебаниях определяется по формуле:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$a = -A \omega_0^2 \sin \varphi. \quad (1.3)$$

Разделим левые и правые части уравнений (1.1) и (1.3), чтобы получить формулу для определения собственной циклической частоты колебаний:

$$\frac{x}{a} = \frac{1}{\omega_0^2}.$$

Тогда собственная циклическая частота равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a}{x}}.$$

Период колебаний определяется так:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

Для определения фазы колебаний в данный момент времени разделим левые и правые части уравнений (1.1) и (1.2):

$$\frac{x}{v} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\omega_0}.$$

Тогда

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x\omega_0}{v}.$$

Фаза колебаний равна:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x\omega_0}{v}.$$

Теперь из уравнения (1.1) определим амплитуду колебаний:

$$A = \frac{x}{\sin\left(\operatorname{arctg} \frac{x\omega_0}{v}\right)}.$$

Проверим единицу измерения:

$$[\omega_0] = \left[\sqrt{\frac{M}{c^2 \cdot M}} \right] = \left[\frac{\text{рад}}{c} \right]; [T] = \left[\frac{\text{рад} \cdot c}{\text{рад}} \right] = [\text{с}];$$

$$[\varphi] = \left[\operatorname{arctg} \frac{M \cdot \text{рад} \cdot c}{M \cdot c} \right] = [\text{рад}]; [A] = [M].$$

Выполним вычисления:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{0,8}{0,05}} = 4 \text{ рад/с};$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14}{4} = 1,57 \text{ с};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{0,05 \cdot 4}{0,2} = 0,785 \text{ рад};$$

$$A = \frac{0,05}{\sin 0,785} = 7,1 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Задача 2. Определить отношение кинетической энергии точки, выполняющей гармонические колебания, к ее потенциальной энергии в момент времени, когда смещение точки от положения равновесия равно $\frac{A}{7}$.

Дано:

$$x = \frac{A}{7} \text{ м.}$$

$$\frac{E_k}{U} - ?$$

Решение

Пусть уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \phi_0) = A \sin \phi.$$

Скорость при гармонических колебаниях определяется так:

$$v = \frac{dx}{dt} = A \omega_0 \cos \phi.$$

Кинетическая энергия точки определяется по формуле:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} A^2 \omega_0^2 \cos^2 \phi.$$

Потенциальная энергия точки определяется так:

$$U = \frac{m}{2} A^2 \omega_0^2 \sin^2 \phi.$$

Отношение кинетической энергии к потенциальной имеет вид:

$$\frac{E_k}{U} = \operatorname{ctg}^2 \phi.$$

Фазу колебания найдём из уравнения колебания точки:

$$\sin \phi = \frac{x}{A}.$$

Учитывая условия задачи, получим:

$$\sin \phi = \frac{A}{A \cdot 7} = \frac{1}{7}.$$

Откуда фаза колебания равна:

$$\phi = 0,143 \text{ рад.}$$

Тогда

$$\frac{E_k}{U} = \operatorname{ctg}^2 \cdot 0,143 = 48.$$

Задача 3. Написать уравнение свободных незатухающих колебаний, если энергия тела равна 30 мкДж, максимальная сила, действующая на него, составляет 1,5 мН. Период колебаний равен 2 с, начальная фаза — $\pi/3$.

Дано:

$$\begin{aligned} E &= 30 \text{ мкДж} = \\ &= 30 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}; \\ F_{\max} &= 1,5 \text{ мН} = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н}; \\ T &= 2 \text{ с}; \quad \phi_0 = \frac{\pi}{3}. \end{aligned}$$

$$x = x(t) - ?$$

Решение

Общий вид уравнения свободных незатухающих колебаний таков:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \phi_0).$$

Из условий задачи нужно найти численные значения амплитуды колебаний, собственной циклической частоты, и поставить их на соответствующие места в уравнение колебаний.

Полная энергия свободных незатухающих колебаний определяется по формуле:

$$E = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2}.$$

Максимальная сила, действующая на тело, определяется так:

$$F_{\max} = m A \omega_0^2.$$

Разделим почленно левые и правые части этих уравнений:

$$\frac{E}{F_{\max}} = \frac{A}{2}.$$

Отсюда амплитуда колебаний определяется так:

$$A = \frac{2E}{F_{\max}}.$$

Собственную циклическую частоту можно определить через период колебаний:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}.$$

Проверим единицу измерения:

$$[A] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \right] = [\text{м}]; \quad [\omega_0] = \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

Выполним вычисления:

$$A = \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{2} = \pi.$$

Запишем уравнение свободных незатухающих колебаний:

$$x = 0,04 \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right), \text{ м.}$$

Задача 4. Материальная точка участвует в двух колебаниях, которые выполняются вдоль одной прямой. Уравнения колебаний точки имеют вид:

$$x_1 = \sin t, \text{ см и } x_2 = 2 \cos t, \text{ см.}$$

Определить амплитуду, частоту и начальную фазу результирующего колебания. Написать уравнение результирующего колебания.

Дано:

$$x_1 = \sin t, \text{ см;}$$

$$x_2 = 2 \cos t, \text{ см.}$$

$$A - ? v - ? \varphi - ?$$

Решение

Перепишем первое уравнение колебаний в виде:

$$x_1 = \cos\left(t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Амплитуда результирующего колебания определяется так:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Из складываемых уравнений найдем:

$$A_1 = 1 \text{ см; } A_2 = 2 \text{ см; } \varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \quad \varphi_2 = 0; \quad \omega_0 = 1 \text{ рад.}$$

Тогда амплитуда результирующего колебания:

$$A = \sqrt{0,01^2 + 0,02^2 + 2 \cdot 0,01 \cdot 0,02 \cos\left(0 - \frac{\pi}{2}\right)} = 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Известно, что частота результирующего колебания равна частоте складываемых колебаний, то есть

$$v = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

или

$$v = \frac{1}{2 \cdot 3,14} = 0,16 \text{ с}^{-1}.$$

Начальную фазу результирующего колебания определим по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

или

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{0,01 \sin \frac{\pi}{2} + 0,02 \sin 0}{0,01 \cos \frac{\pi}{2} + 0,02 \cos 0} = \frac{1}{2}.$$

Откуда $\varphi = 0,46$ рад.

Уравнение результирующего колебания имеет вид:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Подставим численные значения величин:

$$x = 2,24 \cdot 10^{-2} \cos(t + 0,46), \text{ м.}$$

Задача 5. В колебательном контуре, состоящем из конденсатора ёмкостью 25 нФ и катушки индуктивностью 1,015 Гн, выполняются свободные незатухающие колебания. Написать уравнение изменения электрического тока в контуре и напряжения на обкладках конденсатора, если обкладки конденсатора заряжены до 2,5 мКл. Определить силу тока и напряжение через промежутки времени $T/8$; $T/4$; $T/2$ от начала колебаний.

Дано:

$$C = 25 \text{ нФ} = 25 \cdot 10^{-9} \Phi;$$

$$L = 1,015 \text{ Гн};$$

$$q = 2,5 \text{ мКл} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл};$$

$$t_1 = T/8 \text{ с};$$

$$t_2 = T/4 \text{ с};$$

$$t_3 = T/2 \text{ с.}$$

Решение

Предположим, что заряд на обкладках конденсатора изменяется со временем по закону синуса:

$$q = q_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Тогда сила тока в контуре и напряжение на обкладках конденсатора выполняют колебания по таким законам:

$$I = \frac{dq}{dt} = q_{\max} \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\text{и } U = \frac{q}{C} = \frac{q_{\max}}{C} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

$$I = I(t) - ?U = U(t) - ?$$

$$I_1 - ?I_2 - ?I_3 - ?$$

$$U_1 - ?U_2 - ?U_3 - ?$$

Собственная частота электромагнитных колебаний определяется так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Амплитуда силы тока равна:

$$I_{\max} = q_{\max} \omega_0.$$

Амплитудное значение напряжения на обкладках конденсатора определяется так:

$$U_{\max} = \frac{q_{\max}}{C}.$$

Тогда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{1,015 \cdot 25 \cdot 10^{-9}}} = 2\pi \cdot 10^3 \text{ рад};$$

$$I_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-6} 2\pi \cdot 10^3 = 15,7 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$U_{\max} = \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-9}} = 100 \text{ В.}$$

Запишем уравнения колебаний силы тока в контуре и напряжения на обкладках конденсатора:

$$I = 15,7 \cdot 10^{-3} \cos(2\pi \cdot 10^3 t), \text{ А};$$

$$U = 100 \sin(2\pi \cdot 10^3 t), \text{ В.}$$

Определим силу тока в контуре и напряжение на обкладках конденсатора через заданные промежутки времени:

$$I_1 = 11,1 \text{ мА}, \quad U_1 = 70,7 \text{ В};$$

$$I_2 = 12,5 \text{ мкА}, \quad U_2 = 157 \text{ В};$$

$$I_3 = -15,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad U_3 = 0,16 \text{ В.}$$

Задача 6. В колебательном контуре выполняются свободные незатухающие электромагнитные колебания. Определить отношение энергии магнитного поля катушки к энергии электрического поля конденсатора в момент времени $T/8$. Начальная фаза колебаний равна нулю.

Дано:

$$t = \frac{T}{8}.$$

$$\frac{E_m}{E_s} - ?$$

Решение

Предположим, что заряд на обкладках конденсатора изменяется со временем по закону косинуса:

$$q = q_{\max} \cos(\omega_0 t + \phi_0).$$

Тогда сила тока определяется так:

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_{\max} \omega_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0).$$

Энергия магнитного поля катушки равна:

$$E_m = \frac{LI_{\max}^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \phi_0).$$

Энергия электрического поля конденсатора определяется так:

$$E_s = \frac{q^2}{2C},$$

или

$$E_s = \frac{q_{\max}^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \phi_0).$$

Разделив левые и правые части этих уравнений, получим

$$\frac{E_m}{E_s} = \frac{LCI_{\max}^2}{q_{\max}^2} \operatorname{tg}^2 \omega_0 t.$$

Известно, что максимальное значение силы тока в контуре:

$$I_{\max} = q_{\max} \omega_0.$$

Собственная частота электромагнитных колебаний определяется так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

После преобразований получим:

$$\frac{E_m}{E_s} = \operatorname{tg}^2 \omega_0 t.$$

Выполним вычисления:

$$\frac{E_m}{E_0} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{8}\right) = 1.$$

Задача 7. Математический маятник длиной 0,5 м за 4 мин теряет 99 % своей энергии. Определить логарифмический декремент затухания маятника.

Дано:

$$\begin{aligned} l &= 0,5 \text{ м}; \\ \tau &= 4 \text{ мин} = 240 \text{ с}; \\ E_{t+\tau} &= 0,01 E_t. \end{aligned}$$

$\delta - ?$

Решение

Полная механическая энергия математического маятника в момент времени t определяется так:

$$E_t = \frac{m\omega_0^2}{2} A_0 e^{-2\beta t}.$$

Через промежуток времени τ полная механическая энергия математического маятника определяется так:

$$E_{t+\tau} = \frac{m\omega_0^2}{2} A_0 e^{-2\beta(t+\tau)}.$$

Разделив левые и правые части этих уравнений, после преобразований получим:

$$\frac{E_t}{E_{t+\tau}} = e^{2\beta\tau}.$$

Прологарифмируем полученное выражение:

$$2\beta\tau = \ln \frac{E_t}{E_{t+\tau}}.$$

Отсюда коэффициент затухания:

$$\beta = \frac{\ln \frac{E_t}{E_{t+\tau}}}{2\tau}.$$

Логарифмический декремент затухания маятника определяется так:

$$\delta = \beta T = \beta \cdot 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

или

$$\delta = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{\ln \frac{E_t}{E_{t+\tau}}}{\tau}.$$

Выполним вычисления:

$$\delta = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{9,8}} \cdot \frac{\ln 100}{240} = 0,0134.$$

Задача 8. В цепи переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц последовательно соединены конденсатор ёмкостью 35,4 мкФ, сопротивление 100 Ом и катушка индуктивностью 0,7 Гн. Определить силу тока и падение напряжения на ёмкостном, активном и индуктивном сопротивлениях.

Дано:

$$U_e = 220 \text{ В};$$

$$\nu = 50 \text{ Гц};$$

$$C = 35,4 \text{ мкФ} = 35,4 \cdot 10^{-6} \Phi;$$

$$R = 100 \text{ Ом};$$

$$L = 0,7 \text{ Гн.}$$

$$I_e - ?U_C - ?U_R - ?U_L - ?$$

Решение

Эффективное значение силы тока в цепи переменного тока определяется по формуле:

$$I_e = \frac{U_e}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}}.$$

Соответственно ёмкостное, активное и индуктивное сопротивления рассчитываются так:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}; X_L = \omega L = 2\pi\nu L.$$

Падение напряжения на активном сопротивлении:

$$U_R = RI_e,$$

на ёмкостном

$$U_C = X_C I_e = \frac{I_e}{2\pi\nu C},$$

на индуктивном

$$U_L = X_L I_e = 2\pi\nu L I_e.$$

Выполним вычисления:

$$I_e = \frac{220}{\sqrt{100^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 35,4 \cdot 10^{-6}} - 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,7 \right)^2}} = 1,34 \text{ A};$$

$$U_R = 100 \cdot 1,34 = 134 \text{ В};$$

$$U_C = 90 \cdot 1,34 = 121 \text{ В};$$

$$U_L = 220 \cdot 1,34 = 295 \text{ В.}$$

Задача 9. Медный стержень длиной 0,5 м закреплен посередине. Определить количество продольных собственных колебаний этого стержня в диапазоне частот от 20 до 50 кГц. Какие это частоты?

Дано:

$$\begin{aligned} l &= 50 \text{ м;} \\ v_1 &= 20 \text{ кГц;} \\ v_2 &= 50 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

$$n - ? v_i - ?$$

Решение

При таком способе закрепления стержня между длиной стержня и длиной образовавшейся в нём стоячей волны выполняется равенство:

$$l = (2n+1)\lambda_{ct},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — целое число.

Длина стоячей волны:

$$\lambda_{ct} = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2v},$$

где v — скорость распространения в стержне механических волн частотой v .

После преобразований получим формулу для определения частот возможных продольных колебаний стержня при образовании в нем стоячей волны:

$$v_i = (2n+1) \frac{v}{2l}.$$

Скорость механической волны распространяющейся в стержне определяется так:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль Юнга для меди; ρ — плотность меди.

Тогда

$$v_i = (2n+1) \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2l}.$$

Проверим единицу измерения:

$$[v_i] = \left[\frac{M}{c \cdot \text{ЧМ}} \right] = [c^{-1}] = [\Gamma_{\text{ц}}].$$

Выполним вычисления, подставляя значения целых чисел n . По условию задачи нужно определить количество частот и их значение, которые попадают в интервал от 20 до 50 кГц. В этот интервал попадают четыре частоты, которые имеют такие значения:

$n = 3$, тогда

$$v_3 = (2 \cdot 3 + 1) \frac{\sqrt{\frac{130 \cdot 10^9}{8,9 \cdot 10^3}}}{2 \cdot 0,5} = 26,75 \text{ кГц};$$

$n = 4$, тогда

$$v_4 = (2 \cdot 4 + 1) \frac{\sqrt{\frac{130 \cdot 10^9}{8,9 \cdot 10^3}}}{2 \cdot 0,5} = 34,4 \text{ кГц};$$

$n = 5$, тогда

$$v_5 = (2 \cdot 5 + 1) \frac{\sqrt{\frac{130 \cdot 10^9}{8,9 \cdot 10^3}}}{2 \cdot 0,5} = 42,0 \text{ кГц};$$

$n = 6$, тогда

$$v_6 = (2 \cdot 5 + 1) \frac{\sqrt{\frac{130 \cdot 10^9}{8,9 \cdot 10^3}}}{2 \cdot 0,5} = 49,7 \text{ кГц}.$$

Задача 10. Два поезда с одинаковыми скоростями движутся навстречу друг другу.

Определить скорость движения поездов, если частота гудка одного из них, слышимого на другом, изменилась в $9/8$ раза? Скорость распространения звука в воздухе равна 340 м/с.

Дано:

$$\frac{v}{v_0} = n = \frac{9}{8};$$

$$v = 340 \text{ м/с};$$

$$v_{\text{пп}} = v_{\text{ист}}.$$

$$v_{\text{пп}} ?$$

Решение

Эффект Допплера описывается уравнением:

$$v = v_0 \frac{v + v_{\text{пп}}}{v - v_{\text{ист}}}.$$

Из этой формулы изменение частоты звука, регистрируемой приёмником, определяется так:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{v + v_{\text{пп}}}{v - v_{\text{ист}}}.$$

Так как поезда, то есть источник и приёмник звука, движутся с одинаковыми скоростями, после преобразований получим:

$$v_{\text{пп}} = \frac{v(n-1)}{n+1}.$$

Выполним вычисления:

$$v_{\text{пп}} = \frac{v(n-1)}{n+1} = \frac{340(9/8-1)}{9/8+1} = 20 \text{ м/с}.$$

Задача 11. Определить длину стоячей волны, если расстояние между десятой пучностьюю и пятнадцатым узлом равно 22 м.

Дано:

$$l = 22 \text{ м};$$

$$n_{\text{пуч}} = 10;$$

$$n_{y3} = 15.$$

$$\lambda_{\text{ст}} - ?$$

Решение

Расстояние между пучностьюю и узлом можно определить как разность их координат так:

$$l = x_{y3} - x_{\text{пуч}}$$

или

$$l = \left(n_{y3} + \frac{1}{2} \right) \lambda_{\text{ст}} - n_{\text{пуч}} \lambda_{\text{ст}} = \lambda_{\text{ст}} \left(n_{y3} - n_{\text{пуч}} + \frac{1}{2} \right).$$

Отсюда длина стоячей волны определяется так:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{l}{n_{y3} - n_{\text{пуч}} + 1/2}.$$

Выполним вычисления:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{22}{15 - 10 + 1/2} = 4 \text{ м.}$$

Задача 12. Схема интерферометра, с помощью которого определяются показатели преломления прозрачных веществ, показана на рисунке. На узкую щель S падает монохроматический свет, длина волны которого равна 589 нм. На пути световых лучей поставлены одинаковые трубы, заполненные воздухом, длиной каждой 10 см. Проходя через диафрагму D с двумя щелями, лучи попадают на экран E , где наблюдается интерференционная картина. Когда трубку 1 заполнили аммиаком, интерференционная картина на экране сместилась на 17 полос. Определить показатель преломления аммиака, если показатель преломления воздуха равен 1,000277.

