

MODERN PHYSICS FOR ENGINEERS
(Coursebook)

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ
(учебно-методическое издание)

Варшава 2015

УДК 530
ББК 22.3
С 56

Рецензенты:

А.М. Петченко – доктор физико-математических наук, профессор ХНАГХ

В.П. Сонов – доктор технических наук, профессор ХНУСА

В.П. Леонов – доктор философских наук, профессор ХНУСА

С 56

«Современная физика для инженеров». Разделы «Колебания и волны», «Оптика», «Атомная и ядерная физика»: [Текст]: учебно-методическое издание/ С.О. Даньшева, А.М. Корсунский, Г.Н. Подус, Е.В. Полупан. – Варшава: «Diamond trading tour», 2015. - 49 стр.

ISBN: 978-83-65207-55-5

В книге в доступной форме изложен теоретический материал по разделам "Колебания и волны", "Оптика", "Атомная и ядерная физика", при изложении которого учтены новые достижения современной физической науки. Большинство рассмотренных в пособии физических понятий, законов и явлений сопровождаются примерами их использования в технике, упражнениями и иллюстрациями. Издание рассчитано на широкий круг студентов инженерных специальностей.

Written in an accesible way, the present coursebook provides theoretical material on such topics as "Oscillation and Waves", "Optics", "Nuclear and Quantum Physics" and takes into account the latest achievements of physical science. Most physical notions, laws and phenomena are accompanied by examples of their practical use in technology, exercises and illustrations. The coursebook is addressed to a wide circle of engineering students.

УДК 530
ББК 22.3

© С.О. Даньшева, А.М. Корсунский,
Г.Н. Подус, Е.В. Полупан

© «Diamond trading tour»

ISBN: 978-83-65207-55-5

**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

С.О. Даньшева, А.М. Корсунский, Г.Н. Подус, Е.В. Полупан

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ

**Разделы «Колебания и волны», «Оптика»,
«Атомная и ядерная физика»**

**Варшава
2015**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ.....	6
1. КОЛЕБАНИЯ.....	7
1.1. Основные характеристики колебательных процессов	7
1.2. Гармонические колебания.....	7
1.3. Гармонический осциллятор	8
1.4. Классификация колебаний.....	8
1.5. Таблица аналогий для механических и электромагнитных колебательных систем.....	8
1.6. Уравнение свободных затухающих колебаний.....	8
1.7. Добротность колебательной системы	10
1.8. Вынужденные колебания	11
1.9. Решение дифференциального уравнения	11
1.10. Резонанс	12
1.11. Резонансные кривые, полоса пропускания.	12
1.12. Примеры учета и использования механических вынужденных колебаний в строительной индустрии	13
2. ВОЛНЫ	14
2.1. Стоячие волны.....	15
3. ЯВЛЕНИЯ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПРИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ.....	18
3.1. Эффект Доплера	18
3.2. Интерференция волн.....	18
3.3. Примеры практического применения интерференции.....	18
3.4. Дифракция волн.....	19
3.5. Примеры наблюдения дифракции и ее практическое применение...	20
4. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С НЕКОТОРЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ.....	21
4.1. Дисперсия света	21
4.2. Поляризация света. Закон Малюса	21
4.3. Двойное лучепреломление	22
4.4. Закон Брюстера	23
4.5. Пример практического применения поляризации в строительной индустрии.....	23
5. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ.....	25
5.1. Тепловое излучение	25
5.2. Законы теплового излучения	26
5.3. Фотоэффект	27

5.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.....	27
5.5. Красная граница фотоэффекта.....	27
5.6. Эффект Комптона	28
5.7. Примеры практического применения законов теплового излучения и фотоэффекта в строительстве.....	28
6. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ.....	30
6.1. Строение атома.....	32
6.2. Атомные спектры	33
6.3. Квантовые числа	34
6.4. Спин электрона	35
6.5. Лазеры	35
6.6. Свойства излучения лазеров, используемые в практических целях .	37
6.7. Применение лазеров в строительстве	37
7. АТОМНОЕ ЯДРО.....	38
8. РАДИОАКТИВНОСТЬ.....	41
8.1. α -излучение	41
8.2. β -излучение	42
8.3. γ -излучение	43
8.4. Законы сохранения	43
8.5. Скорость распада и период полураспада	43
8.6. Строительные материалы как фактор радиационного действия.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОСТИЖЕНИЙ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А	47
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	48



ВСТУПЛЕНИЕ

«Современная физика для инженеров» это учебно-методическое пособие, предназначенное для студентов, которые проходят подготовку по направлению «строительство и архитектура». Издание содержит краткое изложение основных теоретических положений следующих разделов физики: колебания и волны, оптика, атомная и ядерная физика, а также ряд примеров поясняющих излагаемый материал.

В предлагаемом студентам конспекте лекций отражены некоторые разделы физики, которые на первый взгляд не нужны строителям (например, тема «корпускулярно-волновой дуализм»). Это сделано по следующим причинам:

1. Прогресс строительной техники, создание новых материалов не дает возможности предположить, какие физические сведения в ближайшее время будут необходимы специалистам.

2. Физика является одним из важнейших элементов общечеловеческой культуры, дающая общее понимание, как устроен мир. Поэтому и приведены некоторые сведения, не имеющие прямого отношения к профессии строителя расширяющие мировоззрение.

Безусловным достоинством учебного пособия является то, что в нем теоретическая информация сопровождается примерами практического применения физических законов и явлений в инженерно-технической деятельности. Кроме того, текст сопровождается большим количеством иллюстраций, примеров, приложений. Такой подход позволяет студентам осознать необходимость овладения фундаментальными знаниями по физике, что повышает мотивацию изучения физики и, как следствие, качество подготовки.

Важно, что уровень математического аппарата, используемый при изложении материала, находится в рамках университетского курса высшей математики для инженерных специальностей, что обеспечивает коррекцию уровня пособия с уровнем подготовленности студентов.

По мнению авторов, приведенный в пособии материал, последовательность его преподавания, справочные данные могут быть полезны широкому кругу молодежи, которая обучается техническим специальностям.

1. КОЛЕБАНИЯ

Колебания независимо от их природы (механические, электромагнитные и т.д.) представляют собой периодический процесс выхода объекта или системы из состояния равновесия и возврата в это состояние. При этом процессе происходит трансформация энергии из одного вида в другой (кинетической в потенциальную и наоборот при механических колебаниях, электрической в магнитную и наоборот при электромагнитных колебаниях и т.д.).