Дано:

$$\begin{aligned}l &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}; \\ \lambda &= 589 \text{ нм} = 589 \cdot 10^{-9} \text{ м}; \\ N &= 17; \\ n_0 &= 1,000277.\end{aligned}$$

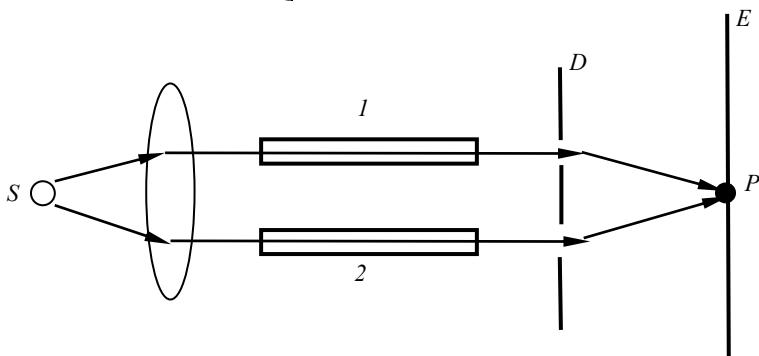
$n - ?$

Решение

Пусть на экране в точке P (см. рисунок) наблюдается максимум интерференции света, то есть наблюдается светлая полоса. Оптическая разность хода между лучами 1 и 2 при заполнении их воздухом определяется по формуле:

$$\Delta_1 = (x_2 - x_1)n_0,$$

где x_1 и x_2 — пути, пройденные лучами света от щели S до точки P на экране E .



Максимум интенсивности света наблюдается при условии:

$$\Delta_1 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Приравняем эти выражения:

$$(x_2 - x_1)n_0 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

После заполнения трубы I аммиаком, оптический путь проходящего через неё луча изменился: часть пути луч проходит в воздухе, а часть — в трубке с аммиаком. Тогда разность хода между лучами I и 2 , определяется так:

$$\Delta_2 = x_2 n_0 - [(x_1 - l)n_0 + l n].$$

Теперь тот же максимум интерференции света наблюдается в другом месте на экране. То есть светлая полоса k -го номера заняла место $(k + N)$ -й полосы. Условие наблюдения $(k + N)$ -го максимума имеет вид:

$$\Delta_2 = [2(k + N)] \frac{\lambda}{2}.$$

Приравняем эти выражения:

$$x_2 n_0 - [(x_1 - l)n_0 + l \cdot n] = [2(k + N)] \frac{\lambda}{2}.$$

Раскроем скобки:

$$x_2 n_0 - x_1 n_0 + l \cdot n_0 + l \cdot n = 2k \frac{\lambda}{2} + 2N \frac{\lambda}{2}.$$

Получим такое равенство:

$$x_2 n_0 - x_1 n_0 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

После преобразований получим формулу для определения показателя преломления аммиака:

$$n_1 = \frac{N\lambda}{l} + n_0.$$

Выполним вычисления:

$$n_1 = \frac{17 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{0,1} + 1,000277 = 1,000377.$$

Задача 13. На поверхность стеклянного клина нормально падает свет длиной волны $0,55$ мкм. Интерференционная картина наблюдается в отраженном свете. Расстояние между соседними максимумами равно $0,21$ мм. Определить угол между гранями клина, если показатель преломления стекла равен $1,5$.

Дано:

$$\begin{aligned}l &= 0,21 \text{ мм} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \lambda &= 0,55 \text{ мкм} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ n &= 1,5.\end{aligned}$$

$\gamma - ?$

Решение

В этом случае (см. рисунок) оптическая разность хода между двумя когерентными лучами определяется по формуле:

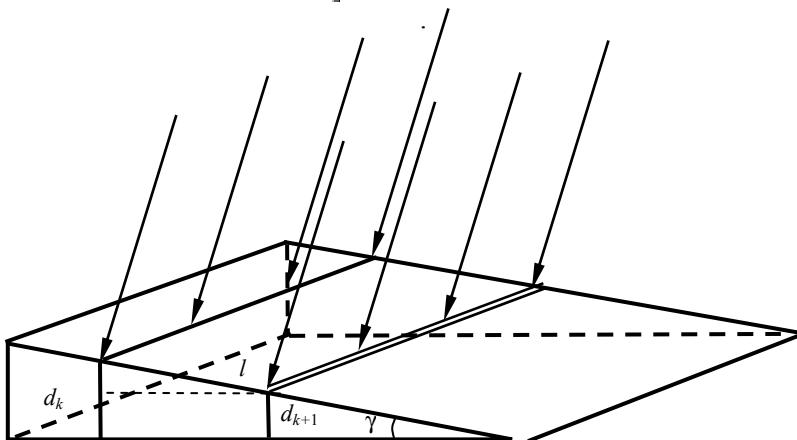
$$\Delta_k = 2d_k n - \frac{\lambda}{2},$$

где d_k — толщина клина, соответствующая k -й светлой интерференционной полосе, т. е. максимуму.

Минус $\frac{\lambda}{2}$, поскольку клин рас-

положен в воздухе. Максимум интерференции выполняется при условии:

$$\Delta_k = 2k \frac{\lambda}{2}.$$



Приравняем эти выражения

$$2d_k n - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}. \quad (13.1)$$

Для соседнего максимума — соседней светлой интерференционной полосы — можно записать аналогично:

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

и

$$\Delta_{k+1} = [2(k+1)] \frac{\lambda}{2},$$

где d_{k+1} — толщина клина, соответствующая $k+1$ -му максимуму.

Приравняем эти выражения

$$2d_{k+1}n - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} + 2 \frac{\lambda}{2}. \quad (13.2)$$

Вычитая левые и правые части уравнений (13.1) и (13.2), найдем расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами:

$$d_k - d_{k+1} = \Delta d = \frac{\lambda}{2n}. \quad (13.3)$$

Расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами еще можно определить из прямоугольного треугольника, показанного на рисунке, так:

$$l = \frac{\Delta d}{\operatorname{tg} \gamma},$$

где $\Delta d = d_k - d_{k+1}$ — разность толщин клина, соответствующих соседним интерференционным светлым полосам.

Отсюда угол между гранями клина найдем так:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta d}{l}.$$

Известно, что для очень малых углов выполняется равенство

$$\sin \gamma = \operatorname{tg} \gamma = \gamma \text{ (рад).}$$

Тогда угол γ между гранями клина равен:

$$\gamma = \frac{\Delta d}{l}.$$

Подставим в последнюю формулу значение Δd из уравнения (13.3) и получим

$$\gamma = \frac{\lambda}{2nl}.$$

Выполним вычисления:

$$\gamma = \frac{0,55 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,21 \cdot 10^{-3}} = 8,73 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Поскольку $1' = 2,91 \cdot 10^{-4}$ рад, угол клина $\gamma = 3'$.

Задача 14. На мыльную плёнку падает белый свет под углом 45° . Определить толщину плёнки, при которой она будет окрашена в жёлтый цвет, если наблюдение ведется в отражённом свете. Длина волны жёлтого света равна $6 \cdot 10^{-7}$ м, показатель преломления мыльной воды — 1,33.

Дано:

$$\begin{aligned}\alpha &= 45^\circ; \\ \lambda &= 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}; \\ n &= 1,33.\end{aligned}$$

$$d_{\min} - ?$$

Решение

Оптическая разность хода между двумя когерентными лучами определяется по формуле:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$

Плёнка будет окрашена в отражённом свете в жёлтый цвет, если для отраженных жёлтых лучей выполняется условие максимума интерференции света:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Приравниваем эти выражения

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

Отсюда толщина плёнки определяется так:

$$d = \frac{(2k+1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

Минимальной толщина плёнки будет при условии, если $k = 0$, тогда

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

Выполним вычисления:

$$d_{\min} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{4\sqrt{1,33^2 - \sin^2 45^\circ}} = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Задача 15. Пространство между линзой и плоскопараллельной пластинкой заполнено жидкостью. На поверхности линзы наблюдается интерференционная картина в виде колец — кольца Ньютона. Когда жидкость удалили, радиус третьего светлого кольца увеличился в 1,07 раза. Определить показатель преломления жидкости, если наблюдение ведется в отражённом свете. Показатель преломления жидкости больше показателя преломления стекла $n > n_{\text{ст}}$.

Дано:

$$\frac{r_{c2}}{r_{c1}} = m = 1,07;$$

$$k = 3;$$

$$n > n_{\text{ст}}.$$

$$n - ?$$

Решение

При условии, что $n > n_{\text{ст}}$ оптическая разность хода:

$$\Delta_1 = 2dn - \frac{\lambda}{2}.$$

Светлое кольцо наблюдается при условии:

$$\Delta_1 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Приравниваем эти выражения и определим $2d$:

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

Радиус кольца Ньютона, найденный по теореме Пифагора:

$$r = \sqrt{2Rd},$$

где R — радиус кривизны линзы.

Подставляя в эту формулу выражение для $2d$, получим радиус именно светлого кольца Ньютона:

$$r_{c1} = \sqrt{\frac{(2k+1)\lambda R}{2n}}.$$

Если жидкость удалить, оптическая разность хода будет:

$$\Delta_2 = 2dn_0 + \frac{\lambda}{2},$$

где n_0 — показатель преломления воздуха.

Светлое кольцо наблюдается при условии:

$$\Delta_2 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Аналогично определим $2d$:

$$2d = \frac{(2k-1)\lambda}{2n_0}.$$

В этом случае радиус светлого кольца Ньютона:

$$r_{c2} = \sqrt{\frac{(2k-1)\lambda R}{2n_0}}.$$

Найдем отношение радиусов колец:

$$\frac{r_{c1}^2}{r_{c2}^2} = \frac{(2k+1)}{(2k-1)n}.$$

Откуда показатель преломления жидкости определяется так:

$$n = \frac{(2k+1)}{(2k-1)}m^2.$$

Выполним вычисления:

$$n = \frac{(2 \cdot 3 + 1)}{(2 \cdot 3 - 1)} \cdot 1,07^2 = 1,6029.$$

Задача 16. Перед круглым отверстием радиусом 1 мм на расстоянии 1 м находится точечный источник света с длиной волны 0,5 мкм. Определить расстояние от отверстия до точки на экране, при наблюдении из которой в отверстии укладываются три зоны Френеля.

Дано:

$$r = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м};$$

$$a = 1 \text{ м};$$

$$m = 3;$$

$$\lambda = 0,5 \text{ мкм} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$b - ?$$

Решение

По методу зон Френеля радиус m -й зоны Френеля определяется так: понятно, что радиус третьей зоны равен радиусу отверстия:

$$r = r_3.$$

Отсюда расстояние от отверстия до точки наблюдения на экране определяется так:

$$b = \frac{ar^2}{\lambda am - r^2}.$$

Проверим единицу измерения:

$$[b] = \left[\frac{\text{М} \cdot \text{М}^2}{\text{М} \cdot \text{М} \cdot \text{М}^2} \right] = [\text{м}].$$

Выполним вычисления:

$$b = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 3 - 10^{-6}} = 2 \text{ м.}$$

Задача 17. Свет падает нормально на дифракционную решётку, длина которой равна 2 см. В спектре третьего порядка красная линия длиной волны 630 нм наблюдается под углом дифракции 20° . Определить постоянную дифракционной решётки, разрешающую способность и угловую дисперсию в этом порядке.

Дано:

$$\begin{aligned} l &= 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м;} \\ \varphi &= 20^\circ; \\ k &= 3; \\ \lambda &= 630 \text{ нм} = 630 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \end{aligned}$$

$$d - ? R - ? D_\varphi - ?$$

Решение

Главные дифракционные максимумы наблюдаются при условии:

$$d \sin \varphi = k\lambda.$$

Отсюда найдем постоянную дифракционной решётки:

$$d = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}.$$

Разрешающая способность дифракционной решётки равна:

$$R = k \frac{l}{d}.$$

Угловая дисперсия

$$D_\varphi = \frac{k}{d \cos \varphi}.$$

Выполним вычисления:

$$d = \frac{3 \cdot 630 \cdot 10^{-9}}{\sin 20^\circ} = 5,53 \cdot 10^{-6} \text{ м;} \quad R = 3 \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5,53 \cdot 10^{-6}} = 10850;$$

$$D_\varphi = \frac{3}{5,53 \cdot 10^{-6} \cdot \cos 20^\circ} = 577\,311,6 \text{ м}^{-1}.$$

Задача 18. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, при этом его интенсивность на выходе уменьшилась в 4 раза. Определить угол между главными направлениями пропускания анализатора и поляризатора, если потери интенсивности на отражение и поглощение света, при прохождении каждого поляроида, равны 10 %.

Дано:

$$\frac{I_0}{I_a} = n = 4;$$

$$k = 0,1.$$

$$\varphi - ?$$

Решение

По закону Малюса:

$$I_a = (1-k) I_p \cos^2 \varphi.$$

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор:

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

Подставим это выражение в закон Малюса:

$$I_a = \frac{1}{2} (1-k)^2 I_0 \cos^2 \varphi.$$

Разделим левую и правую части этого уравнения на I_0 :

$$\frac{I_a}{I_0} = \frac{1}{2} (1-k)^2 \cos^2 \varphi.$$

Отсюда найдем угол между главными направлениями пропускания анализатора и поляризатора:

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{2(1-k)^2}$$

или $\varphi = 38^\circ$.

Задача 19. Свет, проходя в воздухе, падает на поверхность воды, которая налита в стеклянный стакан. Отражённый от дна стакана луч полностью поляризован. Определить угол падения луча света на поверхность воды, если показатель преломления стекла равен 1,5, воды — 1,33.

Дано:

$$n_{\text{ст}} = 1,5;$$

$$n_{\text{в}} = 1,33.$$

$$\alpha - ?$$

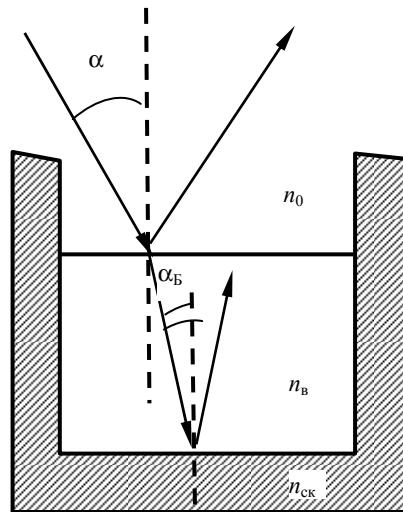
Решение

Если отражённый от дна луч (см. рисунок) полностью поляризован, это значит, что на границе вода — стекло выполняется закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{в}}}.$$

Отсюда угол Брюстера найдем так:

$$\alpha_B = \operatorname{arctg} \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{в}}}.$$



Угол Брюстера равен углу преломления луча света, падающего на поверхность воды. Запишем закон преломления света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_B} = \frac{n_B}{n_0},$$

де n_0 — показатель преломления воздуха.

Отсюда найдем угол падения света на поверхность воды:

$$\sin \alpha = \frac{n_B}{n_0} \sin \alpha_B$$

или

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{n_B}{n_0} \sin \alpha_B \right).$$

Выполним вычисления:

$$\alpha_B = \arctg \frac{1,5}{1,33} = 0,8454 \text{ рад};$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{1,33}{1} \sin 0,8454 \right) = 84^\circ.$$

Задача 20. Определить путь, пройденный монохроматическим светом в воздухе, чтобы его интенсивность уменьшилась в 2 раза и в 10 раз, если для света длиной волны 250 пм коэффициент поглощения воздуха равен $5,04 \text{ м}^{-1}$.

Дано:

$$\frac{I_0}{I} = 2;$$

$$\frac{I_0}{I} = e;$$

$$\frac{I_0}{I} = 10;$$

$$k = 5,04 \text{ м}^{-1};$$

$$\lambda = 250 \text{ пм.}$$

$$x_1 - ? x_2 - ? x_3 - ?$$

Решение

По закону Бугера–Ламберта имеем:

$$I = I_0 e^{-kx}.$$

Отсюда

$$\frac{I_0}{I} = e^{kx}.$$

Прологарифмируем это уравнение:

$$\ln \frac{I_0}{I} = kx.$$

Отсюда найдем путь, пройденный монохроматическим светом в воздухе

$$x = \frac{\ln I_0 / I}{k}.$$

Выполним вычисления:

$$x_1 = \frac{\ln 2}{k} = \frac{\ln 2}{5,04} = 0,14 \text{ м};$$

$$x_3 = \frac{\ln 10}{k} = \frac{\ln 10}{5,04} = 0,46 \text{ м.}$$

Задача 21. Определить связь между групповой и фазовой скоростями света, если закон дисперсии имеет вид: $v = m \frac{2\pi}{\lambda}$, где $m = 1$.

Какому виду дисперсии света соответствует эта зависимость?

Дано:

$$v = m \frac{2\pi}{\lambda}; m = 1.$$

$$u - ?$$

Решение

Связь между групповой и фазовой скоростями света задается уравнением:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

Определим зависимость фазовой скорости света от его длины волны:

$$\frac{dv}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2}.$$

Подставим это уравнение в предыдущую формулу:

$$u = v - \lambda \left(-\frac{2\pi}{\lambda^2} \right).$$

После преобразований, получим:

$$u = 2v.$$

Поскольку групповая скорость света больше его фазовой скорости, имеем область аномальной дисперсии.



Задачи для самостоятельного решения

КОЛЕБАНИЯ

1. Записать закон движения тела массой 0,1 кг, колеблющегося на пружине жёсткостью 250 Н/м, если полная энергия тела при этом равна 0,05 Дж, а его смещение в начальный момент времени является максимальным. [$x = 0,02 \cos(50t)$ м]
2. Как изменится период колебаний математического маятника, если его перенести с экватора Земли на полюс? Ускорение свободного падения на экваторе и полюсе равно 9,814 и 9,832 м/с² соответственно. (Уменьшится в 1,0009 раз)
3. Кварцевая пластинка совершает колебания с амплитудой 0,1 мм и периодом 1 мкс. Найти максимальную скорость точек пластинки при таких колебаниях. (628 м/с)
4. Период колебаний железнодорожного вагона массой 20 т составляет 1 с. Определить суммарную жёсткость всех пружин вагонной подвески. (790 кН/м)
5. Для материальной точки, движущейся по закону $x = 3 \cos(6\pi t + 0,5\pi)$ м, найти максимальное ускорение, а также смещение из положения равновесия в момент времени $t = T/4$. ($1,07 \cdot 10^3$ м/с²; 3 м)
6. В колебательном контуре с конденсатором ёмкостью 150 мКФ заряд на обкладках конденсатора изменяется по закону $q = 5 \cos(10^3 \pi t + 0,25\pi)$ нКл. Определить амплитуду силы тока в контуре, а также индуктивность контура. (15,7 мКА; 0,68 мГн)
7. Найти амплитуду колебаний силы тока в электрическом контуре, при которых заряд конденсатора изменяется гармонически от максимального значения 3 пКл до нуля за время 2 мкс. (2,36 мКА)
8. Какую величину имеет полная энергия электромагнитных колебаний в контуре индуктивностью 25 мкГн, если частота колебаний равна 1 МГц, а амплитуда напряжения на конденсаторе составляет 60 мВ? (1,82 пДж)

9. Два электрических контура имеют одинаковые значения собственной частоты колебаний. Отношение ёмкостей этих контуров равно 45. Чему равно отношение их индуктивностей? (0,022)

10. В колебательном контуре, индуктивность которого равна 16 мГн, 50 колебаний совершаются за 3 мс. Какова ёмкость этого контура? (0,57 мФ)

11. Частица совершает колебания, описываемые уравнениями $x = 3\cos(7t)$ м, $y = 2\cos(7t + \pi)$ м. Определить положение и модуль скорости этой частицы в момент времени $t = 5$ с. ($x = -2,71$ м; $y = 1,81$ м; $v = 10,81$ м/с)

12. Найти амплитуду колебаний, получающихся при сложении двух колебаний одного направления с амплитудами, равными 2 м, если разность начальных фаз складываемых колебаний составляет а) $\pi/2$; б) $\pi/3$. (2,83 м; 3,46 м)

13. Построить векторную диаграмму сложения двух колебаний, описываемых уравнениями $x_1 = \cos(2t + \pi/6)$, $x_2 = 2\cos(2t - \pi/2)$.

14. Точка участвует в двух колебаниях, уравнения которых $x = 2\cos(3t)$ м, $y = 3\sin(3t - \pi/2)$ м. Определить уравнение траектории точки и схематически показать её на графике. ($y = -1,5x$)

15. Амплитуда колебаний точки за 10 с уменьшается от начального значения 3 см до значения 1 см. Определить коэффициент затухания колебаний. ($0,11 \text{ с}^{-1}$)

16. Найти логарифмический декремент затухания колебаний маятника, если за 100 колебаний их амплитуда уменьшается в 7,4 раза. (0,02)

17. Период и коэффициент затухания колебаний автомобиля, возникающих при наезде на неровности дороги, равны 1 с и $1,15 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Во сколько раз амплитуда третьего колебания автомобиля меньше амплитуды первого колебания? (10)

18. Добротность фортелианной струны как колебательной системы равна 10^3 . Как изменится амплитуда колебаний струны после совершения 100 полных колебаний? (Уменьшится в 1,37 раза)

19. Определить частоту затухающих колебаний в контуре, состоящем из конденсатора ёмкостью 1 мкФ , катушки индуктивностью 1 мГн и сопротивления 5 Ом . (31524 с^{-1})

20. Во сколько раз уменьшается за один период амплитуда колебаний напряжения на элементах RLC -контура, ёмкость которого равна 100 нФ, индуктивность 300 мкГн, а сопротивление 3 Ом? (1,19)

21. При какой величине сопротивления RLC -контура с ёмкостью 25 мкФ и индуктивностью 10 мГн амплитуда силы тока в нем уменьшается в 2 раза за 300 колебаний? Затухание считать малым. (14,7 мОм)

22. Амплитуда силы тока в RLC -контуре уменьшается в 2 раза за 1 с. За какое время она уменьшится в 100 раз? (6,64 с)

23. Определить амплитуду вынужденных колебаний пружинного маятника массой 3 кг под действием периодической силы $F = 100\cos(6\pi t)$ Н, если собственная частота колебаний маятника равна 2 Гц, а силы сопротивления движению отсутствуют. (169 мм)

24. На автомобиль, движущийся по неровной дороге, действует периодическая сила с частотой 3 Гц и максимальным значением 2500 Н, раскаивающая его с амплитудой 6 мм. Определить массу автомобиля, если частота и коэффициент затухания его собственных колебаний равны 1 Гц и $1,5 \text{ c}^{-1}$ соответственно. (1300 кг)

25. Электрический контур состоит из последовательно соединенных конденсатора ёмкостью 250 мкФ, катушки индуктивностью 8 мГн и сопротивления 4 Ом. Каково полное сопротивление этого контура на частоте 1 МГц? (50,27 кОм)

26. Катушка сопротивлением 2 Ом, подключенная к источнику переменного напряжения, имеет полное сопротивление 5 Ом. Найти частоту колебаний напряжения, если индуктивность катушки равна 14,6 мГн. (50 Гц)

27. Найти максимальное значение силы переменного тока, протекающего через сопротивление 10 Ом, если мощность тепловыделения на этом сопротивлении составляет 125 Вт. (5 А)

28. Какой будет разность фаз между напряжением и током, протекающим через катушку сопротивлением 12 Ом и индуктивностью 38 мГн, при подключении ее к источнику переменного напряжения частотой 50 Гц? ($\pi/4$)

29. На пружинный маятник с частотой собственных колебаний 0,5 Гц и коэффициентом затухания $1,5 \text{ c}^{-1}$ действует периодическая вынуждающая сила. Определить частоту силы, при которой колебания маятника будут иметь максимальную амплитуду. (0,37 Гц)

30. Колебательный контур ёмкостью 24 пФ настроен на приём радиостанции, передающей на частоте 106 МГц. Какова индуктивность этого контура? (94 нГн)

ВОЛНЫ

31. Записать уравнение морской волны, скорость распространения которой равна 9 км/ч, расстояние между гребнями 5 м, а высота гребня относительно впадины составляет 80 см.
[$y = 0,4 \cos(3,14t - 1,26x)$ м]

32. Найти длину звуковой волны, излучаемой в воздухе источником с частотой колебаний 8,5 кГц, если скорость распространения звука равна 340 м/с. (4 см)

33. Продольные упругие волны в стали распространяются со скоростью 5060 м/с. Определить модуль Юнга стали. (200 ГПа)

34. Вычислить разность фаз колебаний источника сферической волны и точки, удаленной от него на расстояние 10 м, если ближайшая к источнику точка, колеблющаяся в противофазе с ним, находится на расстоянии 4 м от него. (7,85 рад)

35. Чему равен период колебаний поплавка на поверхности воды, если возбуждаемые им круговые волны распространяются со скоростью 7,2 км/ч, а расстояние между гребнем и впадиной волны равно 50 см? (0,5 с)

36. Найти максимальную напряженность электрического поля сферической электромагнитной волны на расстоянии 4 км от источника, если на расстоянии 2 м от источника она равна 250 В/м. (125 мВ/м)

37. Испускаемый лазером зелёный свет с частотой $0,58 \cdot 10^{15}$ Гц при распространении в стекле имеет длину волны 347 нм. Определить показатель преломления стекла для этого света. (1,49)

38. В некоторой среде свет распространяется со скоростью 360 км/ч. Во сколько раз показатель преломления этой среды больше показателя преломления стекла $n_{\text{стекл}} = 1,5$? ($2 \cdot 10^6$)

39. Какая звуковая энергия содержится в 1 м³ воды, через которую распространяется звук частотой 10 кГц, если при этом максимальное смещение частиц воды из положения равновесия равно 0,01 мм? (197 Дж)

40. Плоская электромагнитная волна излучается лазером в виде узкого пучка света диаметром 1 мм. Определить энергию, проходящую за 1 с через поперечное сечение пучка, если напряженность электрического поля в волне равна 10^7 В/м. (0,7 мДж)

41. Стоячая волна в струне описывается уравнением $y = 5\sin(2\pi x)\sin(\pi t)$ см. Какова при этом максимальная скорость точек струны? (0,16 м/с)

42. Найти длину стоячей волны, образованной при наложении двух ультразвуковых волн частотой 30 кГц, распространяющихся в противоположных направлениях со скоростью 1500 м/с. (25 мм)

43. Вычислить расстояние между точками закрепления струны, если при возбуждении в ней стоячей волны, соответствующей третьей гармонике, расстояние между ближайшими узлом и пучностью равно 15 см. (0,9 м)

44. Определить показатель преломления среды, в которой при наложении двух встречных пучков красного света ($v = 0,44 \cdot 10^{15}$ Гц) образуется стоячая волна с расстоянием между узлами 256 нм. (1,33)

45. Электромагнитная волна при отражении от зеркала образовала стоячую волну, у которой расстояние между седьмым узлом и тридцатой пучностью равно 130 мм. Найти длину исходной волны, падающей на зеркало. (40 мм)

46. Источник звука излучает волны частотой 6 кГц. Как и на сколько изменится воспринимаемая приёмником частота звука, если он будет двигаться навстречу излучателю со скоростью, равной 1/10 от скорости звука? (Увеличится на 600 Гц)

47. Приближающийся автомобиль подает звуковой сигнал частоты 12 кГц. С какой скоростью движется автомобиль, если его сигнал воспринимается неподвижным приёмником как звук частоты 14 кГц? Скорость распространения звука в воздухе принять равной 340 м/с. (175 км/ч)

48. Самолёт удаляется со скоростью 720 км/ч. Во сколько раз отличается частота v звука самолёта, воспринимаемая наблюдателем на земле, от частоты v_0 того же звука для пассажира на борту самолёта? ($v/v_0 = 0,63$)

49. Определить скорость звука в среде, в которой перемещение источника звука навстречу неподвижному приёмнику со скоростью 60 м/с приводит к отличию частот излучаемого и воспринимаемого звука на 5 %. (1260 м/с)

50. Излучатель и приёмник звука движутся в воздухе навстречу друг другу с одинаковой скоростью. Какой по величине должна быть эта скорость, чтобы звук частотой 100 Гц воспринимался как звук частотой 200 Гц? (408 км/ч)

ОПТИКА

51. На стеклянную пластинку нанесён тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления 1,33. Пластинка освещается параллельным пучком монохроматического света с длиной волны 645 нм, который падает на пластинку нормально. Показатель преломления пластинки 1,6. Какой должна быть минимальная толщина слоя, чтобы отражённый пучок света был максимально ослаблен? (0,242 мкм)

52. На тонкую плёнку с показателем преломления 1,47 под углом 30° к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Определить наименьшую толщину плёнки, при которой отражённый от неё свет максимально ослаблен. (0,213 мкм)

53. На мыльную плёнку под углом 60° к ее поверхности падает белый свет. При какой наименьшей толщине плёнки отраженные лучи будут окрашены в жёлтый цвет с длиной волны 580 нм? Показатель преломления мыльной плёнки 1,33. (0,143 мкм)

54. В опыте Юнга на пути одного из интерференционных лучей поместили перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку с показателем преломления 1,5. В результате центральная светлая полоса сместилась в положение, первоначально занимаемое седьмой светлой полосой. Длина световой волны составляет 700 нм. Определить толщину стеклянной пластинки. (9,8 мкм)

55. На стеклянный клин с показателем преломления 1,5 нормально падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 0,55 мм. ($1'$)

56. На стеклянный клин с показателем преломления 1,6 нормально падает монохроматический свет. Угол клина равен $4'$. Определить длину световой волны, если расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами в отраженном свете составляет 0,17 мм. (0,5984 мкм)

57. Пространство между пластинками, образующими клин, заполнено воздухом. На поверхность воздушного клина нормально падает монохроматический свет. Расстояние между интерференционными полосами 0,5 мм. Определить расстояние между интерференционными полосами, если воздух заменить ацетоном с показателем преломления 1,36. (0,37 мм)

58. Под каким минимальным углом должен падать белый свет на поверхность тонкой пластинки толщиной 0,1 мкм, чтобы в отражённом свете он имел синий цвет с длиной волны 4000 Å, если пластинка погружена в газ с показателем преломления 1,002? Показатель преломления пластинки 1,12. (30°)

59. На пути одного из лучей в опыте Юнга поставили трубку длиной 2 см с плоскопараллельными стеклянными стенками, заполненную хлором. В результате вся интерференционная картина сместились на 20 полос. Определить показатель преломления хлора, если длина световой волны 600 нм, а показатель преломления воздуха — 1,000276. (1,0006)

60. На стеклянную пластинку выпуклой стороной положили плоско-выпуклую линзу. На линзу нормально к её поверхности падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 5500 Å. Радиус пятого тёмного кольца Ньютона в отраженном свете составляет 8,2 мм. Определить радиус кривизны линзы. (12 м)

61. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 0,585 мкм, который падает нормально к плоской поверхности линзы. Пространство между линзой и пластинкой заполнено соляной кислотой с показателем преломления 1,254. Определить толщину слоя соляной кислоты между линзой и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается шестое тёмное кольцо в отраженном свете. Показатель преломления стекла 1,6. (1,399 мкм)

62. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 0,65 мкм, который падает нормально к плоской поверхности линзы. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой. Определить толщину слоя воды между линзой и пластинкой в том месте, где наблюдается четвертое светлое кольцо в отражённом свете. (0,977 мкм)

63. Как изменится радиус третьего тёмного кольца Ньютона в отражённом свете, если пространство между линзой и пластинкой вместо толуола (показатель преломления 1,497) заменить спиртом (показатель преломления 1,33)? Показатель преломления линзы и пластинки одинаков и равен 1,5. (1,06)

64. Расстояние между диафрагмой с отверстием и точкой наблюдения на экране равно 1 м. На отверстие падает свет с длиной волны $6 \cdot 10^{-7}$ м. Определить радиус шестой зоны Френеля, если: а) источник света точечный и расстояние от него до отверстия составляет 0,7 м; б) волновой фронт плоский, свет падает нормально. ($a - 1,217$ мм; $b - 1,897$ мм)

65. Экран размещается на расстоянии 30 м от точечного источника света с длиной волны $5 \cdot 10^{-7}$ м. На расстоянии 20 м от источника света размещается диафрагма с отверстием. Определить: а) радиус отверстия, при котором центр дифракционной картины на экране будет наиболее тёмным; б) наиболее светлым. [а] 2,582 мм; б) 1,826 мм]

66. Точечный источник света с длиной волны 540 нм размещается на расстоянии 11 м от экрана. Между источником света и экраном на расстоянии 6 м от экрана размещена диафрагма с отверстием, диаметр которого равен 4,2 мм. Как изменится освещённость в центре дифракционной картины, если диафрагму с отверстием убрать? (Освещённость уменьшится)

67. Сферическая волна, распространяясь от точечного монохроматического источника света с длиной волны 0,5 мкм, падает на диафрагму с круглым отверстием диаметром 1 мм. Расстояние от источника до отверстия 1 м. Определить расстояние от отверстия до точки экрана, где наблюдается максимум освещённости. (1 м)

68. На экран с круглым отверстием радиусом 1,5 мм нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 0,550 мкм. Определить максимальное расстояние от отверстия до экрана, где еще можно наблюдать наиболее тёмное пятно. (2 м)

69. На экран с круглым отверстием радиусом 1,2 мм нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм. Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии 1,6 м от него. Определить: а) число зон Френеля, укладывающихся в отверстии; б) тёмное или светлое пятно наблюдается в центре дифракционной картины, если в месте наблюдения помещен экран. [а] 2; б) тёмное пятно]

70. На узкую щель шириной 0,07 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 690 нм. Определить направление света на первый дифракционный максимум. ($51'$)

71. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Его направление на третью тёмную дифракционную полосу составляет 2° . Определить, сколько длин волн укладывается по ширине щели. (85λ)

72. Каково наибольшее значение номера дифракционного максимума, соответствующего длине световой волны 590 нм при нормальном падении света на щель шириной 2 мкм? Сколько всего максимумов наблюдается? (3; 7)

73. На узкую щель нормально падает монохроматический свет. Угол дифракции максимума второго порядка равен 1° . Сколько длин волн падающего света укладывается по ширине щели? (143 нм)

74. Определить число штрихов на 1мм дифракционной решётки, если углу дифракции 25° соответствует максимум третьего порядка для монохроматического света с длиной волны $0,55 \text{ мкм}$. (256 мкм^{-1})

75. Период дифракционной решётки в три раза больше длины световой волны монохроматического света, падающего перпендикулярно ее поверхности. Определить угол между направлениями наблюдения двух максимумов первого порядка. ($38^\circ 56'$)

76. Дифракционная решётка имеет 3000 штрихов на ширину $1,5 \text{ см}$. На поверхность решётки нормально падает пучок света от лазера с длиной волны $0,6943 \text{ мкм}$, активным элементом, которым является рубин. Определить: направление максимума в спектре второго порядка; сколько всего максимумов дает данная дифракционная решётка? ($16^\circ; 15^\circ$)

77. Монохроматический свет падает перпендикулярно на дифракционную решётку, которая имеет 100 штрихов на 1 мм . Угол между направлениями наблюдения максимумов второго порядка составляет 16° . Определить длину световой волны, падающей на решётку. ($0,695 \text{ мкм}$)

78. На плоскую дифракционную решётку, имеющую 2000 штрихов на 1 см длины, нормально к её плоскости падает пучок света от ртутной лампы. Определить: период дифракционной решётки; под каким минимальным углом к направлению первоначального пучка совпадают максимумы двух линий спектра ртути с длинами волн $0,610 \text{ мкм}$ и $0,405 \text{ мкм}$. ($5 \cdot 10^{-6} \text{ м}; 14^\circ 07'$)

79. На плоскую дифракционную решётку падает нормально пучок монохроматического света с длиной волны $0,58 \text{ мкм}$. Под какими углами к первоначальному направлению лучей будут видны дифракционные максимумы второго и третьего порядков, если решётка имеет 500 штрихов на 1 см^2 ? ($4^\circ 19'; 4^\circ 59'$)

80. Период дифракционной решётки равен 2 мкм . Определить угловую дисперсию решётки для длины световой волны 6100 Å в спектре первого порядка. ($0,53 \cdot 10^6 \text{ рад/м}$)

81. Угловая дисперсия дифракционной решётки для длины волны 660 нм в спектре первого порядка равна $2 \cdot 10^6 \text{ рад/м}$. Определить период решётки. ($5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$)

82. Сравнить наибольшую разрешающую способность для красной линии кадмия с длиной волны 645 нм двух дифракционных решёток с одинаковой длиной 5 мм, но разными периодами — 4 и 8 мкм. ($R_{1\max} = R_{2\max} = 7500$)

83. На грань кристалла с расстоянием между его атомными плоскостями 0,35 нм падает узкий параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения. Определить длину волны рентгеновского излучения, если под углом 30° к плоскости грани наблюдается дифракционный максимум первого порядка. (0,35 нм)

84. Монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны 0,0712 нм отражается от грани кристалла NaCl. Дифракционный максимум первого порядка наблюдается при угле скольжения $7^\circ 18'$. Какой должна быть длина волны излучения, чтобы максимум третьего порядка наблюдался под тем же углом? Определить расстояние между плоскостями кристаллической решётки NaCl. (0,0237 нм; 0,28009 нм)

85. Монохроматическое рентгеновское излучение отражается от грани некоего кристалла. Дифракционный максимум первого порядка наблюдается при угле θ_1 . Каким будет угол скольжения луча θ_2 для этого же максимума, если данный кристалл заменить на кристалл NaCl, расстояние между атомными плоскостями которого в 0,25 раза больше? (Увеличится в 4 раза)

86. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 60° . Определить изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями

$$\text{равен } 45^\circ. \left(\frac{I_1}{I_2} = 0,5 \right)$$

87. Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 4 раза. Определить угол между главными плоскостями николей. Поглощением света пренебречь. (45°)

88. Два николя расположены так, что угол между их главными плоскостями составляет 30° . В каждом из николей теряется 4 % интенсивности падающего на него света. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через два николя?

$$\left(\frac{I_0}{I_2} = 2,89 \right)$$

89. Пучок света последовательно проходит через два николя. Площади пропускания николей образуют между собой угол 50° . Коэффициент поглощения каждого николя составляет 0,15. Опре-

делить, во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николь.

$$\left(\frac{I_a}{I_0} = 0,15 \right)$$

90. Угол между плоскостями пропускания поляроидов составляет 60° . Естественный свет, проходя через эту систему, ослабляется в 5 раз. Определить коэффициент поглощения света в поляридах. (0,26)

91. Пучок естественного света падает на поверхность стеклянной пластинки под углом 60° . Определить показатель преломления стекла, если отражённый луч является полностью поляризованным. (1,73)

92. Определить, под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы лучи, отражённые от поверхности воды, были полностью поляризованы. Показатель преломления воды 1,33. ($36^\circ 56'$)

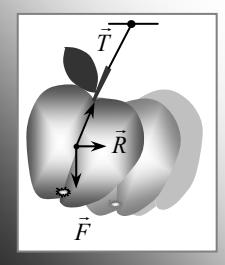
93. Свет, проходя через жидкость, налитую в стеклянный сосуд, падает на дно сосуда под углом 42° . При этом отражённый луч полностью поляризован. Определить показатель преломления жидкости. Показатель преломления стекла 1,5. (1,67)

94. Пучок света, проходя через стеклянный сосуд с водой, отражается от его дна. Под каким углом должен падать на поверхность воды отражённый от дна пучок света, чтобы он был максимально поляризованный? Показатель преломления стекла 1,5; показатель преломления воды 1,33. (84°)

95. Угол Солнца к горизонту составляет 37° . Отражённые от поверхности озера солнечные лучи максимально поляризованы. Определить показатель преломления воды в озере. (1,327)

96. Плоскополяризованный свет, длина волны которого в вакууме 590 нм, падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно его оптической оси. Показатель преломления исландского шпата для обыкновенного луча 1,66; показатель преломления для необыкновенного луча 1,49. Определить длину волны обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле. (355 нм; 396 нм)

97. Плоскополяризованный свет, длина волны которого в вакууме составляет 540 нм, падает на пластинку из кварца перпендикулярно её оптической оси. Определить показатели преломления кварца для обыкновенного и необыкновенного лучей, если длины волн этих лучей в кристалле соответственно равны 345 и 340 нм. (1,57; 1,59)



ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа 3—1



Интерференция света. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

Цель работы:

- ✓ изучить явление интерференции, определить радиус кривизны линзы измерением диаметров колец Ньютона.