Точка в колебательном процессе, в которой заканчивается выход системы из состояния равновесия и начинается возврат в это состояние, называется точкой поворота. В точке, соответствующей состоянию равновесия, и в точках поворота один из видов энергии, присутствующих в данном колебательном процессе, всегда равен нулю.

1.1. Основные характеристики колебательных процессов

Амплитуда (A) – это максимально возможное смещение от положения равновесия в данном процессе.

1. Частота (ν) – это количество колебаний за единицу времени. Измеряется в герцах. (1 Гц – 1 колебание за 1 секунду). Круговая или циклическая частота (ω). $\omega = 2\pi\nu$.

2. Период (T) – время 1 полного колебания. $T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$.

3. S – обобщенная координата, принимающая значения от $+A$ до $-A$.

1.2. Гармонические колебания

Колебания, в которых зависимость смещения из положения равновесия от времени описывается функциями синуса или косинуса, называются *гармоническими*. Любое негармоническое (ангармоническое) колебание можно всегда представить с помощью соответствующего набора гармонических колебаний.

Гармонические колебания часто встречаются в науке и технике. Примеры гармонических колебаний: колебания пружинного маятника, периодическое изменение электрических величин (заряда Q , тока I , напряжения U) в колебательном контуре.

Аналитически гармонические колебание имеют вид:

$$S = A \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right)$$

или

$$S = A \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos(2\pi\nu t + \varphi_0) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right)$$
(1.1)

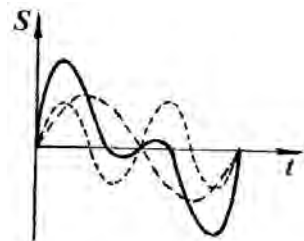


Рисунок 1 – виды колебаний

где S или x – смещение от положения равновесия (пружинный маятник) или заряд на обкладках конденсатора (колебательный контур). φ_0 – начальная фаза колебаний. Возможны и другие варианты колебательного движения.

Выбор зависимости $S = S(t)$ определяется граничными условиями.

1.3. Гармонический осциллятор

Гармонический осциллятор – это колебательная система, в которой в любой момент времени ее потенциальная энергия пропорциональна квадрату смещения от положения равновесия ($W_n \sim x^2$). Примеры гармонического осциллятора – пружинный, физический, математический маятники, колебательный контур. Гармоническим осциллятором может считаться только система, совершающая *малые колебания*. Колебания любой системы могут считаться малыми до тех пор, пока их амплитуда намного меньше тех значений амплитуд, которые, в принципе, возможны в данной системе. Например, для математического маятника амплитуда малых колебаний значительно меньше длины нити. Полная энергия гармонического осциллятора всегда пропорциональна квадрату амплитудного значения колеблющейся величины.

1.4. Классификация колебаний

В зависимости от характера взаимодействия колебательной системы с окружающей средой колебания могут быть свободными и вынужденными. Вынужденными называются колебания, происходящие в результате внешнего периодического воздействия на систему.

Если внешнее воздействие равно нулю, то колебания являются свободными.

Свободные колебания, амплитуда которых уменьшается со временем, называются затухающими. Свободные колебания, амплитуда которых не зависит от времени (т.е. постоянная), являются незатухающими.

Частота, с которой система совершает свободные незатухающие колебания, называется частотой собственных колебаний или собственной частотой данной системы (ν_0 или $\omega_0 = 2\pi\nu_0$).

1.5. Таблица аналогий для механических и электромагнитных колебательных систем

Несмотря на то, что физическая природа колебательного движения гармонических осцилляторов может быть разной, они описываются одноподобными математическими уравнениями. Аналогия между механическими и электромагнитными колебаниями представлена в таблице 1. (Для простоты принято $\varphi_0 = 0$).

1.6. Уравнение свободных затухающих колебаний

В случае механических колебаний дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.2)$$

где x – смещение системы от положения равновесия;

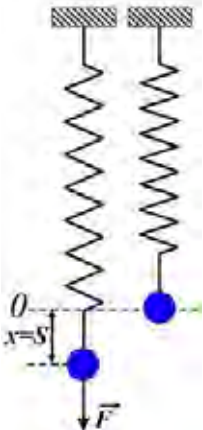
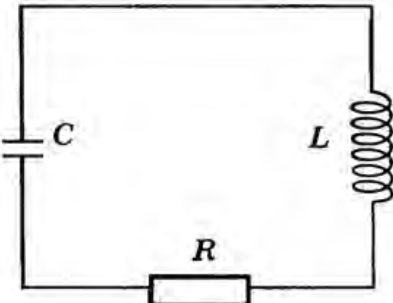
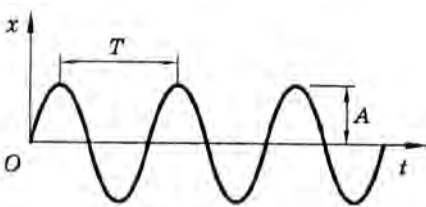
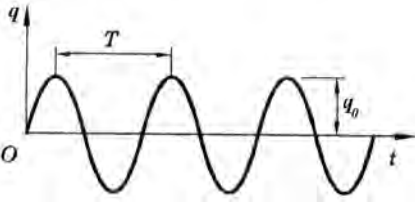
δ – коэффициент затухания, характеризующий скорость уменьшения энергии при данном колебательном процессе.

ω_0 – собственная частота системы

Решение дифференциального уравнения (1.2):

$$x = A_0 e^{-\delta t} \sin \omega t \quad \text{или} \quad x = A_0 e^{-\delta t} \cos \omega t ; \quad \omega \neq \omega_0. \quad (1.3)$$

Таблица 1.

Механическая система (пружинный маятник)	Электромагнитная система (колебательный контур)
	
$x = A \sin \omega t$  скорость: $v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t$; ускорение: $a = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \sin \omega t$; потенциальная энергия: $W_n = \frac{kx^2}{2}$; кинетическая энергия: $W_k = \frac{mv^2}{2}$; период колебаний: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$; коэффициент сопротивления: r.	 сила тока: $I = \frac{dq}{dt} = q_m \cos \omega t$; $\frac{d^2q}{dt^2} = -q_m \omega^2 \sin \omega t$; электрическая энергия: $W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$; магнитная энергия: $W_m = \frac{LI^2}{2}$; период колебаний: $T = 2\pi \sqrt{LC}$; электрическое сопротивление: R.

При $\delta = 0$ – колебания незатухающие, и $\Omega = \Omega_0$.

Для свободных гармонических колебаний в колебательном контуре в уравнение (1.2) вместо x следует подставить q – значение заряда на обкладках конденсатора, а вместо A – максимальное (амплитудное) значение заряда q_m .

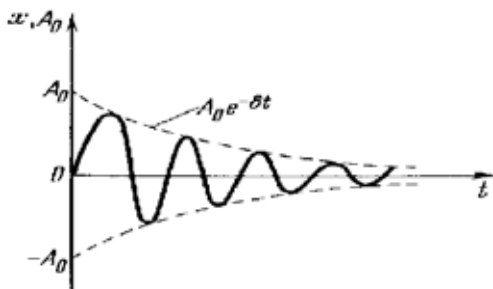


Рисунок 2 – свободные затухающие колебания

1.7. Добротность колебательной системы

Добротность (Q) – это важнейшая характеристика любой колебательной системы, определяемая потерями энергии за время, равное периоду колебаний

$$Q = 2\pi \frac{W_t}{W_t - W_{t+T}},$$

где W_t – энергия системы в момент времени t ,

W_{t+T} – энергия системы через промежуток времени, равный периоду колебаний.

Так как добротность характеризует потери энергии в колебательных системах, то она, естественно, связана с коэффициентом затухания δ :

$$Q = \frac{\pi}{\delta T_0},$$

где T_0 – период собственных колебаний системы.

Понятием добротности удобно пользоваться для характеристики электромагнитных колебательных систем. Для характеристики механических колебательных систем чаще пользуются величиной, обратной добротности, которая называется «внутреннее трение»:

$$Q^{-1} = \frac{\delta T_0}{\pi}$$

Для оценки потерь в колебательных системах также используется понятие «логарифмический декремент затухания Ω », который равен:

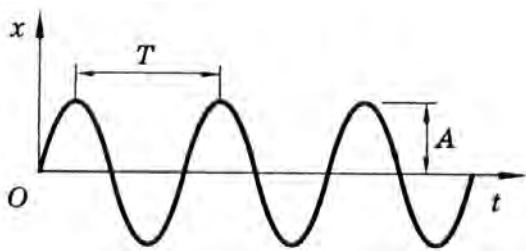


Рисунок 3 – незатухающие колебания

Таблица 2.

Примеры значений ω_0 и δ для механического и электромагнитного гармонических осцилляторов

Пружинный маятник		Колебательный контур	
ω_0	δ	ω_0	δ
$\sqrt{\frac{k}{m}}$	$\frac{r}{2m}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{R}{2L}$

$$\Omega = \ln \frac{A_t}{A_{t+1}} = \delta T,$$

где A_t – амплитуда затухающих колебаний в момент времени t ,
 A_{t+1} – амплитуда колебаний, через промежуток времени, равный T .

1.8. Вынужденные колебания

Для получения незатухающих колебаний нужно компенсировать потери энергии в системе, где происходят колебания.

Т.к. вынужденные колебания происходят в результате внешнего *периодического* воздействия, то, в отличие от дифференциального уравнения, описывающего свободные колебания, в уравнении для вынужденных колебаний должна появиться правая часть в виде периодической функции. Для механических колебаний – это отношение вынуждающей силы к массе, для электромагнитных колебаний – это отношение внешней электродвижущей силы к индуктивности.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_m}{m} \sin \omega t ; \quad \frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{\varepsilon_m}{m} \sin \omega t \quad (1.4)$$

1.9. Решение дифференциального уравнения

Решение уравнения (1.4) для гармонического осциллятора может быть представлено в виде

$$S = A \sin \omega t ; A = A(\omega). \quad (1.5)$$

Механический маятник: $A = \frac{F_m / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} ;$

Колебательный контур: $q_m = \frac{\xi_m / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} ;$

$$I_m = \frac{\xi_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}. \quad (1.6)$$

1.10. Резонанс

Как видно из уравнений (1.5, 1.6), характер вынужденных колебаний существенно зависит от соотношения частот внешнего периодического воздействия и собственной частоты колебательной системы.

При приближении значения частоты внешнего воздействия к значению собственной частоты колебательной системы амплитуды вынужденных колебаний в этой системе растут и при совпадении значений собственной и вынужденной частоты могут достичь очень больших значений (рис. 4). Такое явление называется *резонансом*.

Из формулы (1.6) можно определить резонансную частоту для колебательного контура. При резонансе амплитуда силы тока должна быть максимальной, а для этого нужно, чтобы общее сопротивление контура стало минимальным, т.е.

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0, \text{ отсюда } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \omega_p = \omega_0.$$

Или для периода $T_p = 2\pi \sqrt{LC}$, $T_p = T_0$. Это формула У. Томсона.

1.11. Резонансные кривые, полоса пропускания.

Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия называется резонансной кривой. С помощью такой кривой можно, в частности, графически рассчитать величину добротности колебательной системы.

Область частот внешнего воздействия, при которых амплитуда вынужденных колебаний не меньше 0,7 от максимальной, называется *полосой пропускания* колебательной системы.

Здесь ω_0 – резонансная частота, частоты ω_1, ω_2 определяют границы полосы пропускания, а их разность называется *шириной полосы пропускания*. Пользуясь резонансной кривой можно рассчитать добротность Q колебательной системы по формуле:

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}.$$

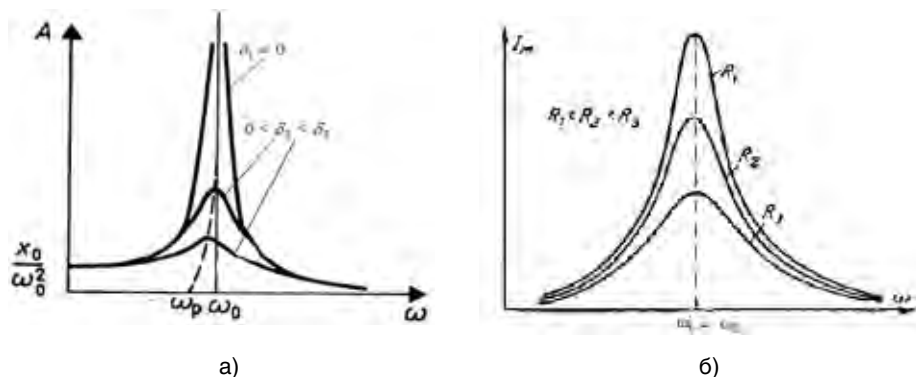


Рисунок 4 – механический (а) и электрический (б) резонансы

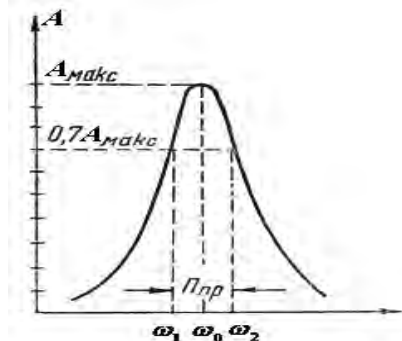


Рисунок 5 – полоса пропускания (Ппр)

1.12. Примеры учета и использования механических вынужденных колебаний в строительной индустрии

Жилые дома, промышленные корпуса, мосты, туннели и т.д. являются колебательными системами, в которых при определенных условиях могут возникнуть вынужденные колебания. Иногда амплитуда вынужденных колебаний становится столь большой, что сооружение может разрушиться, это заставляет учитывать возможность резонанса в механических сооружениях.