Приборы и материалы:

- ✓ плоскопараллельная пластинка и плоско-выпуклая линза в обойме, ртутная лампа, микроскоп.

Метод и экспериментальная установка

Схема установки для определения радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона приведена на рис. 1.1.

Когерентные волны образуются при отражении светового потока от верхней и нижней поверхностей тонкой прозрачной пленки. Прозрачная пленка переменной толщины получена с помощью плоско-выпуклой линзы L и плоскопараллельной пластинки P . Параллельный пучок света от источника света S проходит через линзу L_1 , светофильтр K и полупрозрачную пластинку M . Одна часть монохроматического светового потока попадает в окуляр микроскопа D , вторая — нормально падает на систему линза L — пластина P (рис. 1.2) и отражается в точках A — от нижней сферической поверхности линзы на границе раздела стекло—воздух, и B — от верхней поверхности пластины.

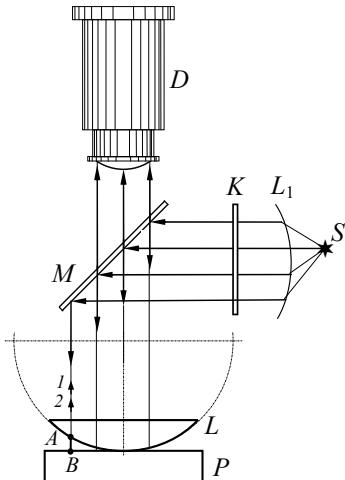


Рис. 1.1

Оптическая разность хода лучей I и 2 :

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}.$$

Если угол падения α света на поверхность линзы равен нулю, а показатель преломления n воздуха между линзой и пластинкой равен единице, тогда получим:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}.$$

Нужно прибавить $\frac{\lambda}{2}$, так как в точке B луч отражается от оптически более плотной среды (стекла).

В точках, для которых $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$, то есть выполняется условие максимума интерференции света, можно записать

$$2d + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2}. \quad (1.1)$$

В точках, для которых $\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, то есть выполняется условие минимума интерференции света, можно записать

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}. \quad (1.2)$$

Образовавшаяся интерференционная картина имеет вид концентрических тёмных и светлых колец, так как геометрическое место точек, для которых $d = \text{const}$, представляет собой окружность.

Величину d можно выразить через радиус кривизны линзы R и радиус тёмного или светлого кольца Ньютона r . Из прямоугольного треугольника ОАС имеем (рис. 1.2):

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2.$$

Так как $R \gg d$, то величиной d^2 можно пренебречь. Тогда получим:

$$r^2 = 2Rd. \quad (1.3)$$

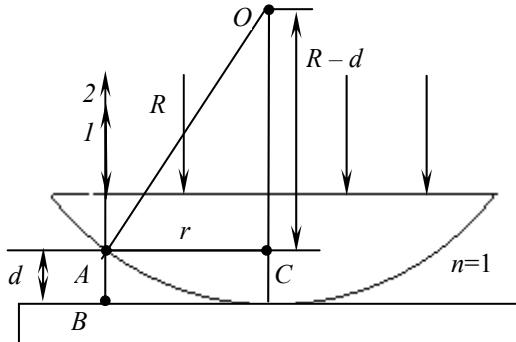


Рис. 1.2

Подставив d из выражения (1.1) в уравнение (1.3), найдём значение радиуса светлого кольца:

$$r_{\text{св}} = \sqrt{R(2k-1)\frac{\lambda}{2}}. \quad (1.4)$$

Значение радиуса тёмного кольца находим из выражений (1.2) и (1.4):

$$r_t = \sqrt{Rk\lambda}, \quad (1.5)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ — номер кольца.

Измерив радиусы тёмных и светлых колец, можно определить радиус кривизны линзы R , если известна длина волны монохроматического света λ , или определить λ , если задан радиус кривизны линзы R , или определить показатель преломления n вещества, которое находится между линзой и пластинкой.

Достичь идеального соприкосновения линзы и пластинки и получить в центре интерференционной картины тёмную точку очень трудно. Поэтому целесообразно измерять не радиусы колец, а их диаметры. Для разности диаметров двух колец — светлых [см. формулу (1.4)] или тёмных [см. формулу (1.5)] — получим уравнение:

$$\left(\frac{D_k}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 = (k-i)R\lambda, \quad (1.6)$$

где k и i — порядковые номера интерференционных колец.

Тогда радиус кривизны линзы определяется по формуле:

$$R = \frac{(D_k^2 - D_i^2)}{4(k-i)\lambda}. \quad (1.7)$$

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Измерение диаметров колец Ньютона.

1. Поместить на столик микроскопа под объектив металлическую обойму с линзой и плоскопараллельной пластинкой. За микроскопом разместить осветитель (ртутную лампу) с жёлтым светофильтром $\lambda = (5770 \pm 0,5)$ Å.

2. Направить свет лампы с помощью отражательной пластины на поверхность линзы. Поворотом пластины и перемещением лампы добиться равномерного освещения поля зрения. Наблюдая в окуляр, перемещением обоймы с линзой найти изображение интерференционной картины в виде концентрических тёмных и светлых колец.

3. Для измерения диаметра колец с помощью микрометрического винта навести визирную черту окуляра микроскопа на середину шестого тёмного кольца. Записать отсчёт. Вращая барабан, навести визирную черту на пятое, четвёртое, третье, второе и первое кольца (рис. 1.3) и записать отсчёты.

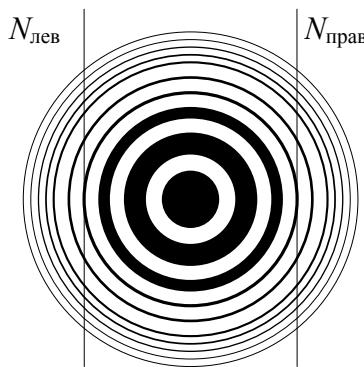


Рис. 1.3

Пройдя центральное пятно, и далее производя отсёты в том же направлении, дойти до шестого тёмного кольца справа. Чтобы избежать погрешности мёртвого хода винта, наведение визирной черты производить только с одной стороны. Измерения выполнить три раза. Отсёты записать в табл. 1.1. Диаметр кольца определяется как разность правого и левого отсётов для данного кольца.

4. Рассчитать диаметры всех колец и записать результаты в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номер кольца, k	Левый отсчёт, мм	Правый отсчёт, мм	Диаметр кольца D , мм	Среднее значение диаметра кольца D_{ch} , мм	D_{cp}^2 , мм ²	ΔD_k , мм	$\varepsilon, \%$

5. Определить погрешность измерений диаметров колец Ньютона.

Задание 2. Определение радиуса кривизны линзы.

1. Используя полученные данные и комбинируя попарно 6 и 4, 5 и 3, 4 и 2, 3 и 1 кольца, по формуле (1.7) вычислить четыре значения радиуса кривизны линзы. Результаты записать в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Радиус кривизны линзы R_i , м	Среднее значение радиуса кривизны линзы R_{ch} , м	Абсолютная погрешность ΔR , м	Относительная погрешность $\varepsilon, \%$

2. Определить погрешность измерений радиуса кривизны линзы R .

Задание 3. Вычисление толщины воздушного зазора между линзой и стеклянной пластинкой.

1. Используя данные табл. 1.1 и 1.2, вычислить толщину воздушного зазора между линзой и стеклянной пластинкой для шести колец по формуле:

$$d_k = \frac{D_k^2}{8R_{\text{cp}}}.$$

2. Для каждого значения d_k вычислить значение количества полуволн m_k по формуле:

$$m_k = \frac{2d_k}{\lambda}.$$

3. Результаты записать в табл. 1.3.

GТаблица 1.3

Номер кольца k	Среднее значение радиуса кривизны линзы R_{cp} , м	Толщина воздушного слоя d_k , м	Количество полуволн m_k

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. В чём состоит явление интерференции света? Какое условие наблюдения интерференции света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Выведите условие минимума и максимума при интерференции.
4. Что такое оптическая разность хода, разность фаз? Какая между ними связь?
5. Как получают когерентные волны в этой лабораторной работе?
6. Выведите формулы для определения радиусов светлых и тёмных колец.
7. Почему в данной лабораторной работе интерференционная картина имеет вид колец?
8. Почему в центре интерференционной картины наблюдается именно тёмное пятно?
9. Как можно получить вместо тёмного пятна в центре интерференционной картины светлое пятно?
10. Кольца Ньютона — это полосы равного наклона или равной толщины?
11. Как получаются полосы равного наклона?
12. Как получаются полосы равной толщины?
13. Приведите примеры практического применения явления интерференции света.

Лабораторная работа 3—2



Изучение явления дифракции света с помощью дифракционной решётки

Цель работы:

- ✓ определить постоянную дифракционной решётки и разрешающую способность с помощью экрана с миллиметровой шкалой.

Приборы и материалы:

- ✓ лазер, дифракционная решётка, экран с миллиметровой шкалой, оптическая скамья.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Определение постоянной дифракционной решётки.

1. На оптической скамье установить лазер, дифракционную решётку, экран с миллиметровой шкалой. Включить лазер.

2. Направить излучение лазера на дифракционную решётку и получить на экране дифракционную картину.

3. На экране произвести отсчёты по миллиметровой шкале, которые соответствуют первому максимуму справа и слева от нулевого максимума. Результаты записать в табл. 2.1.

4. Аналогично измерить на экране по миллиметровой шкале отсчёты, которые соответствуют второму и третьему максимумам справа и слева от нулевого максимума. Результаты записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Порядок максимума k	Левый отсчёт	Правый отсчёт	$X_{k \text{ cp}}$, мм	Среднее значение $X_{k \text{ cp}}$, мм	Расстояние до экрана L , м	Постоянная дифракционной решётки, м			
						d	d_{cp}	Δd	$\varepsilon, \%$

5. Расстояние между дифракционными максимумами определяются как $HFPYJCNM$ правого и левого отсчётов соответственно для каждого порядка.

6. Измерения выполнить три раза.
7. Измерить расстояние l от дифракционной решётки до экрана.
8. Постоянная дифракционной решётки определяется по формуле:

$$d = \frac{2kL\lambda}{x_k}.$$

9. Определить погрешность измерений постоянной дифракционной решётки. Результаты записать в табл. 2.1.

Задание 2. Определение разрешающей способности дифракционной решётки.

1. Измерить линейкой ширину дифракционной решётки l .
2. Вычислить разрешающую способность дифракционной решётки для трёх порядков по формуле:

$$R = k \frac{l}{d}.$$

Результат записать в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Порядок спектра k	Ширина дифракционной решётки l , м	Постоянная дифракционной решётки d_{cp} , м	Разрешающая способность дифракционной решётки R

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Что называется дифракцией света?
2. Чем отличаются условия наблюдения дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера?
3. В чём состоит принцип Гюйгенса–Френеля?
4. В чём состоит метод зон Френеля?
5. Примените метод зон Френеля для распространения света в однородной изотропной среде.
6. Примените метод зон Френеля для дифракции на круглом отверстии и непрозрачном диске.
7. Выведите формулу условия максимума и минимума для дифракции на щели.
8. Как изготавляются дифракционные решётки? Выведите формулу дифракционной решётки.
9. Что называется дисперсией дифракционной решётки и от чего она зависит? Выведите формулу.
10. Что называется разрешающей способностью дифракционной решётки и от чего она зависит? Выведите формулу.
11. Определите максимальный порядок главного максимума (теоретически), если $d = 0,01$ мм, $\lambda = 5000$ Å.
12. Каково применение дифракционной решётки?
13. Как с помощью дифракции изучается структура кристаллических тел?
14. Как изменяется угловая дисперсия и разрешающая способность, если решётку с $d = 0,01$ мм заменить решёткой с $d = 0,001$ мм?
15. Зарисуйте дифракционный спектр белого света.

Лабораторная работа 3—3



Изучение явления поляризации света

Цель работы:

- ✓ изучить метод получения и наблюдения плоскополяризованного света с помощью поляроидов; провести проверку закона Малюса; наблюдать двойное лучепреломление.

Приборы и материалы:

- ✓ оптическая скамья, два поляроида, лазер, фотоэлемент, линза, кристалл исландского шпата, лампа накаливания.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Анализ поляризованного света.

1. На оптической скамье установить на одном уровне лазер, поляризатор, анализатор и экран. Вращая анализатор, наблюдать на экране изменение интенсивности поляризованного света, который прошёл через поляризатор и анализатор.

2. Установить на оптической скамье вместо экрана фотоэлемент. На панели прибора Щ-4316 нажать кнопку «Вкл.».

3. Вращая анализатор от 0 до 360° , через каждые 10° записывать показания прибора Щ-4316 в табл. 3.1.

4. Построить зависимость $I = f(\phi)$ в полярных координатах.

Таблица 3.1

Угол поворота анализатора ϕ , град	Показания Щ-4316, А	$\cos \phi$	$\cos^2 \phi$
0			
10			
...			
360			

Задание 2. Проверка закона Малюса.

1. По данным табл. 3.1 определить от 0 до 90° значение $\cos \varphi$ и $\cos^2 \varphi$.

2. Построить график зависимости $I = f(\cos^2 \varphi)$ для углов в интервале от 0 до 90° . Эта зависимость соответственно закону Малюса должна быть линейной.

Задание 3. Наблюдение двойного лучепреломления.

1. На оптической скамье установить: лазер, линзу и экран. Перемещая линзу, добиться чёткого изображения пятна лазерного луча на экране. Между линзой и лазером поместить кристалл исландского шпата так, чтобы луч света прошёл через кристалл. Изображение пятна на экране должно раздвоиться.

2. Поместить перед экраном анализатор. Вращая анализатор, наблюдать поочерёдно гашение то одного, то другого изображения пятна. Записать положение показателя (стрелки) анализатора при исчезновении первого изображения, а потом второго. Определить угол между этими положениями. Это есть угол между плоскостями колебаний вектора \vec{E} в обыкновенном и необыкновенном лучах.

**Вопросы и задания для допуска и защиты
лабораторной работы и микромодульного контроля**

1. Чем отличается плоскополяризованный свет от неполяризованного света?
2. Какие типы поляризованного света вы знаете?
3. Назовите способы получения поляризованного света.
4. Что такое поляризатор и анализатор?
5. Каково устройство поляроида?
6. В чём суть закона Малюса? Начертите векторную диаграмму и выведите формулу.
7. Как отличить естественный свет от поляризованного света?

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа 3—1В

Изучение свободных колебаний

Цель работы:

- ✓ изучить свободные колебания гармонического осциллятора на различных физических моделях.

1. Методика выполнения работы

Физическими моделями гармонического осциллятора в работе являются компьютерные модели груза на пружине, маятнике и колебательном контуре.

1.1. Пружинный маятник (рис. 1.1).

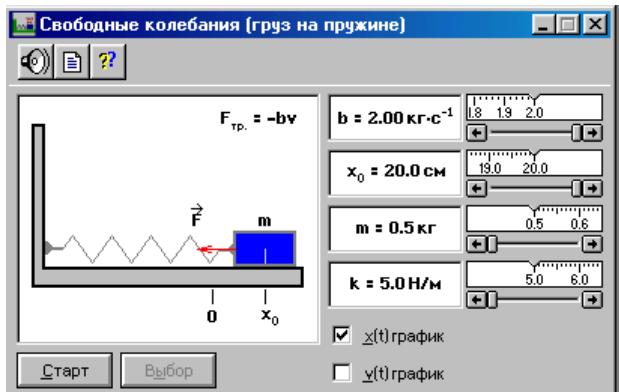


Рис. 1.1

Груз массой m , закреплённый на пружине с жёсткостью k , движется в среде с коэффициентом сопротивления b . Эта система имеет одну поступательную степень свободы, которую обозначим осью x . Дифференциальное уравнение колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0 x = 0.$$

Его решение при начальном отклонении от положения равновесия x_0 будет:

$$x = x_0 e^{-\beta t} \cos \omega_0 t ,$$

где $\beta = \frac{b}{2m}$ и $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Колебания совершаются за счет обмена потенциальной энергией упругой деформации и кинетической энергией груза. При этом часть энергии необратимо расходуется на работу против сил сопротивления.

1.2. Маятник (рис. 1.2) — груз массой m подвешен на невесомой, нерастяжимой нити длиною l . Груз движется в среде с коэффициентом сопротивления b . Размеры груза значительно меньше длины подвеса.

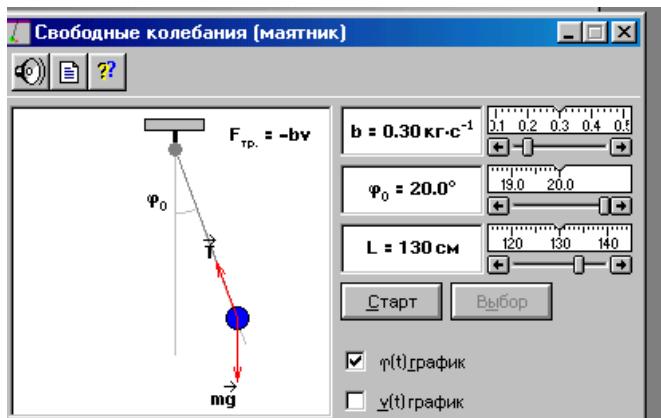


Рис. 1.2

Эта система имеет одну вращательную степень свободы ϕ . Дифференциальное уравнение колебаний при небольших ϕ :

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\phi}{dt} + \omega_0^2 \phi = 0 .$$

Его решение при $\phi_0 \leq 15^\circ$ будет гармонической функцией времени:

$$\phi = \phi_0 e^{-\beta t} \cos \omega t ,$$

$$\text{где } \beta = \frac{b}{2m} \text{ и } \omega_0 = \sqrt{\frac{\zeta}{l}}.$$

Колебания совершаются за счёт обмена потенциальной энергией груза в поле тяготения и кинетической энергией его движения. При этом часть энергии необратимо расходуется на работу против силы сопротивления.