В ряде случаев явление резонанса используется для достижения определенного положительного эффекта. Приведем примеры.

1. Вся строительная вибротехника работает, как правило, в резонансном режиме. Например, железобетонные изделия формируются на виброплощадке под действием периодически действующей силы, определяющей интенсивность вибраций. Безопасная продолжительность работы с пневматическим отбойным молотком и другой вибротехникой зависит от амплитуды вибрации, влияние которой подвержены, например, руки оператора.

2. При изучении и контроле процесса отверждения бетонов различных классов по прочности, используются такие характеристики, как логарифмический декремент затухания Q (при отверждении бетона уменьшается) и собственная частота колебаний ω_0 (при отверждении бетона увеличивается).

2. ВОЛНЫ

Распространение колебаний в пространстве называется волновым процессом или волной. Распространение в пространстве механических и электромагнитных колебаний приводит к возникновению соответственно механических и электромагнитных волн. Механические волны могут распространяться только в упругой среде, электромагнитные могут распространяться и в вакууме.

Основные характеристики непрерывной волны:

Высшие точки волнового движения называются пучностями или гребнями, низшие точки – впадинами.

Максимальная высота пучности или максимальная глубина впадины относительно нулевого уровня называется амплитудой волны (A).

Число гребней, проходящих через данную точку за единицу времени, называется частотой волны (ω).

Расстояние между двумя соседними пучностями, а также между любыми последовательными одинаковыми по высоте точками называется длиной волны (λ).

Время, за которое гребень проходит расстояние, равное длине волны, называется периодом (T).

Отношение $\frac{\lambda}{T}$ или произведение λv называется фазовой скоростью волны (v_{ϕ}).

Отношение $\frac{\omega}{v_{\phi}} = \frac{2\pi}{\lambda}$ называется волновым числом (k).

Механические волны – механические деформации, распространяющиеся в упругой среде, например, звуковые волны, волны упругости и т.д.

Уравнение бегущей механической волны:

$$x = A \sin \left[\omega \left(t - \frac{l}{v_{\phi}} \right) + \varphi_0 \right] = A \sin(\omega t - kl), \quad \text{где } x - \text{смещение частиц среды,}$$

φ_0 – начальная фаза, l – расстояние от источника колебаний.

Непрерывные бегущие механические волны могут быть продольными и поперечными.

Продольными волнами называются волны, у которых колебания происходят вдоль направления их распространения.

Поперечными называются волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения (рис. 7).

В любой волне геометрическое место точек, имеющих одинаковую фазу колебаний, называется волновой поверхностью.

Электромагнитные волны – распространяющееся в пространстве переменное

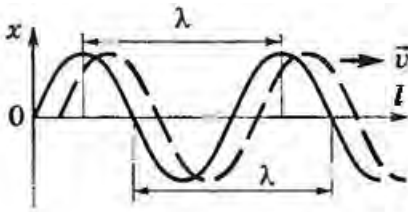


Рисунок 6 – график бегущей волны («мгновенная фотография волны»)

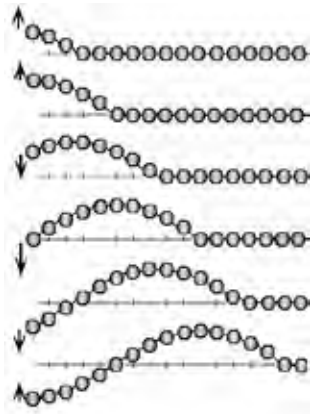


Рисунок 7 –
распространение волны



Рисунок 8 – поперечная (а) и продольная (б) волны

электромагнитное поле. Графически плоскую электромагнитную волну можно изобразить следующим образом (рис. 9):

На этом рисунке $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, $\vec{B}$ – индукция магнитного поля, λ – длина электромагнитной волны. λ может меняться от 10^4 м до 10^{-12} м. Электромагнитные волны могут быть только поперечными. Учение об электромагнитных волнах длиной $(7,7 \div 4) \cdot 10^{-7}$ м называется волновой оптикой. Химическое и биологическое действие электромагнитных волн определяется напряженностью $\vec{E}$ (световым вектором).

Уравнение плоской электромагнитной волны приведено в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, механические и электромагнитные волны описываются похожими уравнениями, хотя процессы, происходящие при их распространении, разные. Отметим, что приборы фиксируют только средние значения интенсивности электромагнитных волн.

2.1. Стоячие волны

На пути распространения непрерывной бегущей волны может находиться препятствие. В результате взаимодействия с таким препятствием волна отражается, т.е. начинает распространяться в противоположном направлении. При этом она встречается с той своей частью, которая еще не достигла препятствия и движется в

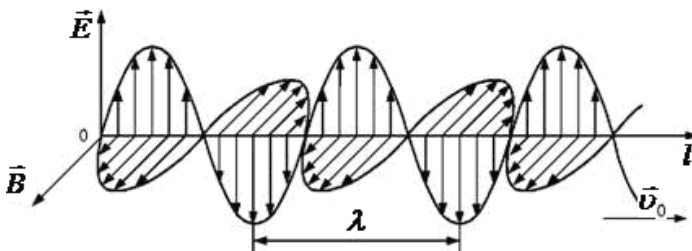


Рисунок 9 – электромагнитная волна

Таблица 3.