1.3. Колебательный контур (рис. 1.3).

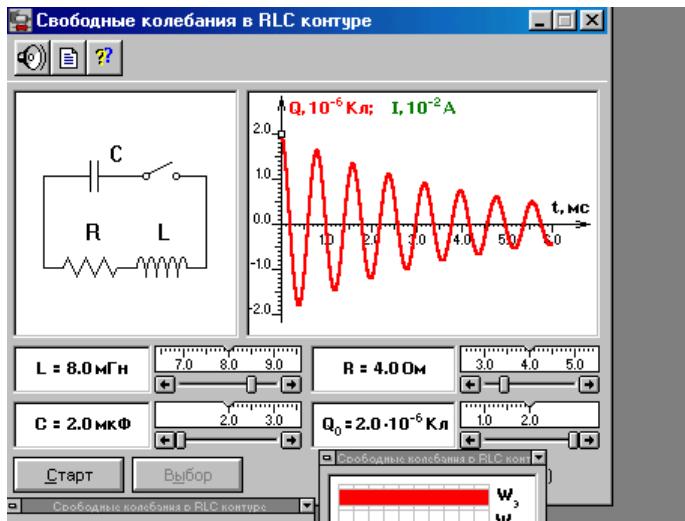


Рис. 1.3

Колебательный контур — это электрическая цепь, состоящая из конденсатора C , катушки индуктивности L и сопротивления R .

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение заряда на обкладках конденсатора от времени, если систему вывести из положения равновесия, зарядив конденсатор зарядом q_0 :

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0 q = 0,$$

$$\text{где } \beta = \frac{R}{2L} \text{ и } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Колебания происходят за счёт обмена энергией электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки. При этом часть энергии превращается в джоулево тепло на сопротивлении R .

2. Задания к работе

- 2.1. Изучить колебания грузка на пружине. Рассчитать все характеристики колебаний.
- 2.2. Изучить колебания маятника. Измерить и определить все характеристики системы.
- 2.3. Изучить колебания в электрической цепи. Измерить и рассчитать характеристики системы.

3. Порядок выполнения

- 3.1. Установить выбранную модель.
- 3.2. Параметры системы установить так, чтобы до затухания система совершила не менее 5—7 полных колебаний.
- 3.3. Зарисовать графики колебаний и скорости.
- 3.4. Останавливая колебания через период, измерить амплитуды четырёх первых колебаний.
- 3.5. Результаты измерений свести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

i	A_i	t_i	$\frac{A_i}{A_{i+1}}$	$\ln \frac{A_i}{A_{i+1}}$	T_i	$T_{\text{ср}}$	ΔT	$\delta_{\text{ср}}$	$\Delta \vartheta$	β
1										
2										
3										
4										
5										

3.6. Подобрать параметры системы таким образом, чтобы получить апериодический процесс. Зарисовать график этого процесса.

3.7. Выбрать другую модель, повторить все измерения.

4. Обработка результатов измерений

По результатам измерений рассчитать период колебаний $T_i = t_{i+1} - t_i$, логарифмический декремент затухания и коэффициент затухания. Результаты расчётов внести в табл. 1.1.

Рассчитать собственную частоту системы по измеренному периоду и β системы, сравнить с теоретическим значением для используемой модели.

5. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Дайте определение понятия «гармонический осциллятор».
2. Выведите дифференциальное уравнение свободных колебаний гармонического осциллятора и запишите его решение.
3. Охарактеризуйте параметры системы и характеристики колебаний.
4. Что такое апериодический процесс?
5. Что такое циклическая частота колебаний?
6. Что такое собственная частота системы?
7. Что такое коэффициент затухания?
8. Что такое декремент затухания?
9. Логарифмический декремент затухания.
10. Фаза колебаний.
11. Начальная фаза колебаний.

Лабораторная работа 3—2В



Изучение вынужденных колебаний

Цель работы:

- ✓ изучить вынужденные колебания механической системы и колебания в RLC-контуре.

1. Методика выполнения работы

Компьютерный эксперимент позволяет изменять параметры системы и выдает состояние системы в установившемся режиме, выдает АЧХ системы и обозначает на ней текущий режим.

Изменением вынужденной частоты устанавливают различные режимы работы.

2. Задание к работе

- 2.1. Снять амплитудно-частотную характеристику системы.
- 2.2. Определить добротность и полосу пропускания системы.

3. Порядок выполнения

3.1. Выбрать модель системы. Для этого в меню «Содержания» в разделе «Механические колебания и волны» подвести курсор к модели «Вынужденные колебания» и два раза щелкнуть клавишей «мыши» (рис. 2.1).

Для изучения электрических колебаний в разделе «Электричество и магнетизм» найти модель «Вынужденные колебания в RLC-контуре» (рис. 2.2).

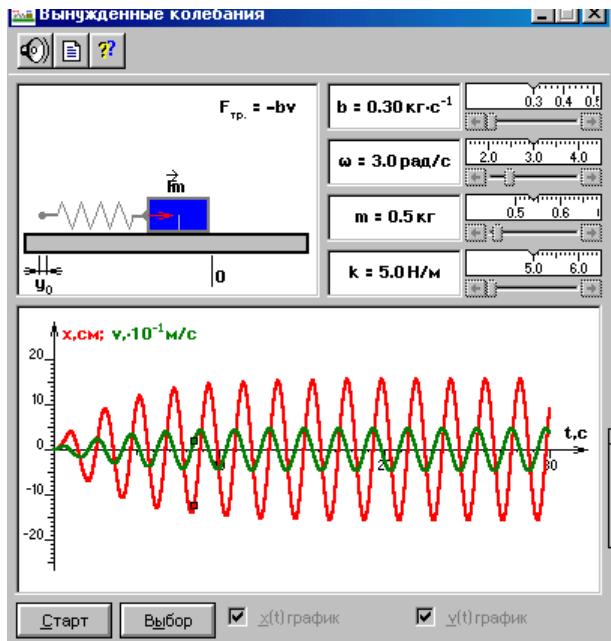


Рис. 2.1

3.2. В соответствии с номером рабочего места установить параметры системы по табл. 2.1.

3.3. Установить минимальное значение круговой частоты вынужденных колебаний.

3.4. Записать 10—15 точек амплитудно-частотной характеристики системы, меняя частоту вынужденных колебаний. В области резонанса точки нужно снимать чаще, результаты занести в табл. 2.2.

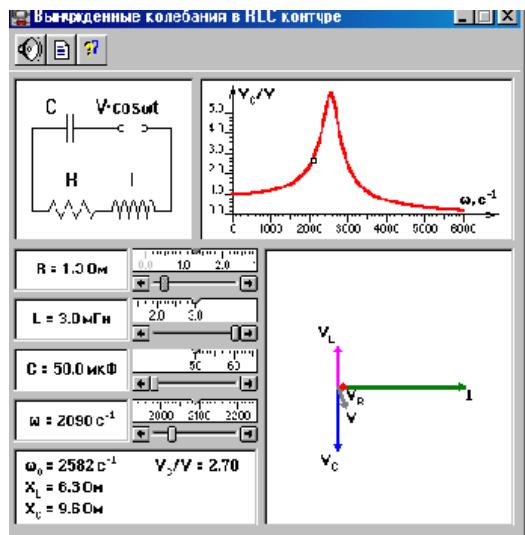


Рис. 2.2

Таблица 2.1

Модель		Номер рабочего места								
		1,12		2,8	3,7	4,9	6,10	5,11	13	14
Параметры системы	Механические	b , кг·с ⁻¹	0,3	0,32	0,34	0,76	0,38	0,40	0,42	0,44
		m , кг	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
		K , Н/м	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7
	RLC-контур	R , Ом	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
		L , мГн	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
		C , мкФ	50	51	52	53	54	55	56	57

ВНИМАНИЕ! При установке массы цифра в окошке указывает величины кратные 0,1 кг. Поэтому отсчёт массы нужно производить по шкале.

Таблица 2.2

Номер измерения i		1	2	20
Относительная амплитуда	$\frac{A_i}{A_0}$				
Вынужденная частота					

3.5. Определить резонансную частоту системы $\omega_{\text{рез}}$ и амплитуду колебаний $A_{\text{рез}}$.

3.6. Вызвать калькулятор и рассчитать значение амплитуды, соответствующей границам пропускания $A_{\text{гр}}$.

3.7. Изменяя вынужденную частоту, установить найденное значение амплитуды справа и слева от резонанса и записать граничные частоты в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$\omega_{\text{рез}}$	$A_{\text{рез}}$	$A_{\text{гр}}$	$\omega_{\text{гр.прав}}$	$\omega_{\text{гр.лев}}$	$\Delta\omega$	S

4. Обработка результатов измерений

4.1. По результатам измерений табл. 2.2 рассчитать и построить безразмерную амплитудно-частотную характеристику.

4.2. Используя условия резонанса, рассчитать безразмерное затухание.

4.3. Построить фазочастотную характеристику системы.

4.4. По результатам табл. 2.3 рассчитать добротность системы и полосу пропускания.

5. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Вывести дифференциальное уравнение вынужденных колебаний гармонического осциллятора.
2. Вывести дифференциальное уравнение собственных колебаний гармонического осциллятора.
3. Записать решение дифференциального уравнения колебаний гармонического осциллятора для вынужденных колебаний.
4. Записать решение дифференциального уравнения колебаний гармонического осциллятора для собственных незатухающих колебаний.
5. Записать решение дифференциального уравнения колебаний гармонического осциллятора для собственных затухающих колебаний.
6. Что такое апериодический процесс?
7. Что такое собственная частота системы?
8. Что такое частота затухающих колебаний?
9. Что такое коэффициент затухания?
10. Что такое декремент и логарифмический декремент затухания?
11. Что такое добротность системы?
12. Что такое полоса пропускания?
13. Что такое амплитудно-частотная характеристика колебательной системы?
14. Что такое фазочастотная характеристики системы?

Лабораторная работа 3—3B



Изучение свойств стоячей волны, образованной в струне

Цель работы:

✓ изучить явление интерференции упругих волн.

1. Методика выполнения работы

Компьютерный эксперимент моделирует образование волн в струне и позволяет менять параметры струны, натяжение струны и её частоту. Номер гармоники определяется по количеству пучностей или узлов, расположенных на длине струны. Длина бегущей волны рассчитывается по известной длине струны.

Скорость распространения её в струне находится по заданным значениям T , μ .

Период колебания волны t_b определяют по формуле $t_b = f^{-1}$.

2. Задания к работе

2.1. Выучить условия образования стоячей упругой волны.

2.2. Определить скорость распространения упругой волны в струне.

2.3. Изучить влияние натяжения струны на скорость распространения волн.

3. Порядок выполнения

3.1. В разделе «Механические колебания и волны» выбрать модель «Нормальные моды струны» (рис. 3.1).

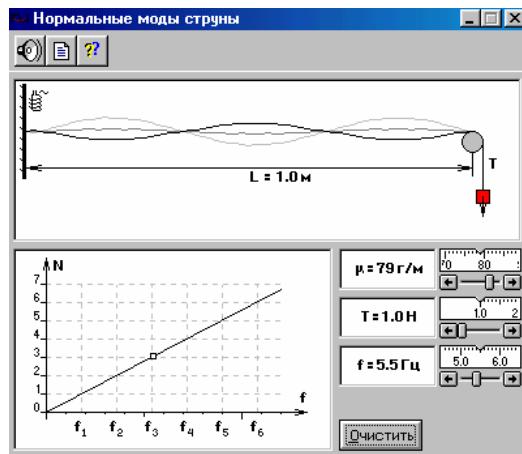


Рис. 3.1

3.2. Соответственно номеру рабочего места установить параметры эксперимента (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Параметр	Номер места						
	1,8	2,13	3,12	4,11	5,10	6,9	7,14
μ , г/м	100	90	80	100	90	80	100
T , Н	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	3,0

3.3. Изменяя частоту бегущей волны, определить все гармоники. Результаты записать в табл. 3.2. Точность настройки контролировать по графику $N = N(f)$ на экране.

Таблица 3.2

N_i	f_i , Гц	λ_i , м	$t_{\text{в}}$, с	v_i , м/с	$v_{\text{ср}}$, м/с	$\lambda_{\text{ср}}$, м	Δv , м/с	$\Delta \lambda$, м
1								
.....								
n								

3.4. Уменьшить погонную массу в 2 раза. Повторить измерения и внести результаты в табл. 3.3.

3.5. Изменяя натяжение струны через 1 Н, найти основную частоту и внести её в табл. 3.3.

Таблица 3.3

μ , г/м	T_i , Н	f_i , Гц	$t_{\text{в}}$, с	v_i , м/с	$\sqrt{T_i}$, Н ^{0.5}
$\mu =$	1				
	...				
	5				
$\mu =$	1				
	...				
	5				

4. Обработка результатов измерения

4.1. Рассчитать характеристики бегущей волны и условия образования стоячей волны.

4.1.1. Для каждой гармоники, используя данные табл. 3.2, рассчитать длину бегущей волны λ_i по числу узлов и длине струны:

$\lambda_i = 2L/n_i$, период колебаний $t_{\text{в}} = f_i^{-1}$, скорость бегущей волны $v_i = \lambda_i/t_{\text{в}}$.

4.1.2. Рассчитать погрешности измерений v и λ .

4.2. Изучить влияние натяжения струны на скорость распространения волны.

4.2.1. Рассчитать, используя данные табл. 3.3, период колебаний и скорость распространения волны на основной частоте для разных значений силы натяжения струны.

4.2.2. Построить график зависимости $v = v(\sqrt{T})$ для двух масс струны.

5. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Что такое бегущая волна?
2. Записать уравнение плоской бегущей волны.
3. Что такое стоячая волна и чем она отличается от бегущей волны?
4. Записать условие образования стоячих волн.
5. Что такое гармоники?
6. Как рассчитать скорость волны?
7. Как зависит скорость волны от параметров струны и начальных условий?
8. Что такое фазовая скорость волны?
9. Что такое групповая скорость волны?
10. Что такое нормальная дисперсия волн?
11. Что такое аномальная дисперсия волн?
12. Объяснить поведение гармонической волны в зоне дисперсии.

Лабораторная работа 3—4В



Изучение явления интерференции света с помощью колец Ньютона

Цель работы:

- ✓ изучить явление интерференции, изучить интерференционную картину колец Ньютона.

1. Методика выполнения работы

Лабораторная работа выполняется с помощью моделирования физических процессов компьютером при использовании программы «Открытая физика».

Вид окна этой программы изображен на рис. 4.1.

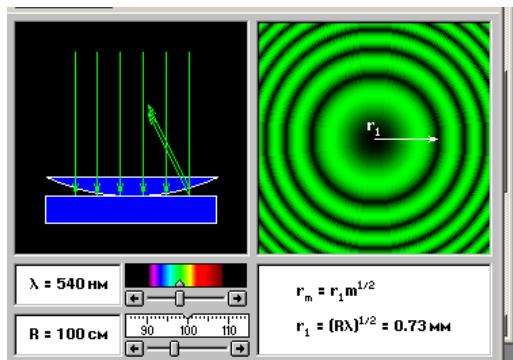


Рис. 4.1

Программа позволяет задавать значение R и λ , для которых она моделирует вид колец Ньютона и определяет значение r_1 .

Величины R и λ в компьютерной модели изменяются с помощью линеек выбора длин волн и радиуса (рис. 4.1).

Перемещение маркера по горизонтали мышкой приведёт к уменьшению или к увеличению соответствующего параметра.

Нажатие на кнопки-стрелки увеличивает или уменьшает значение этого параметра.

2. Задания к работе

- 2.1. Изучить понятие «когерентные световые волны».
- 2.2. Изучить явление интерференции света.
- 2.3. Получить условия для максимума и минимума в интерференционной картине колец Ньютона.

3. Порядок выполнения

- 3.1. Задать значение R .
- 3.2. При значениях λ , указанных в табл. 4.1 определить значения r_1 .
- 3.3. Результаты записать в табл. 4.1.

Таблица 4.1

λ , нм	400	450	500	550	600	650
r_1 , мм						

4. Обработка результатов измерения

- 4.1. Для каждого значения λ из табл. 4.1 вычислить значения d_m для $m = 0, 1, 2, \dots, 9$.
- 4.2. Результаты внести в табл. 4.2.
- 4.3. На одном графике построить зависимости $d = d(m)$ при всех значениях λ .
- 4.4. Проанализировать полученную зависимость $d = d(m)$ и сделать выводы.

Таблица 4.2

λ , нм	400	450	500	550	600	650
d_0 , мм						
...						
d_9 , мм						

5. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. В чём заключается явление интерференции света?
2. Какое условие необходимо для наблюдения интерференции света?
3. Какие условия минимума при интерференции?
4. Какие условия максимума при интерференции?
5. Дать определение оптической разности хода, разности фаз. Какова связь между ними?
6. Какие волны называются когерентными?
7. Почему в данной лабораторной работе интерференционная картина получается в виде колец?
8. Что такое кольца Ньютона?
9. Назвать волновые свойства света.

Лабораторная работа 3—5В



Изучение явления дифракции

Цель работы:

✓ изучить явление дифракции световых волн, изучить физические основы работы дифракционной решётки и определить ее параметры.

1. Краткие теоретические сведения

Если на пути волн встречается препятствие (то есть неоднородность среды, в которой волны не могут распространяться), то волны или частично, или целиком огибают это препятствие и заходят в область геометрической тени.

Такое явление называется *дифракцией волн*. Оно имеет место для волн разного происхождения. Объяснить явление дифракции и построить положения фронта волны, распространяющейся за препятствием, позволяет *принцип Гюйгенса–Френеля*.

Соответственно этому принципу каждая точка пространства, к которой подошла волна в некоторый момент времени t_1 , становится

источником вторичных когерентных волн. А распространение волны в пространстве во временах $t > t_1$ рассматривается как результат интерференции этих вторичных когерентных волн.

В данной работе рассматривается явление дифракции световых волн. Для расчёта интерференции вторичных волн и картины дифракции Френель предложил метод, получивший название *метода зон Френеля*. В соответствии с ним фронт световой волны, подошедшей к препятствию, разбивается на зоны (приблизительно равные по площади) таким образом, чтобы вторичные волны, которые излучаются соседними зонами, приходили бы в исследуемую точку, расположенную за препятствием, со сдвигом по фазе на π (с оптической разностью хода $\lambda/2$).

Если число таких зон чётное, то волны попарно погасят одна другую и будет наблюдаться минимум интенсивности, а если число зон нечётное, то излучение света от одной зоны не погасится и будет наблюдаться максимум интенсивности.

Рассмотрим дифракцию света на узкой длинной щели в непрозрачном экране (рис. 5.1).

Свет падает на щель нормально к её поверхности, a — ширина щели в плоскости рисунка.

Из рис. 5.1 видно, что вторичные волны (при применении принципа Гюйгенса–Френеля) за экраном заходят в зону геометрической тени.

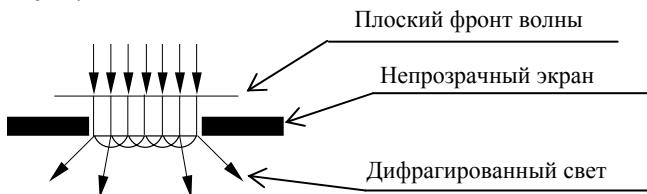


Рис. 5.1

Благодаря интерференции в этой зоне вторичные волны будут образовывать дифракционную картину.

Направления (которые даются θ — углом направления относительно нормали к щели) максимумов и минимумов образованной дифракционной картины легко можно найти с помощью приближенного метода зон Френеля. Для наблюдения дифракционной картины за щелью можно установить собирающую линзу и экран в её фокальной плоскости (рис. 5.2).

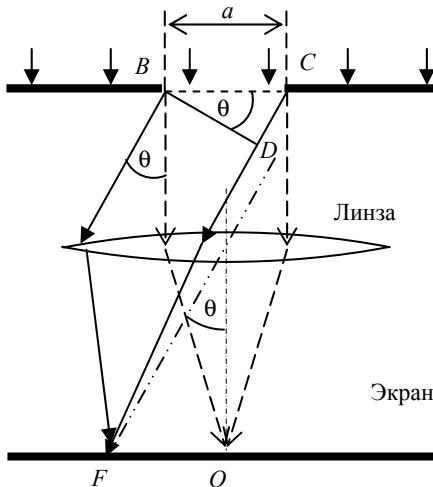


Рис. 5.2.

Линза не изменяет разность оптических путей световых лучей, проходящих через неё. Поэтому результат интерференции в точке F экрана зависит от разности хода $CD = a \sin \theta$ и длины волны света λ .

Щель BC можно разбить вдоль её ширины на зоны Френеля, имеющие вид полосок, параллельных ребру B щели. А разность оптических путей световых лучей от соседних таких полосок к точке F равняется $\lambda/2$. При этом колебания, возбуждаемые в точке F двумя соседними зонами Френеля, противоположны по фазе. В точку F приходят волны из участка фронта BD , порождённого щелью BC . Так как разность хода лучей света, идущих к точке F через точки B и C , равняется CD , то число зон Френеля, которые укладываются на участке BC , равно $2a|\sin \theta|/\lambda$.

При условии, что это число чётное, то есть при

$$a \sin \theta = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (5.1)$$

в точке F будет дифракционный минимум (полная темнота).

А если число зон нечетное, то есть при

$$a \sin \theta = \pm 2(m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (5.2)$$

в точке F будет дифракционный максимум.

Точное решение задачи дает, что интенсивность света в точке F равна

$$I_F = I_0 \Psi(z), \quad \Psi(z) = \left(\frac{\sin(\pi z)}{\pi z} \right)^2, \quad z = \frac{a \sin \theta}{\lambda}, \quad (5.3)$$

где I_0 — интенсивность в центральном максимуме (для которого $\theta = 0$).

График функции $\Psi(z)$ показан на рис. 5.3. Условие дифракционного максимума, полученное из уравнения (5.3), имеет несколько другой вид:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{a\pi \sin \varphi}{\lambda}\right) = \frac{a\pi \sin \varphi}{\lambda}. \quad (5.4)$$

Условие (5.4) при $a \ll \lambda$ практически совпадает с условием (5.2), полученным методом зон Френеля.

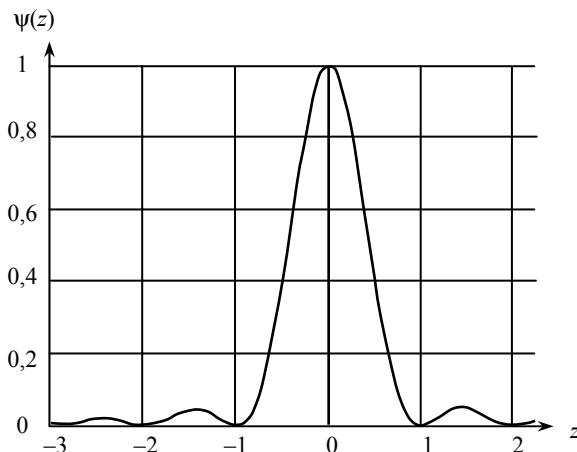


Рис. 5.3

Простейшие дифракционные решётки представляют собой систему узких параллельных щелей, расположенных на непрозрачном экране, на одинаковом расстоянии b друг от друга (рис. 5.4).

Величина $d = a + b$, где a — ширина щели, b — ширина непрозрачного промежутка, называется *постоянной*, или *периодом*, дифракционной решётки.

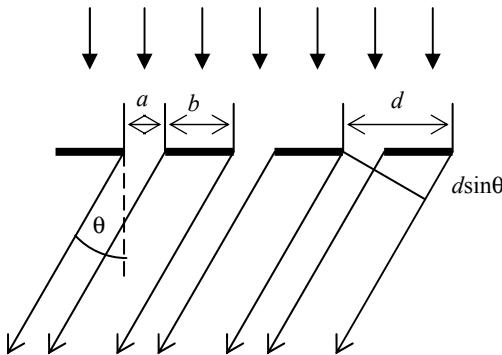


Рис. 5.4

Если на решётку нормально падает монохроматический пучок света, то после прохождения решётки свет распространяется по некоторым направлениям. Если за решёткой поставить собирающую линзу, то в ее фокальной плоскости будут наблюдаться дифракционные максимумы. При этом дифракционная картина обуславливается (при применении принципа Гюйгенса–Френеля) интерференцией не только вторичных световых волн от одной щели, а и интерференцией вторичных световых волн от всех щелей.

Разностью оптических путей волн, прошедших через соседние щели, является величина $d \sin \theta$. Она равна $m\lambda$, где λ — длина световой волны, m — целое число, то в фокальной плоскости будут наблюдаться дифракционные максимумы. Эти максимумы называются *главными*. Условие

$$d \sin \theta_m = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5.5)$$

называется *формулой решётки*, а число m — *порядком главного максимума*.

Главные минимумы при дифракции света на дифракционной решётке имеют место при условии минимума при дифракции на одной щели (5.1):

$$a \sin \theta = \pm m\lambda \quad (m=1, 2, \dots).$$

В этих направлениях любая из щелей не дает света.

Если некоторые значения θ одновременно удовлетворяют условия и для главных максимумов (5.5), и для главных минимумов, то главные максимумы для таких θ не наблюдаются. Например, при $d = 2b$ все главные четные максимумы отсутствуют.

Точное решение задачи для дифракционной решётки определяет, что J_m — интенсивность света в главном максимуме m -го порядка равна:

$$J_m = J_0 \Psi(z_m), \quad z_m = \frac{ma}{d}, \quad (5.6)$$

где J_0 — интенсивность в главном максимуме с $m = 0$ (для которого $\theta = 0$).

С помощью дифракционной решётки можно делать очень точные измерения длины волны. Если период решётки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла θ_m , соответствующего направлению на выбранный максимум m -го порядка.

Так как положение максимумов (кроме нулевого!) зависит от длины волны, то решётка способна разлагать излучения в спектр, то есть она является спектральным прибором.

Если свет состоит из двух монохроматических волн с длинами волн λ_1 и λ_2 , то решётка в каждом спектральном порядке (кроме $m = 0$) может отделить одну волну от другой. Характеристикой дифракционной решётки как спектрального прибора является её линейная дисперсия D :

$$D = \frac{\Delta L}{\Delta \lambda}, \quad (5.7)$$

где ΔL — линейное расстояние на экране между спектральными линиями с длинами волн λ_1 и λ_2 , $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2$.

2. Методика выполнения работы

Лабораторная работа выполняется с помощью моделирования физических процессов компьютером при использовании программы «Открытая физика».

Вид окна этой программы изображен на рис. 5.5.

Программа разрешает задавать значение d — постоянной дифракционной решётки и значение λ — длины волны света, при которых она моделирует вид дифракционной картины света от решётки и определяет значение Y_m — расстояние от главного максимума нулевого порядка до главного максимума m -го порядка в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием F .

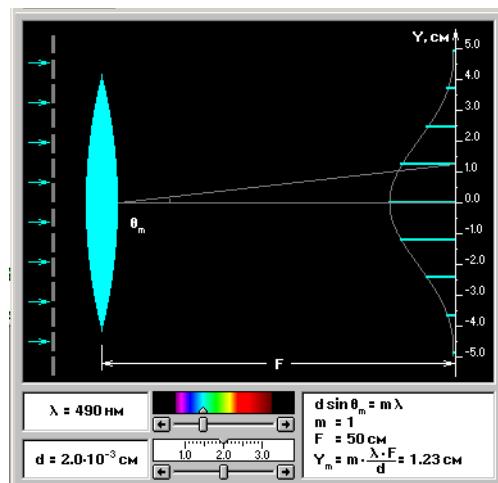


Рис. 5.5

Значения d и λ в компьютерной модели изменяются с помощью линеек выбора d и λ (рис. 5.6). Перемещение маркера по горизонтальной клавише «мыши» приведет или к уменьшению, или к увеличению соответствующего параметра. Нажатие на стрелки или увеличивает, или уменьшает значение этого параметра.

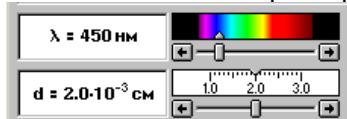


Рис. 5.6

Если на окне этой программы подвести клавишу «мыши» к изображению главного максимума дифракционной картины, то курсор «мыши» изменяет вид на

При этом в нижнем правом углу окна программы приводится значение m и Y_m .

В данной работе экспериментально определяются параметры дифракционной решётки: линейная дисперсия D и ширина щели a . Для определения a рассматривается распределение интенсивности света по главным максимумам дифракционной картины решётки, которое выражается формулой (5.6).

Линейкой, приложенной к экрану монитора, измеряются величины главных максимумов дифракционной картины решётки и вычисляются величины J_m/J_0 . Далее, пользуясь рис. 5.3, находится соответствующее число

$$z_m = \frac{ma}{d}. \quad (5.8)$$

А из выражения (5.8), по известным значениям m , d , z_m , находят значения a .

3. Задания к работе

- 3.1. Выучить явление дифракции световых волн.
- 3.2. Выучить принцип Гюйгенса–Френеля.
- 3.3. Выучить метод зон Френеля.
- 3.4. Получить условия для максимума и минимума интенсивности света в дифракционной картине от щели и от решётки.

4. Порядок выполнения

4.1. Исследование распределения интенсивности света в главных максимумах дифракционной картины решётки.

- 4.1.1. Задать $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ см, $\lambda = 500$ нм.
- 4.1.2. Провести измерения значений J_m при $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$.
- 4.1.3. Внести полученные значения J_m в табл. 5.1.
- 4.2. Исследование линейной дисперсии решётки.
- 4.2.1. Задать $\lambda_1 = 700$ нм.
- 4.2.2. Определить для этих λ значения Y_m для $m = 1, 2, 3, 4$.
- 4.2.3. Полученные значения $Y_m(\lambda_1)$ внести в табл. 5.2.
- 4.2.4. Задать $\lambda_2 = 650$ нм.
- 4.2.5. Определить для этих λ значения Y_m для $m = 1, 2, 3, 4$.
- 4.2.6. Полученные значения $Y_m(\lambda_2)$ внести в табл. 5.2.

5. Обработка результатов измерения

5.1. Определение ширины щели решётки a .

5.1.1. Используя сведения из табл. 5.1, вычислить величины J_m/J_0 для $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$.

- 5.1.2. Полученные значения J_m/J_0 записать в табл. 5.1.
- 5.1.3. По графику зависимости $\Psi = \Psi(z)$ (рис. 5.3) найти числа

z_m , которые удовлетворяют условие $\frac{J_m}{J_0} = \Psi(z_m)$ при $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$.

5.1.4. Полученные значения z_m записать в табл. 5.1.

5.1.5. Для каждого значения z_m из табл. 5.1 вычислить числа

$$a_m = \frac{z_m d}{m}.$$

5.1.6. Полученные значения a_m записать в табл. 5.1.

Таблица 5.1

m	-5	0	5
$J_m, \text{мм}$					
Jm/J_0					
z_m					
$a_m, \text{см}$					

5.1.7. Вычислить среднее значение ширины щели решётки по формуле

$$a = \frac{1}{10} \sum_{\substack{m=-5 \\ m \neq 0}}^{m=5} a_m.$$

5.2. Определение линейной дисперсии решётки D .

5.2.1. Используя сведения из табл. 5.2, вычислить величины $\Delta Y_m = Y_m(\lambda_1) - Y_m(\lambda_2)$ для $m = 1, 2, 3, 4$.

Таблица 5.2

m	1	...	4
$Y_m(\lambda_1), \text{см}$			
$Y_m(\lambda_2), \text{см}$			
$\Delta Y_m, \text{см}$			
D_m			

5.2.2. Полученные значения ΔY_m записать в табл. 5.2.

5.2.3. Вычислить линейную дисперсию решётки D по формуле

$$D_m = \frac{\Delta Y_m}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

5.2.4. Полученные значения D_m записать в табл. 5.2.

6. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Что такое явление дифракции света?
2. Какие условия необходимы для наблюдения дифракции света?
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля.
4. В чём состоит сущность метода зон Френеля?
5. Что такое дифракционная решётка?
6. Почему дифракционная решётка разлагает белый свет в спектр?
7. Какие условия минимума и максимума для дифракционной картины света на щели?
8. Получите условия для главных максимумов при дифракции света на решётке.
9. Рассчитайте дифракцию Френеля на круглом отверстии.
10. Рассчитайте дифракцию Френеля на круглом диске.

Лабораторная работа 3—6В

Изучение поляризации света

Цель работы:

✓ изучить поляризацию света, поляризатор, анализатор, поляроид. Изучить закон Малюса и проверить его.

1. Методика выполнения работы

Лабораторная работа выполняется с помощью моделирования физических процессов компьютером при использовании программы «Открытая физика».

Вид окна этой программы изображен на рис. 6.2.

Программа моделирует прохождение света от лампочки накаливания через два, последовательно установленных поляроида.

Программа позволяет задавать значения углового положения главной плоскости первого ϕ_1 и второго ϕ_2 поляроида с помощью линеек выбора, расположенных внизу окна. Программа выдает в окне слева от линеек выбора значения ϕ_1 и ϕ_2 .

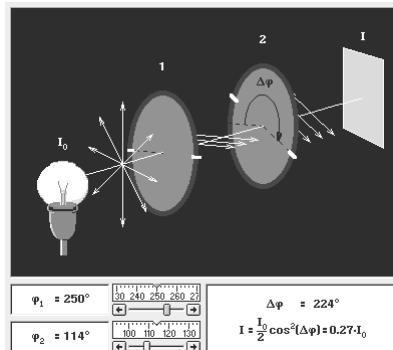


Рис. 6.2

По правую сторону от линеек выбора programma выдаёт:

- 1) значение разности $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$;
- 2) значение интенсивности света I , прошедшего поляроиды, в частях от I_0 — интенсивности света, падающего от лампочки накаливания на первый поляроид.

2. Задания к работе

2.1. *Выучить*: физический смысл термина «поляризация» и особенности его применения для света.

2.2. *Знать*: действие поляризатора и анализатора.

2.3. *Уметь* вывести закон Малюса.

3. Порядок выполнения

3.1. Исследование поляризованного света.

3.1.1. Установить $\Delta\varphi = 0$.

3.1.2. Определить значение I / I_0 .

3.1.3. Повторить пункты 3.1.1, 3.1.2 при значениях $\Delta\varphi$ от 10° до 350° с шагом 10° .

3.1.4. Записать полученные значения в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	I/I_0	$\cos^2(\Delta\varphi)$
0		
10		
...		
350		

4. Обработка результатов измерения

4.1. Проверка закона Малюса.

4.1.1. Для каждого значения $\Delta\phi$ вычислить и внести в табл. 6.1 значения $\cos^2(\Delta\phi)$.

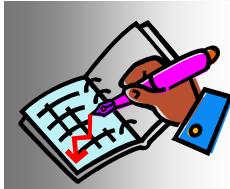
4.1.2. Используя сведения из табл. 6.1, построить график зависимости I / I_0 от $\cos^2(\Delta\phi)$.

5. Выводы по работе

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы и задания для допуска и защиты лабораторной работы и микромодульного контроля

1. Объясните физический смысл термина «поляризация».
2. Какая волна называется поляризованной?
3. Почему поляризация может быть только у поперечных волн?
4. Какой свет называется естественным?
5. Какой свет называется поляризованным?
6. Какой свет называется линейнополяризованным, плоскополяризованным?
7. Какой свет называется частично поляризованным?
8. Какую плоскость называют плоскостью поляризации?
9. Какие вы знаете источники естественного и поляризованного света?
10. Как неполяризованный свет можно превратить в поляризованный?
11. Что такое поляроид?
12. Что такое поляризатор, анализатор? Чем они отличаются?
13. Что такое главные плоскости поляризатора, анализатора?
14. Сформулируйте и выведите закон Малюса.



МОДУЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

1. ВОПРОСЫ ДЛЯ МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И ТЕКУЩЕГО ПИСЬМЕННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ (теоретический материал)



1. Какие существуют виды колебаний? Охарактеризовать их.
2. Вывести дифференциальное уравнение механических свободных незатухающих колебаний. Записать его решение.
3. Вывести дифференциальное уравнение электромагнитных свободных незатухающих колебаний. Записать его решение.
4. Вывести дифференциальное уравнение механических свободных затухающих колебаний. Записать его решение.
5. Каковы характеристики затухания колебаний?
6. Вывести дифференциальное уравнение электромагнитных свободных затухающих колебаний. Записать его решение.
7. Охарактеризовать сложение колебаний.
8. Вывести дифференциальное уравнение механических вынужденных колебаний. Записать его решение.
9. Что такое резонанс?
10. Вывести дифференциальное уравнение электромагнитных вынужденных колебаний. Записать его решение.
11. Вывести уравнение механической волны.
12. Что такое фазовая и групповая скорости волны?
13. Как образуются стоячие волны? Вывести уравнение стоячей волны.
14. В чём состоит эффект Допплера?
15. Описать свойства световых волн.
16. Что называется интерференцией света? Каково условие наблюдения интерференции света?
17. Что такое разность фаз и оптическая разность хода?

18. Вывести условия максимума и минимума интерференции для разности фаз и оптической разности хода.
19. Описать способы получения когерентных световых волн. Интерференция в тонких плёнках.
20. Какое практическое применение интерференции света: кольца Ньютона, просветление оптики.
21. Что называется дифракцией света? Каковы условия наблюдения дифракции света.
22. Сформулировать метод зон Френеля.
23. Применить метод зон Френеля к расчету дифракции света на круглом отверстии и непрозрачном диске.
24. Опишите дифракцию света на одной плоской щели и дифракционной решётки.
25. Каково практическое применение дифракционной решётки?
26. Каковы условия наблюдения дифракции на кристаллах?
27. Что называется поляризацией света? Почему естественный свет не является поляризованным?
28. Какие существуют способы получения поляризованного света?
29. Записать и сформулировать закон Брюстера.
30. Вывести и сформулировать закон Малюса. Как можно отличить естественный свет от поляризованного?
31. Каковы условия наблюдения поляризованного света?