Аналогии характеристик волн

Механические волны	Электромагнитные волны
Дифференциальное (волновое) уравнение	
$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 x}{\partial l^2} = 0$	$\frac{\partial^2 E_z}{\partial l^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 B_y}{\partial l^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2} = 0$
Решение дифференциального уравнения (уравнение волны)	
$x = A \sin(\omega t - kl)$	$E_z = E_{mz} A \sin(\omega t - kl); \quad B_y = B_{my} A \sin(\omega t - kl)$
$x = A \cos(\omega t - kl)$	$E_z = E_{mz} A \cos(\omega t - kl); \quad B_y = B_{my} A \cos(\omega t - kl)$
Плотность энергии в данной точке вакуумного пространства $\omega = \frac{W}{V}$	
$\omega = \rho v_{кол}^2$ $\omega = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2}$	$\omega = \varepsilon_0 E^2$ $\omega = \frac{\varepsilon_0 E_m^2}{2}$
Плотность потока энергии ($\frac{1}{S} = \frac{dW}{dt}$)	
$\vec{P} = \omega \vec{v}_\phi$ – вектор Умова	$\vec{S} = \varepsilon_0 c^2 [\vec{E} \cdot \vec{B}] = \omega \vec{c}$ – вектор Пойнтинга
Интенсивность волны	
$I = \vec{P} _{cp} = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} v_\phi$ X, Y, Z – координаты	$I = \vec{S} _{cp} = \varepsilon_0 c \frac{E_m^2}{2}$

первоначальном направлении. Такая встреча волн приводит к их наложению друг на друга и образованию так называемой стоячей волны. Строго говоря это не волна, а особое колебательное состояние системы.

Если уравнение «прямой» волны: $X_1 = A \cos(\omega t - kl)$, то уравнение «обратной» волны: $X_1 = A \cos(\omega t + kl)$, то уравнение стоячей волны имеет вид (рис.10):

$$X = X_1 + X_2 = 2A \cos kl \cdot \cos \omega t = A_{cm} \cos \omega t, \quad A_{cm} = 2A \cos kl,$$

где A_{cm} – амплитуда стоячей волны.

Рассмотренный случай соответствует отражению бегущей волны от менее плотной среды. При отражении от более плотной среды $A_{cm} = 2A \sin kl$.

Колебательные системы, в которых могут образовываться стоячие волны, называются системами с распределенными параметрами. Частоты образуемых стоя-

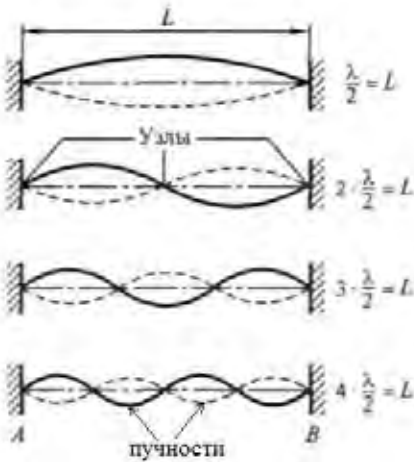


Рисунок 10 – стержень закреплен у концов

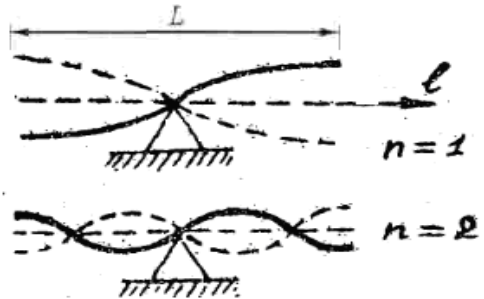


Рисунок 11 – стержень закреплен посередине

чих волн принимают дискретные значения, называемые собственными частотами системы. (Дискретные характеристики широко используются при описании свойств микрочастиц).

В качестве примера рассмотрим стоячие волны в стержне длиной L , закрепленном или на концах (рис.10), или в центре (рис.11). В закрепленном месте стержня всегда существует узел стоячей волны, на концах закрепленного в центре стержня образуются пучности стоячей волны.

На длине стержня укладывается целое число волн. В первом случае $L = n \frac{\lambda}{2}$, во втором – $L = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$. Соответственно частота собственных колебаний $\nu_{\text{соб}} = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{\nu n}{2L}$ в первом случае, $\nu_{\text{соб}} = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{\nu(2n + 1)}{2L}$ во втором.

В этих формулах n – число стоячих волн укладывающихся на стержне, равное числу собственных колебаний. $n = 1, 2, 3 \dots$ или $n = 0, 1, 2 \dots$

В отличие от бегущих волн, стоячая волна не переносит энергию.

3. ЯВЛЕНИЯ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПРИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ

3.1. Эффект Доплера

Если источник, излучающий волну длиной λ_0 и фазовой скоростью v_ϕ движется с некоторой скоростью v относительно наблюдателя, то наблюдатель воспринимает волну длиной не λ_0 , а измененную λ , связанную с λ_0 соотношением:

$$|\lambda - \lambda_0| = \frac{v}{v_\phi} \lambda_0,$$

причем при приближении к наблюдателю λ уменьшается, а при удалении от наблюдателя λ увеличивается.

3.2. Интерференция волн

Перераспределение энергии волн в пространстве, которое приводит к увеличению амплитуды в одних местах пространства и уменьшению амплитуды в других называется интерференцией волн. Такое явление возможно только при наложении друг на друга двух и более когерентных волн. Когерентными называются волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз. $\omega_1 = \omega_2$, $\Delta\phi \neq \phi(t)$.

Условие максимума в точке С (рис. 12а): $\Delta = 2n \frac{\lambda}{2}$, условие минимума:

$$\Delta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

Наблюдать интерференцию механических волн можно на поверхности воды, если по ней ударить одновременно двумя штырями, закрепленными на планке, перпендикулярно ее поверхности. Когерентных световых волн в природе не существует. Для их получения используются либо методы расщепления естественного света на 2 пучка (отражение, двойное лучепреломление и т.д. рис. 12б), либо лазерное излучение.