2. ВОПРОСЫ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ



Свободные незатухающие механические колебания

- 1.** Свободные колебания могут быть:
 - 1) гармоническими; 2) периодическими; 3) затухающими; 4) не затухающими; 5) механическими; 6) электромагнитными.
- 2.** Полная энергия свободных незатухающих колебаний:
 - 1) со временем уменьшается; 2) не изменяется со временем;
 - 3) пополняется периодически извне; 4) равняется нулю.

3. Уравнение свободных незатухающих механических колебаний имеет вид:

- 1) $x = A \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $x = A \sin \omega_0 t$;
- 3) $x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 4) $x = A_0 e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$.

4. Фаза колебаний в начальный момент времени определяется так:

- 1) $\cos \phi_0 = \frac{x}{A}$; 2) $\cos(\omega_0 t + \phi_0) = \frac{x}{A}$; 3) $\cos \omega_0 t = \frac{x}{A}$.

5. Фаза колебаний в произвольный момент времени определяется так:

- 1) $\cos \phi_0 = \frac{x}{A}$; 2) $\cos(\omega_0 t + \phi_0) = \frac{x}{A}$; 3) $\cos \omega_0 t = \frac{x}{A}$.

6. Циклическая частота незатухающих колебаний имеет вид:

- 1) ω_0 ; 2) $\frac{2\pi}{T}$; 3) $\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.

7. Собственная циклическая частота незатухающих механических колебаний имеет вид:

- 1) $2\pi v$; 2) $\frac{2\pi}{T}$; 3) $\sqrt{\frac{k}{m}}$.

8. Максимальная кинетическая энергия свободных незатухающих механических колебаний имеет вид:

- 1) $\frac{kx^2}{2}$; 2) $\frac{q_m^2}{2C}$; 3) $\frac{mA^2 \omega_0^2}{2}$; 4) $\frac{LI_m^2}{2}$.

9. Максимальная потенциальная энергия свободных незатухающих механических колебаний имеет вид:

- 1) $\frac{kx^2}{2}$; 2) $\frac{q_m^2}{2C}$; 3) $\frac{mA^2 \omega_0^2}{2}$; 4) $\frac{LI_m^2}{2}$.

10. Кинетическая энергия свободных незатухающих механических колебаний:

- 1) изменяется со временем по гармоническому закону;
- 2) уменьшается со временем по экспоненциальному закону;

- 3) не изменяется со временем;
- 4) не зависит от времени.

11. Потенциальная энергия свободных незатухающих механических колебаний:

- 1) изменяется со временем по гармоническому закону;
- 2) уменьшается со временем по экспоненциальному закону;
- 3) не изменяется со временем;
- 4) не зависит от времени.

12. Полная энергия свободных незатухающих механических колебаний:

- 1) изменяется со временем по гармоническому закону;
- 2) уменьшается со временем по экспоненциальному закону;
- 3) не изменяется со временем;
- 4) не зависит от времени.

Свободные затухающие механические колебания

13. Полная энергия свободных затухающих механических колебаний:

- 1) уменьшается со временем;
- 2) равняется нулю;
- 3) не изменяется со временем;
- 4) пополняется периодически извне.

14. Уравнение свободных затухающих механических колебаний имеет вид:

- 1) $x = A \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $x = A \sin \omega_0 t$;
- 3) $x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 4) $x = A_0 e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$.

15. Амплитуда свободных затухающих механических колебаний изменяется по закону:

- 1) $\cos^2(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $\cos^2 \omega_0 t$;
- 3) $e^{-\beta t}$; 4) $\sin^2(\omega_0 t + \phi_0)$.

16. Циклическая частота затухающих механических колебаний такая:

- 1) ω_0 ; 2) $\frac{2\pi}{T}$; 3) $\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.

17. Коэффициент затухания механических колебаний имеет вид:

1) $\frac{1}{\beta}$; 2) $e^{\beta T}$; 3) $\frac{r}{2m}$; 4) $\frac{\pi}{\delta}$.

18. Время релаксации колебаний определяется так:

1) $\frac{1}{\beta}$; 2) $e^{\beta T}$; 3) $\frac{r}{2m}$; 4) $\frac{\pi}{\delta}$.

19. Декремент затухания колебаний определяется так:

1) $\frac{1}{\beta}$; 2) $e^{\beta T}$; 3) $\frac{r}{2m}$; 4) $\frac{\pi}{\delta}$.

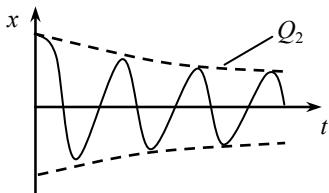
20. Логарифмический декремент затухания колебаний определяется так:

1) $\frac{1}{\beta}$; 2) $e^{\beta T}$; 3) $\frac{r}{2m}$; 4) $\frac{\pi}{\delta}$.

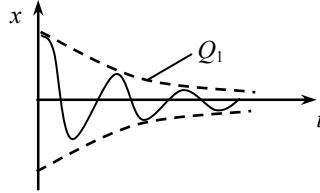
21. Добротность колебаний определяется так:

1) $\frac{1}{\beta}$; 2) $e^{\beta T}$; 3) $\frac{r}{2m}$; 4) $\frac{\pi}{\delta}$.

22. Добротность какой колебательной системы больше:



- 1) a ; 2) \bar{a} ; 3) равны.



\bar{a}

Сложение колебаний

23. Амплитуда результирующего колебания, полученного при сложении двух колебаний одинаковой частоты, происходящих вдоль одной оси, определяется так:

1) $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$; 2) $A = A_1 + A_2$;

3) $A = A_1 - A_2$; 4) $A = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t$.

24. Амплитуда результирующего колебания, полученного при сложении двух колебаний близких частот, происходящих вдоль одной оси, определяется так

- 1) $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$; 2) $A = A_1 + A_2$;
- 3) $A = A_1 - A_2$; 4) $A = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t$.

25. Траектория движения материальной точки, которая участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, имеет форму эллипса при условии:

- 1) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi$; 2) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$;
- 3) $\frac{x}{A} - \frac{y}{B} = 0$; 4) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1$.

26. Траектория движения материальной точки, которая участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, имеет форму окружности при условии:

- 1) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi$; 2) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$;
- 3) $\frac{x}{A} - \frac{y}{B} = 0$; 4) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1$.

27. Траектория движения материальной точки, которая участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, имеет форму прямой при условии:

- 1) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi$; 2) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$;
- 3) $\frac{x}{A} - \frac{y}{B} = 0$; 4) $\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1$.

Свободные незатухающие и затухающие электромагнитные колебания

28. Уравнение свободных незатухающих электромагнитных колебаний имеет вид:

- 1) $q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $q = q_m \sin \omega_0 t$;
- 3) $q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 4) $q = q_0 e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$.

29. Собственная циклическая частота незатухающих электромагнитных колебаний равна:

- 1) $2\pi\nu$; 2) $\frac{2\pi}{T}$; 3) $\frac{1}{\sqrt{LC}}$.

30. Период свободных незатухающих электромагнитных колебаний равен:

- 1) $\frac{1}{\sqrt{LC}}$; 2) $2\pi\sqrt{LC}$; 3) $\frac{R}{2L}$; 4) $\frac{L}{R}$.

31. Максимальная энергия электрического поля конденсатора при свободных незатухающих электромагнитных колебаниях имеет вид:

- 1) $\frac{kx^2}{2}$; 2) $\frac{q_m^2}{2C}$; 3) $\frac{mA^2\omega_0^2}{2}$; 4) $\frac{LI_m^2}{2}$.

32. Максимальная энергия магнитного поля катушки индуктивности при свободных незатухающих электромагнитных колебаниях имеет вид:

- 1) $\frac{kx^2}{2}$; 2) $\frac{q_m^2}{2C}$; 3) $\frac{mA^2\omega_0^2}{2}$; 4) $\frac{LI_m^2}{2}$.

34. Уравнение свободных затухающих электромагнитных колебаний имеет вид:

- 1) $q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $q = q_m \sin \omega_0 t$;
- 3) $q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 4) $q = q_0 e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$.

35. Амплитуда заряда при свободных затухающих электромагнитных колебаниях изменяется по закону:

- 1) $\cos^2(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $\cos^2 \omega_0 t$; 3) $e^{-\beta t}$; 4) $\sin^2(\omega_0 t + \phi_0)$

36. Коэффициент затухания при электромагнитных колебаниях определяется по формуле:

$$1) \frac{1}{\sqrt{LC}}; 2) 2\pi\sqrt{LC}; 3) \frac{R}{2L}; 4) \frac{L}{R}.$$

Вынужденные механические и электромагнитные колебания

37. Вынужденные колебания могут быть:

- 1) гармоническими; 2) периодическими; 3) затухающими;
- 4) незатухающими; 5) механическими; 6) электромагнитными.

38. Полная энергия вынужденных колебаний:

- 1) со временем уменьшается; 2) не изменяется со временем;
- 3) пополняется периодически извне; 4) равняется нулю.

39. Амплитуда вынужденных механических колебаний определяется по формуле:

$$1) A = A_0 e^{-\beta t}; 2) A = A_1 + A_2;$$

$$3) A = \frac{F_m}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}; 4) A = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2}t.$$

40. Резонансная частота определяется так:

$$1) \omega_0; 2) \frac{2\pi}{T}; 3) \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}; 4) \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

41. Амплитуда силы тока при вынужденных электромагнитных колебаниях имеет вид:

$$1) I_m = I_0 e^{-\beta t}; 2) I_m = \frac{\epsilon_m}{Z}; 3) I_m = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{(X^2 + R^2)}}.$$

42. Ёмкостное сопротивление определяется так:

$$1) \omega L; 2) \frac{1}{\omega C}; 3) \sqrt{X^2 + R^2}; 4) \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

43. Индуктивное сопротивление определяется так:

$$1) \omega L; 2) \frac{1}{\omega C}; 3) \sqrt{X^2 + R^2}; 4) \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

44. Реактивное сопротивление цепи переменного тока определяется так:

1) ωL ; 2) $\frac{1}{\omega C}$; 3) $\sqrt{X^2 + R^2}$; 4) $\omega L - \frac{1}{\omega C}$

45. Полное сопротивление цепи переменного тока определяется так:

1) ωL ; 2) $\frac{1}{\omega C}$; 3) $\sqrt{X^2 + R^2}$; 4) $\omega L - \frac{1}{\omega C}$.

46. Импеданс цепи переменного тока определяется так:

1) ωL ; 2) $\frac{1}{\omega C}$; 3) $\sqrt{X^2 + R^2}$; 4) $\omega L - \frac{1}{\omega C}$.

47. Падение напряжения на ёмкостном сопротивлении цепи переменного тока определяется так:

1) IR ; 2) IX_C ; 3) IX_L .

48. Падение напряжения на индуктивном сопротивлении цепи переменного тока определяется так:

1) IR ; 2) IX_C ; 3) IX_L .

49. Падение напряжения на активном сопротивлении цепи переменного тока определяется так:

1) IR ; 2) IX_C ; 3) IX_L .

50. Эффективное значение силы тока определяется так:

1) $\frac{\epsilon_m}{\sqrt{(X^2 + R^2)}}$; 2) $\frac{\epsilon_m}{Z}$; 3) $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

Механические волны

51. При распространении механических волн в упругой среде:

- 1) частицы среды волной не переносятся;
- 2) частицы среды находятся в состоянии равновесия;
- 3) частицы среды совершают гармонические колебания около положения равновесия.

52. Механические волны:

- 1) поперечные; 2) продольные; 3) поперечные и продольные.

53. Фронт волны может быть:

- 1) сферическим; 2) плоским; 3) любой формы.

54. Длина волны определяется так:

1) vT ; 2) $\frac{v}{\nu}$; 3) $\frac{\omega}{k}$; 4) $\frac{2\pi}{\lambda}$; 5) $\frac{2\pi\nu}{\omega}$.

55. Волновое число определяется так:

1) $\lambda\nu$; 2) $\frac{\nu}{\nu}$; 3) $\frac{\omega}{k}$; 4) $\frac{2\pi}{\lambda}$; 5) $\frac{2\pi\nu}{\omega}$.

56. Уравнение волны имеет вид:

1) $A \cos(\omega_0 t + \phi_0)$; 2) $A \cos(\omega t - kx + \phi_0)$; 3) $A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$.

57. Механические волны:

- 1) не переносят энергию;
2) энергия периодически переходит из кинетической в потенциальную упруго деформированный среды и наоборот;
3) плотность потока энергии в любой точке среды периодически изменяется со временем.

58. Фазовая скорость волны определяется так:

1) $\lambda\nu$; 2) $v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$; 3) $\frac{\omega}{k}$; 4) $\frac{\lambda}{T}$.

59. Групповая скорость волны определяется так:

1) $\lambda\nu$; 2) $v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$; 3) $\frac{\omega}{k}$; 4) $\frac{\lambda}{T}$.

60. Волновое уравнение имеет вид:

1) $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$; 2) $\Delta s = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$; 3) $\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$.

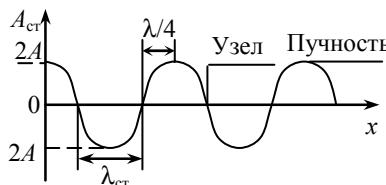
61. Стоячая волна отличается от волн, которые её создают, тем, что:

- 1) имеет длину волны вдвое меньше;
2) имеет такую же частоту;

- 3) её амплитуда не зависит от координаты x ;
 4) её амплитуда зависит от координаты x ;
 5) не переносит энергию;
 6) энергия периодически переходит из кинетической в потенциальную упруго деформированной среды и наоборот;
 7) плотность потока энергии в любой точке среды периодически изменяется со временем.

62. На рисунке представлена зависимость амплитуды стоячей волны от координаты. Показать:

- 1) узел: 1, 2, 3, 4;
- 2) пучность: 1, 2, 3, 4;
- 3) длину стоячей волны: 1, 2, 3, 4;
- 4) половину длины волны стоячей волны: 1, 2, 3, 4.



63. Эффект Допплера состоит в том, что:

- 1) неподвижный приемник звука регистрирует такую же частоту, какую излучает неподвижный источник звука;
- 2) приемник звука, движущийся с постоянной скоростью навстречу источнику звука, регистрирует большую частоту звука, чем излучает источник;
- 3) приемник звука, движущийся с постоянной скоростью от источника звука, регистрирует большую частоту звука, чем излучает источник;
- 4) приемник звука регистрирует большую частоту звука, чем излучает источник, если источник звука движется с постоянной скоростью ему навстречу;
- 5) приемник звука регистрирует меньшую частоту звука, чем излучает источник, если источник звука удаляется от него с постоянной скоростью.

ОПТИКА

Интерференция света

64. Интерференция света наблюдается при наложении:

- а) световых волн, распространяющихся в одном направлении;
- б) монохроматических световых волн;
- в) поляризованных световых волн;
- г) когерентных световых волн.

65. Когерентными световыми волнами называются:

- а) монохроматические световые волны;
- б) монохроматические световые волны, разность фаз которых не изменяется со временем и векторы напряженности электрического поля выполняют колебания в одной плоскости;
- в) монохроматические световые волны, разность фаз которых изменяется со временем;
- г) поляризованные световые волны.

66. Когерентные световые волны можно получить:

- а) от двух независимых источников света;
- б) от двух разных источников света;
- в) от одного источника света, разделив поток света на две части;
- г) расщеплением светового потока при отражении от двух поверхностей.

67. Оптическая разность хода определяется так:

- а) $\Delta x = x_2 - x_1$;
- б) $\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1$;
- в) $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$.

68. При отражении света от оптически более плотной среды отражённая волна:

- а) теряет в разности хода половину длины волны;
- б) её фаза изменяется на π ;
- в) её фаза не изменяется.

69. Условие максимума интерференции имеет вид:

- а) $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$;
 в) $\Delta\varphi = 2k\pi$; г) $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$.

70. Условие минимума интерференции имеет вид:

- а) $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$;
 в) $\Delta\varphi = 2k\pi$; г) $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$.

71. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, и линза плотно прилегает к пластинке. Между линзой и пластинкой находится воздух. В центре интерференционной картины наблюдается тёмное (минимум интерференции) пятно при условии:

- а) $\Delta = \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = \lambda$; в) $\Delta = 3 \frac{\lambda}{2}$; г) $\Delta = 2\lambda$.

72. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, и линза приподнята над пластинкой. Между линзой и пластинкой находится воздух. В центре интерференционной картины наблюдается тёмное (минимум интерференции) пятно при условии:

- а) $\Delta = \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = \lambda$; в) $\Delta = 3 \frac{\lambda}{2}$; г) $\Delta = 2\lambda$.

73. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, и линза приподнята над пластинкой. Между линзой и пластинкой находится воздух. В центре интерференционной картины наблюдается светлое (максимум интерференции) пятно при условии:

- а) $\Delta = \frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = \lambda$; в) $\Delta = 3 \frac{\lambda}{2}$; г) $\Delta = 2\lambda$.

74. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, между линзой и пластинкой находится воздух. Оптическая разность хода между когерентными лучами равна:

$$1) \sqrt{2dn - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}; 2) \sqrt{2dn - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}; 3) 2dn + \frac{\lambda}{2}.$$

75. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, между линзой и пластинкой находится воздух. Дописать формулу для определения радиуса светлого кольца Ньютона

$$r_{\text{св}} = \sqrt{\dots(\dots\dots\dots)\frac{\lambda}{\dots}} :$$

- 1) n ; 2) R ; 3) $2k$; 4) $2k - 1$; 5) 2 ; 6) 4 .

76. Кольца Ньютона наблюдаются в монохроматическом отражённом свете, между линзой и пластинкой находится жидкость, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла $n < n_{\text{ст}}$. Дописать формулу для определения радиуса тёмного

$$\text{кольца Ньютона } r_{\text{св}} = \sqrt{\dots(\dots\dots\dots)\frac{\lambda}{\dots}} :$$

- 1) n ; 2) R ; 3) $2k$; 4) $2k - 1$; 5) 2 ; 6) 4 .

77. Показатель преломления n плёнки, нанесенной для просветления стеклянной линзы (показатель преломления стекла n_1), равен:

- а) $n < n_1$; б) $n = n_1$; в) $n = \sqrt{n_1}$; г) $n = 1$.

78. Минимальная толщина плёнки, нанесенной на просветленную линзу, равна:

- а) λ ; б) $\lambda/2$; в) $\lambda/4$; г) 2λ .

Дифракция света

79. Дифракция света наблюдается при прохождении света:

- а) через кристаллы;
б) через малые отверстия;
в) через вещества с неоднородными физическими свойствами;
г) через малые щели.

80. Метод зон Френеля содержит:

- а) принцип Гюйгенса;
б) утверждение, что фиктивные вторичные источники света ко-
герентны;

в) утверждение, что мощность излучения фиктивных вторичных источников света одинакова;

г) утверждения, что фиктивные вторичные источники света — это точки одной волновой поверхности.