3.3. Примеры практического применения интерференции

- Интерферометры – устройства для точного (до 10^{-7} м) измерения длин, выявления и измерения микронеровностей, определения примесей малой концентрации;

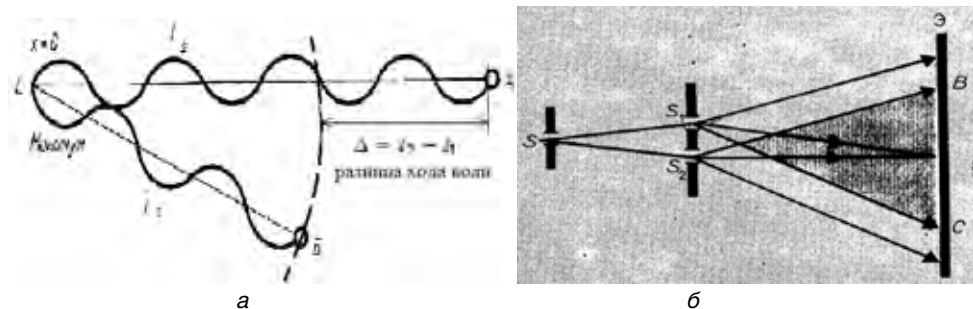


Рисунок 12 (а) – когерентные волны, 12(б) – схема наблюдения интерференции световых волн (опыт Юнга)

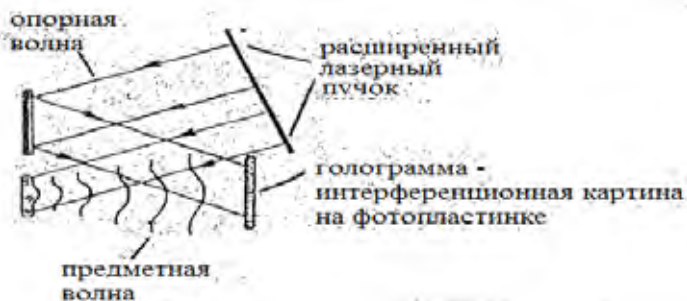


Рисунок 13 – схема, иллюстрирующая получение голограммы по Габору

- в строительстве: изучение распределения напряжений в моделях фрагментов строительных сооружений, изучение на моделях распределения температур в помещениях по разности в показателях преломления определяемой с точностью до 7-го знака после запятой при помощи газового интерферометра;

- голография – метод получения изображения объекта, основанный на интерференции волн. Суть метода: на фотопластинку одновременно с волной от источника света, рассеянной объектом («сигнальная» или «предметная» волна), направляют волну непосредственно от того же источника света («опорная» волна). Возникающая при интерференции этих волн картина (голограмма), содержащая полную информацию об объекте, фиксируется на светочувствительной поверхности. После этого при облучении голограммы или ее участка тот же опорной волной можно увидеть объемное изображение объекта (голограмма по Габору). Используя две опорных волны, падающую на предмет и отраженную от него, после прохождения через фотопластинку (фотопластинка освещается с разных сторон) можно получить изображение, видимое в белом свете (голограмма по Денисюку).

- Просветление оптики – уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на нее специальной пленки (световые волны, отраженные от нижней и верхней поверхности пленки гасят друг друга). (Используется при изготовлении солнечных батарей).

- Голографическая интерферометрия – метод исследования распределения напряжений в твердых телах, в том числе и в моделях строительных конструкций.

3.4. Дифракция волн

Явление дифракции состоит в том, что при распространении волна может отклоняться от направления своего распространения, огибая препятствия, находящиеся на ее пути. Такое огибание может происходить только на препятствиях, размеры которых *соизмеримы с длиной волны*. В результате дифракции возникает интерференционная картина.

Для объяснения явления дифракции служит принцип Гюйгенса-Френеля. Согласно этому принципу каждая точка фронта волны служит точечным источником, излучающим элементарные сферические волны. Все точки фронта колеблются с одинаковыми фазами, поэтому все элементарные волны когерентны и наблюдаемая картина оказывается результатом интерференции этих элементарных волн.

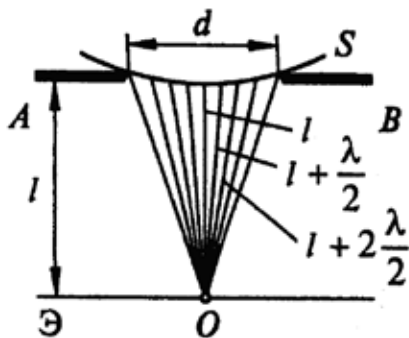


Рисунок 14 – дифракция на отверстии

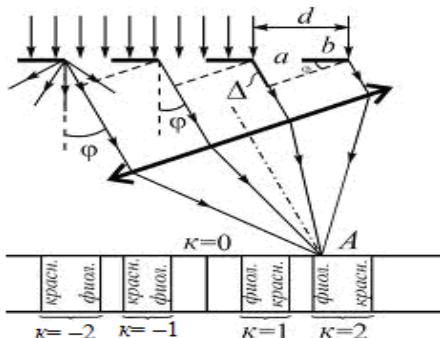


Рисунок 15 – дифракция на решетке

3.5. Примеры наблюдения дифракции и ее практическое применение

Классический пример наблюдения дифракции – прохождение световой волны через маленькое круглое отверстие, когда на экране вместо освещенного круга с четкими границами наблюдается светлый круг с размытыми границами, испещренный чередующимися темными и светлыми полосами. Изменяя диаметр отверстия можно увидеть, что в центре освещенного круга будет появляться и исчезать темное пятно. Объяснил это явление Френель. Он разбил волновой фронт на зоны, так что расстояние от соседних зон до точки наблюдения отличается на полдлины волны (рис. 14). Тогда вторичные волны, приходящие от соседних зон, гасят друг друга. Поэтому, если в отверстии помещается четное число зон, то в центре круга будет темное пятно, если нечетное – светлое.

Дифракционная решетка – пластинка с чередующимися прозрачными и непрозрачными участками.

Условие дифракционных максимумов: $d \sin \varphi = k\lambda$, где λ – длина падающей волны, k – порядок максимума.

Рассмотренные явления присущи всем волновым процессам независимо от природы волн (механические, электромагнитные и т.д.)

Примером практического применения явления дифракции является дифракция рентгеновских лучей на пространственной кристаллической решетке (в этом случае длина рентгеновских лучей $\lambda \sim 10^{-10}$ м оказывается сопоставимой с расстояниями между плоскостями кристаллической решетки). Дифракция при прохождении излучения через периодическую структуру является основой рентгеноструктурного анализа строения кристаллов.

4. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С НЕКОТОРЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

4.1. Дисперсия света

В некоторых веществах скорость распространения электромагнитной волны зависит от длины этой волны. Для световых волн такое явление – дисперсия – приводит к разложению белого света на 7 монохроматических составляющих. Дисперсия света может наблюдаться при его взаимодействии с определенными кристаллами, в тонких масляных пленках, в атмосфере и т.д.

4.2. Поляризация света. Закон Малюса

Как уже упоминалось выше, естественный свет представляет собой поперечную электромагнитную волну, в которой вектор напряженности поля $\vec{E}$ может совершать колебания в любом из направлений, находящихся в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны. Существуют среды, которые обладают свойствами определенным образом упорядочивать колебания вектора $\vec{E}$ (а, следовательно, и магнитного вектора). Процесс такого упорядочивания называется *поляризацией*, а волна, прошедшая такую среду – *поляризованной*. Пример получения поляризованного света представлен на рис.16.

Вещества, которые обладают поляризующими свойствами, называют *поляризаторами* (некоторые растворы, кристаллы). В каждом кристалле существует направление, в котором у света будет минимум поглощения. Такое направление называется *оптической осью*. У поляризаторов правильной геометрической формы оптическая ось совпадает с геометрической. Эффективными поляризаторами являются монокристаллы – твердые тела правильной геометрической формы, состоящие из *одного* химического элемента. Если пропустить естественный свет через такой монокристалл (поляризатор), то на выходе получим поляризованный свет. Если на пути этого поляризованного света поставить точно такой же монокристалл (анализатор), то путем изменения угла между оптическими осями поляризатора и анализатора можно добиться изменения интенсивности света от максимального значения до нуля.

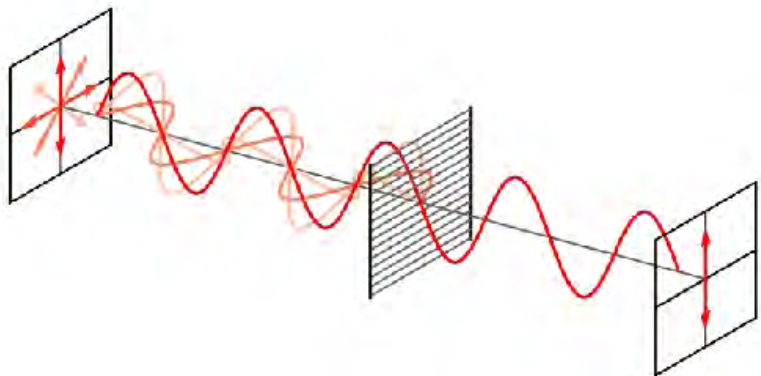


Рисунок 16 – получение поляризованного света

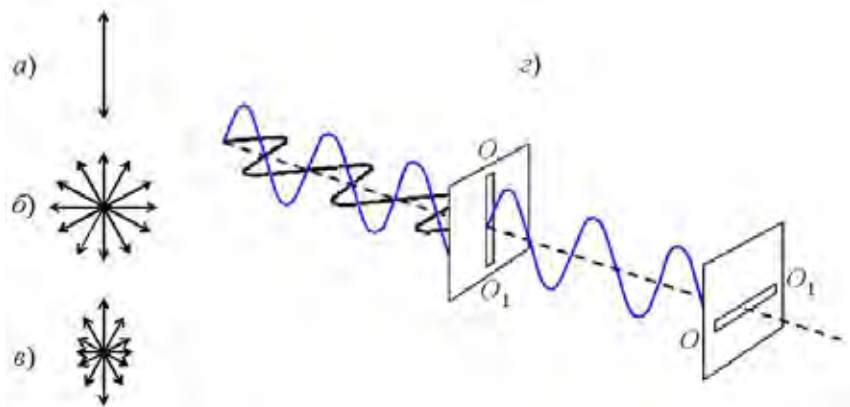


Рисунок 17.

- а) – ориентации светового вектора в плоскости, перпендикулярной световому лучу при линейно-поляризованном свете;
 б) – то же для естественного света;
 в) – то же для частично поляризованного света;
 г) – прохождение луча, состоящего из двух линейно-поляризованных световых волн, через два скрещенных поляризатора с оптической осью OO_1 .

Аналитическая зависимость интенсивности света I от угла между осями поляризатора и анализатора φ носит название «закон Малюса»:

$$I_A = I_n \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_{ест} \cos^2 \varphi, \quad (4.1)$$

где I_A – интенсивность света, прошедшего через анализатор,
 I_n – интенсивность света, прошедшего через поляризатор,
 $I_{ест.}$ – интенсивность естественного света,
 φ – угол между оптическими осями поляризатора и анализатора.

4.3. Двойное лучепреломление

Во многих прозрачных средах скорость распространения света одинакова во всех направлениях. Такие среды называются изотропными. Среды, в

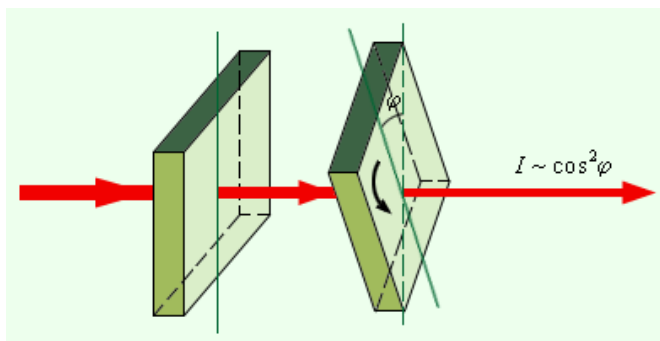


Рисунок 18 – к закону Малюса

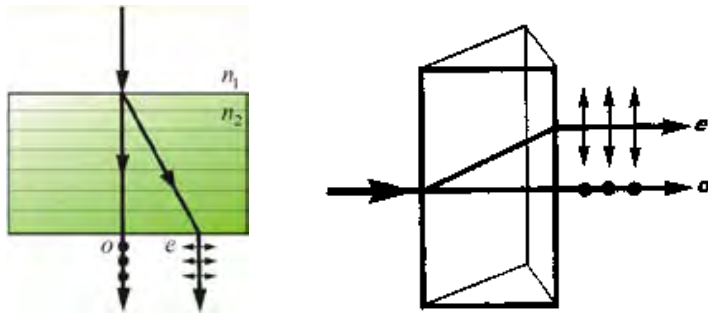


Рисунок 19 – обыкновенный и необыкновенный лучи и двойное лучепреломление

которых скорость света не одинакова в различных направлениях, называются *анизотропными*.

Анизотропные среды имеют и другое название – *двоякопреломляющие*, т.к. в них может наблюдаться необычное явление, а именно: если неполяризованный свет входит в анизотропный кристалл вдоль оптической оси, то ничего аномального не происходит. Но если неполяризованный свет падает на такой кристалл под углом к оптической оси, то в кристалле возникают два

луча: один луч, называемый *обыкновенным* (o), проходит сквозь кристалл самым обычным образом; другой луч, называемый *необыкновенным* (e) преломляется, отклоняясь на некоторый угол. При этом обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. (В обыкновенном луче колебания вектора $\vec{E}$ перпендикулярны главной плоскости (главная плоскость для данного луча проходит через световой луч и оптическую ось кристалла)).