81. Разность хода между волнами, которые посылают в исследуемую точку соседние зоны Френеля, равна:

$$\text{а) } \Delta = \lambda; \quad \text{б) } \Delta = \frac{\lambda}{2}; \quad \text{в) } \Delta = 3\frac{\lambda}{2}; \quad \text{г) } \Delta = 2\lambda.$$

82. Дифракция Френеля наблюдается на круглом отверстии. В центре дифракционной картины на экране наблюдается минимум интерференции, если число открытых зон Френеля, укладывающихся в отверстии, равно:

$$\text{а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.}$$

83. Дифракция Френеля наблюдается на круглом отверстии. В центре дифракционной картины на экране наблюдается максимум интерференции, если число открытых зон Френеля равно:

$$\text{а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.}$$

84. Дифракция Фраунгофера наблюдается на плоской щели. Условие дифракционного максимума имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{а) } a \sin \varphi &= \pm 2k \frac{\lambda}{2}; \quad \text{б) } a \sin \varphi = \lambda; \\ \text{в) } a \sin \varphi &= \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}; \quad \text{г) } a \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}. \end{aligned}$$

85. Дифракция Фраунгофера наблюдается на плоской щели. Условие дифракционного минимума имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{а) } a \sin \varphi &= \pm 2k \frac{\lambda}{2}; \quad \text{б) } a \sin \varphi = \lambda; \\ \text{в) } a \sin \varphi &= \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}; \quad \text{г) } a \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}. \end{aligned}$$

86. Условие наблюдения дифракции на плоской щели шириной a таково:

$$\text{а) } a \approx \lambda; \quad \text{б) } a >> \lambda; \quad \text{в) } a < \lambda; \quad \text{г) } a > \lambda.$$

87. Дифракция Фраунгофера наблюдается на дифракционной решётке. Условие наблюдения главных максимумов таково:

- а) $d \sin \varphi = 3\lambda$; б) $d \sin \varphi = \pm k\lambda$;
- в) $d \sin \varphi = \pm \left(k + \frac{p}{N} \right) \lambda$; г) $d \sin \varphi = \lambda$.

88. Дифракция Фраунгофера наблюдается на дифракционной решётке. Условие наблюдения дифракционных минимумов таково:

- а) $d \sin \varphi = 3\lambda$; б) $d \sin \varphi = \pm k\lambda$;
- в) $d \sin \varphi = \pm \left(k + \frac{p}{N} \right) \lambda$; г) $d \sin \varphi = \lambda$.

89. Как изменится вид дифракционного спектра, если постоянную дифракционную решётку увеличить в два раза?

- а) дифракционные спектры станут уже в два раза;
- б) дифракционные спектры станут шире в два раза;
- в) дифракционные спектры не изменятся.

90. Как изменится вид дифракционного спектра, если постоянную дифракционной решётки уменьшить в два раза?

- а) дифракционные спектры станут уже в два раза;
- б) дифракционные спектры станут шире в два раза;
- в) дифракционные спектры не изменятся.

91. Дифракционная решётка разделяет белый свет в спектр потому, что

- а) свет огибает края щелей решётки;
- б) свет попадает в область геометрической тени;
- в) угол дифракции линейно зависит от длины волны света;
- г) ширина щелей решётки сравнима с длиной волны света.

92. Расчёты показывают, что в отверстии укладывается две зоны Френеля. Как изменится освещённость в центре дифракционной картины на экране, если отверстие убрать?

- а) уменьшится; б) увеличится; в) не изменится.

93. Для того, чтобы с помощью дифракции определить постоянную кристаллической решётки кристалла, его нужно облучать:

- а) инфракрасным излучением;
- б) ультрафиолетовым излучением;
- в) рентгеновским излучением;
- г) видимым светом.

94. Разрешающая способность дифракционной решётки зависит:

- а) от угла дифракции; б) числа щелей дифракционной решётки;
- в) постоянной дифракционной решётки; г) порядка спектра.

Поляризация света

95. Световая волна называется линейнополяризованной, если:

- а) площадь колебаний вектора напряженности электрического поля изменяется хаотически;
- б) площадь колебаний вектора напряженности электрического поля упорядочена;
- в) площадь колебаний вектора напряженности электрического поля имеет только два положения в пространстве.

96. При отражении света от поверхности прозрачного диэлектрика:

- а) отраженный луч частично поляризован;
- б) отраженный луч поляризован полностью;
- в) отраженный луч не поляризован.

97. При преломлении света в прозрачном диэлектрике:

- а) преломленный луч частично поляризован;
- б) преломленный луч полностью поляризован;
- в) преломленный луч не поляризован.

98. Если выполняется закон Брюстера:

- а) отраженный и преломленный лучи частично поляризованы;
- б) отраженный и преломленный лучи полностью поляризованы;
- в) отраженный луч полностью поляризован, а преломленный луч поляризован частично;
- г) отраженный и преломленный лучи не поляризованы.

99. Закон Малюса выполняется:

- а) для поляризованного света;
- б) для частично поляризованного света;
- в) для неполяризованного света.

100. Закон Малюса имеет вид:

- a) $I_p = \frac{1}{2} I_0$;
- б) $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi$;
- в) $I = I_p \cos^2 \varphi$.

101. Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, равна:

- a) $I_p = \frac{1}{2} I_0$;
- б) $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi$;
- в) $I = I_p \cos^2 \varphi$.

102. Поляроид — это устройство, предназначенное:

- а) для наблюдения двойного лучепреломления света;
- б) получения поляризованного света;
- в) наблюдения интерференции поляризованных лучей.

103. Закон Малюса позволяет:

- а) установить степень поляризации света;
- б) отличить поляризованный свет от неполяризованного;
- в) отличить естественный свет от поляризованного.

104. Фазовая скорость определяется так:

1) λv ; 2) $v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$; 3) $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$; 4) $\frac{c}{n}$; 5) $\frac{\omega}{k}$.

105. Групповая скорость определяется так:

1) λv ; 2) $v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$; 3) $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$; 4) $\frac{c}{n}$; 5) $\frac{\omega}{k}$.

106. Показатель преломления вещества определяется так:

1) $\frac{c}{v}$; 2) $\sqrt{\epsilon}$; 3) $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ



1. Соловйов А. М. Коливання та хвилі. Лекції професора Соловйова з фізики / А. М. Соловйов — К. : НАУ, 2002. — 84 с.
2. Кузнецова О. Я. Фізичні основи хвильових явищ : курс лекцій / О. Я. Кузнецова. — К. : НАУ, 2003. — 68 с.
3. Кузнецова О. Я. Фізика. Хвилі в пружніх середовищах, хвильова оптика : методичні вказівки / О. Я. Кузнецова, В. П. Федина. — К. : КМУЦА, 2000. — 49 с.
4. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система : навч. посіб. У 2 ч. / [В. В. Куліш, А. М. Соловйов, О. Я. Кузнецова, В. М. Куліщенко]. — К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. — Ч. 2.— 380 с.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1982. — 496 с.
6. Яворский Б. М. Курс физики. Т. 2 / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М. : Высш. шк., 1971. — 550 с.
7. Горбунова О. И. Задачник-практикум по общей физике. Оптика. Атомная физика : учеб. пособие / О. И. Горбунова; под ред. проф. Н. В. Александрова. — М. : Просвещение, 1977. — 112 с.
8. Фізика. Хвильова оптика: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / [уклад. :О. Я. Кузнецова, Ж. М. Нетреба, Є. П. Боженко та ін.]. — К. : — НАУ, 2006. — 56 с.



СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

1. Единицы физических величин СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Величина	Единица	
	Наимено- вание	Обоз- наче- ние		Наимено- вание	Обоз- наче- ние
Длина	метр	м	Сила тока	ампер	А
Масса	килограмм	кг	электрический заряд	кулон	Кл
Время	секунда	с	потенциал электрического поля, электрическое напряжение	вольт	В
Плоский угол	радиан	рад	электрическая ёмкость	фарад	Ф
Телесный кут	стерадиан	ср	электрическое сопротивление	ом	Ом
Сила, вес	ньютон	Н	электрическая проводимость	сименс	См
Давление	паскаль	Па	магнитная индукция	tesла	тл
Модуль упругости	паскаль	Па	магнитный поток	вебер	Вб
Работа, энергия	джауль	Дж	индуктивность	генри	Гн
Мощность	ват	Вт	сила света	кандела	кд
Частота колебаний	герц	Гц	световой поток	люмен	лм
Термодинамическая температура, разница температур	кельвін	К	освещенность	люкс	лк
Теплота (количество теплоты)	джауль	Дж	поток излучения, доза излучения (поглощение дозы излучения)	грей	Гр
Количество вещества	моль	моль	активность изотопа	беккерель	Бк
Электрический заряд	кулон	Кл			

2. Множители и приставки для образования десятичных, кратных и частичных единиц

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
Экса	Э	10^{18}	Деци	д	10^{-1}
Петта	П	10^{15}	Санти	с	10^{-2}
Тера	Т	10^{12}	Милли	м	10^{-3}
Гига	Г	10^9	Микро	мк	10^{-6}
Мега	М	10^6	Нано	н	10^{-9}
Кило	к	10^3	Пико	п	10^{-12}
Гекто	г	10^2	Фемто	ф	10^{-15}
Дека	да	10^1	Атто	а	10^{-18}

3. Внесистемные единицы, допущенные к применению наравне с единицами СИ

Величина	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
	атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Объём, ёмкость	литр	л	10^{-3} м ³
Плоский угол	градус	... °	$1,74 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	... '	$2,91 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	... "	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
Работа, энергия	электрон-вольт	эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
	процент	%	10^{-2}
Температура	градус Цельсия	°C	$1 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$

**4. Основные физические постоянные
(округлённые значения)**

Физическая постоянная	Обозначение	Числовые значения
Ускорение свободного падения	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с}^2)$
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/ К}$
Объём грамм-молекулы идеального газа при нормальных условиях	V_0	$22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Заряд электрона	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Первая константа Вина	b_1	$2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}$
Вторая константа Вина	b_2	$1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$
Приведенная постоянная Планка	\hbar	$1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$
Постоянная Ридберга	R_∞	$1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Радиус первой боровской орбиты	r_B	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Комптоновская длина волны электрона	λ_k	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Первый потенциал ионизации	$\Delta\Phi_{\text{ион}}$	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} (13,6 \text{ еВ})$
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерный магнетон	μ_N	$5,05 \cdot 10^{-27} \text{ А}\cdot\text{м}^2$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$

5. Коэффициент Стьюдента, $t_{\text{ст}}$

Количество измерений n	Коэффициент доверительной вероятности α		
	0,90	0,95	0,99
2	6,31	12,70	63,70
3	2,92	4,30	9,92
4	2,35	3,18	5,84
5	2,13	2,78	4,60
6	2,02	2,57	4,03
7	1,94	2,45	3,71
8	1,89	2,36	3,50
9	1,86	2,31	3,36
10	1,83	2,26	3,25

6. Соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ

Единицы пространства и времени. Единицы механических величин	
Длина	1 ангстрём (\AA) = $10^{-10} \text{ м} = 10^{-8} \text{ см}$
Время	1 сутки = 86 400 с 1 год = 365,25 суток = $3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$
Плоский угол	$1^\circ = \pi / 180 \text{ рад} = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ $1' = \pi / 108 \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ $1'' = \pi / 648 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$
Объём, ёмкость	$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3 = 10^3 \text{ см}^3$
Масса	$1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$ $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Сила	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
Работа, энергия	$1 \text{ кгс} \cdot = 9,81 \text{ Дж}$ $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ $1 \text{ еВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Единицы пространства и времени. Единицы механических величин	
Мощность	$1 \text{ л.с} = 736 \text{ Вт}$
Давление	$1 \text{ кг/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$ $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ $1 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Мощность (механическая)	$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \cdot 10^6 \text{ Па}$
Частота вращения	$1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$ $1 \text{ об/хв.} = 1/60 \text{ с}^{-1}$
Волновое число	$1 \text{ см}^{-1} = 100 \text{ м}^{-1}$
Единицы величин молекулярной физики и термодинамики	
Концентрация частиц	$1 \text{ см}^{-3} = 10^6 \text{ м}^{-3}$
Теплота (количество теплоты)	$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$ $1 \text{ ккал} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}$
Единицы световых и магнитных величин	
Электрический момент диполя	$1 \text{ D} = 3,34 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$
Удельное электрическое сопротивление	$1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Магнитная индукция	$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$
Магнитный поток	$1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$
Мощность магнитного поля	$1 \text{ E} = \frac{10^3}{4\pi} \frac{\text{A}}{\text{м}} = 79,6 \text{ А/м}$
Единицы световых величин и величин эргетической фотометрии	
Освещенность	$1 \text{ фот} = 10^4 \text{ лк}$

7. Плотность вещества

Твердые вещества	Плотность $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Жидкости	Плотность $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$
Алмаз	3,5	Бензол	0,88
Вольфрам	19,1	Вода	1,00
Графит	1,6	Керосин	0,80
Золото	19,3	Глицерин	1,26
Кадмий	8,65	Касторовое масло	0,90
Кобальт	8,9	Ртуть	13,6
Корка	0,20	Спирт	0,79
Лёд	0,916	Тяжелая вода	1,1
Молибден	10,2	Эфир	0,72
Натрий	0,97	Газы (при нормальных условиях)	Плотность $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$
Никель	8,9	Азот	1,25
Олово	7,4	Аммиак	0,77
Платина	21,5	Водород	0,09
Свинец	11,3	Воздух	1,293
Титан	4,5	Кислород	1,43
Уран	19,0	Метан	0,72
Фарфор	2,3	Углекислый газ	1,98
Цинк	7,0	Хлор	3,21

8. Скорость звука v , м/с

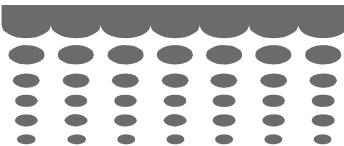
Вещество	v	Вещество	Скорость v продольной волны	
			в стержнях	в неограниченной среде
Газы в нормальных условиях			Твёрдые тела ($t = 20^\circ\text{C}$)	
Азот	333,63	Алюминий	5080	6260
Водород	1286,0	Эбонит	1570	2405
Углекислый газ	260,3	Латунь	3490	4430
Гелий	965,0	Медь	3710	4700
Кислород	314,84	Никель	4785	5630
Воздух сухой	331,46	Свинец	1200	2160
Жидкости		Стекло кварцевое	5370	5570
Бензол	1 295	Серебро	2640	3600
Вода ($t = 0^\circ\text{C}$)	1 407	Сталь	5050	6100
Вода ($t = 20^\circ\text{C}$)	1 482	Цинк	3810	4170

9. Показатели преломления n
(средние для видимого излучения)

Вещество	n	Вещество	n
Алмаз	2,42	Воздух	1,00029
Вода ($t = 20^\circ\text{C}$)	1,33	Сероводород	1,63
Кварц	1,54	Скипидар ($t = 20^\circ\text{C}$)	1,47
Лёд ($t = -4^\circ\text{C}$)	1,31	Стекло	1,50
Бензол	1,60	Глицерин	1,470

10. Плотность и модуль Юнга металлов

Металл	Плотность, $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Модуль Юнга, ГПа
Алюминий	2,7	70
Железо	7,8	200
Медь	8,9	130
Серебро	10,5	83



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Основные обозначения физических величин	5
План организации учебного процесса.....	6
Предметный указатель.....	8
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЯДРО (аудиторный лекционный материал и материал для самостоятельного изучения).....	9
КОЛЕБАНИЯ	9
1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ.....	9
1.1. Понятие свободных незатухающих и затухающих колебаний.....	9
1.2. Дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний и его решение	9
1.3. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях	11
1.4. Полная энергия гармонических колебаний	12
1.5. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний и его решение.....	12
1.6. Характеристики затуханий	13
Методические указания	14
Контрольные вопросы	16
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ	17
2.1. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.....	17
2.2. Амплитудные характеристики, условие резонанса, добротность колебательной системы	18
2.3. Фазовые характеристики	20
Методические указания	21
Контрольные вопросы	22

3. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ	23
3.1. Задача сложения колебаний	23
3.2. Векторная диаграмма	23
3.3. Сложение колебаний одинаковой частоты, происходящих по одной оси	24
3.4. Сложение колебаний одинаковой амплитуды и мало различающиеся частоты. Биения.....	25
3.5. Сложение колебаний одинаковой частоты, происходящих по двум взаимно перпендикулярным осям.....	26
Методические указания	28
<i>Контрольные вопросы</i>	29
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	30
4.1. Свободные незатухающие электрические колебания	30
Методические указания	33
4.2. Затухающие электрические колебания	34
Методические указания	36
4.3. Электрические вынужденные колебания (<i>для самостоятельного изучения</i>)	37
Методические указания	39
5. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК (<i>для самостоятельного изучения</i>)	41
5.1. Вынужденные колебания силы тока.....	41
5.2. Закон Ома для переменного тока.....	42
5.3. Падение напряжения на элементах цепи переменного тока.....	44
5.4. Векторная диаграмма для падения напряжения	46
5.5. Потери в цепи переменного тока	47
<i>Контрольные вопросы</i>	49
ВОЛНЫ	50
6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ	50
6.1. Возникновение волны, продольные и поперечные волны.....	50
6.2. Характеристики волны	50
6.3. Уравнение плоской волны	52
6.4. Уравнение сферической волны.....	54

6.5. Волновое уравнение	54
6.6. Стоячие волны	55
6.7. Ударная волна	56
Методические указания	57
<i>Контрольные вопросы</i>	58
7. СКОРОСТЬ И ЭНЕРГИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ	59
7.1. Фазовая скорость волны	59
7.2. Групповая скорость волны	60
7.3. Энергия упругой волны, плотность потока энергии.....	62
7.4. Элементы акустики, эффект Доплера	64
Методические указания	66
<i>Контрольные вопросы</i>	67
ОПТИКА	68
8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА	69
8.1. Интерференция света в тонких плёнках	74
Методические указания	78
<i>Контрольные вопросы</i>	79
9. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА	81
Методические указания	87
<i>Контрольные вопросы</i>	88
10. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА	89
Методические указания	92
<i>Контрольные вопросы</i>	92
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	93
Примеры решения задач	93
Задачи для самостоятельного решения	118
Колебания	118
Волны	121
Оптика	123
ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	129
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	129
Лабораторная работа 3—1	129

Лабораторная работа 3—2	135
Лабораторная работа 3—3	138
ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	140
Лабораторная работа 3—1В	140
Лабораторная работа 3—2В	144
Лабораторная работа 3—3В	148
Лабораторная работа 3—4В	152
Лабораторная работа 3—5В	154
Лабораторная работа 3—6В	163
МОДУЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ	166
1. Вопросы для модульного контроля и текущего письменного тестирования (теоретический материал).....	166
2. Вопросы для текущего компьютерного тестирования	167
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	184
СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ	185

Навчальне видання

КУЛІШ Віктор Васильович
СОЛОВЙОВ Андрій Миколайович
КУЗНЕЦОВА Олена Яківна
ДЕНІСОВ Едуард Сергійович
ГОЖЕНКО Віктор Вікторович
НЕТРЕБА Жанна Миколаївна
САКУН Тетяна Миколаївна

ФІЗИКА

КРЕДИТНО-МОДУЛЬНА СИСТЕМА

Навчальний посібник
для іноземних студентів інженерних спеціальностей

У чотирьох модулях

Модуль 3

КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ. ОПТИКА

(Російською мовою)

Редактор А. В. Бородавко
Технічний редактор А. І. Лавринович
Коректор Л. М. Романова
Комп'ютерна верстка Л. Т. Колодіної

Підп. до друку 10.09.13. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 11,39. Обл.-вид. арк. 12,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 157-1.

Видавець і виготовник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002