4.4. Закон Брюстера

При падении светового луча *под определенным углом* на границу раздела двух сред, имеющих различные коэффициенты преломления, отраженный луч будет полностью линейно поляризован. В этом случае отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Для этого угла выполняется соотношение:

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

где α_B – угол Брюстера, n_2 и n_1 – коэффициенты преломления более плотной и менее плотной оптической среды соответственно.

4.5. Пример практического применения поляризации в строительной индустрии

В строительстве явление поляризации используется для оптического исследования напряжений в прозрачных твердотельных макетах, в которых по сравнению с реальными конструкциями пропорционально уменьшены все размеры. Прозрачные твердые вещества в напряженном состоянии (под нагрузкой) становятся двоякопреломляющими, т.е. расщепляют световой луч на обыкновенный и необыкновенный. Эти лучи образуют интерференционную картину, по которой

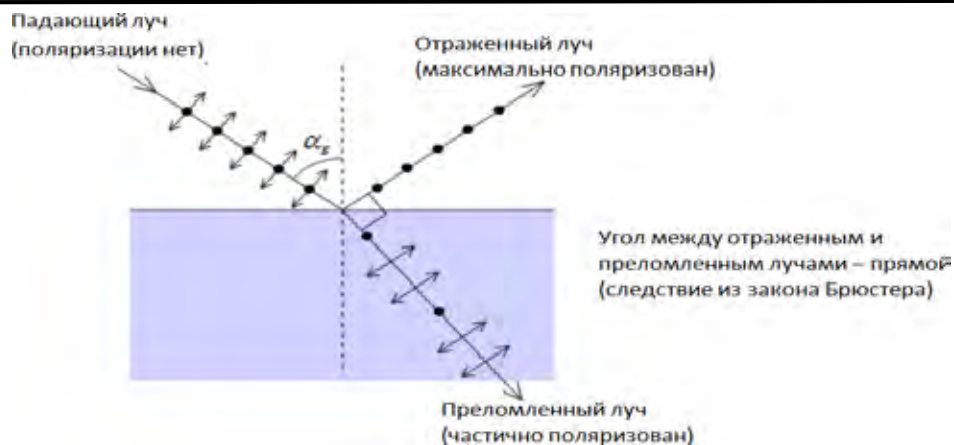


Рисунок 20 – иллюстрация закона Брюстера

можно определить распределение напряжений в макете, и эти данные затем переносятся на реальные конструкции. (Поляризационно-оптический метод исследования напряжений в прозрачных моделях).

5. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

5.1. Тепловое излучение

Любые объекты, температура которых выше абсолютного нуля ($T > 0K$), испускают излучение за счет внутренней энергии. Это излучение называется тепловым. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются короткие волны (видимые и ультрафиолетовые) при низких – преимущественно длинные (инфракрасные). Основными характеристиками этого излучения являются спектральная плотность энергетической светимости ($r_{\lambda,T}$) и энергетическая светимость (R_T) (излучательная способность или излучательность):

$$r_{\lambda,T} = \frac{W_{изл}}{S \Delta\lambda}; \quad R_T = \frac{1}{S} \frac{W_{изл}}{t} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda,$$

где $W_{изл}$ – энергия излучения,

S – площадь поверхности объекта,

t – время, в течение которого фиксируется излучение,

$\Delta\lambda$ – интервал длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$.

Для изучения теплового излучения физика использует модель, которая называется *черное тело* (ЧТ) (иногда – *абсолютно черное тело*). ЧТ интересно тем, что поглощает абсолютно все падающее на него световое излучение (т.е. ничего не отражает и ничего не пропускает), а его тепловое излучение достаточно легко поддается анализу. При взаимодействии твердого тела и падающего на его поверхность излучения, закон сохранения энергии можно представить в виде:

$$\frac{W_{отр}}{W} + \frac{W_{полз}}{W} + \frac{W_{прош}}{W} = 1, \quad (5.1)$$

где W – энергия падающего света, $W_{отр}$ – энергия отраженного света, $W_{полз}$ – энергия поглощенного света, $W_{прош}$ – энергия света, прошедшего сквозь тело.

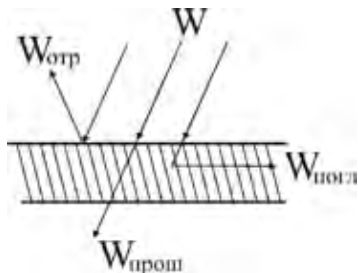


Рисунок 21 – баланс энергии при взаимодействии потока излучения с веществом

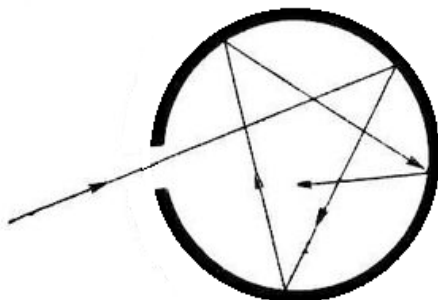


Рисунок 22 – модель ЧТ

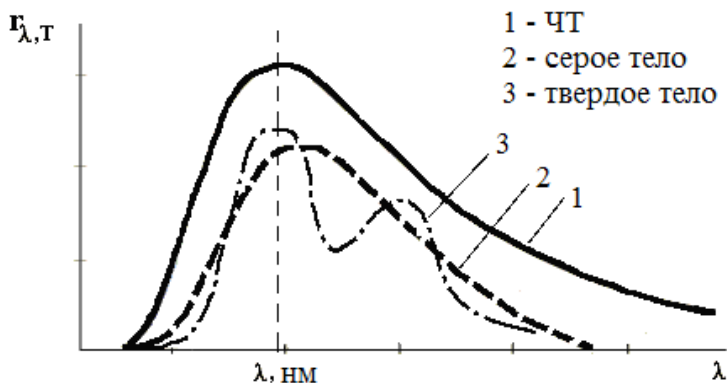


Рисунок 23 – распределение энергии в спектре для разных тел.

Для ЧТ формула (5.1) имеет вид $\frac{W_{\text{полн}}}{W} = 1$.

Объекты, у которых $\frac{W_{\text{полн}}}{W} < 1$ и $r_{\lambda,T}$ не зависит от длины волны, называются

«серыми телами». Моделью ЧТ можно представить, например, в виде сферы с узким отверстием, внутри которой зеркальная поверхность и попавший в отверстие свет отражается внутри под разными углами и вероятность его обратного выхода в это отверстие практически равна нулю, а также помещение с проемом (открытой форточкой).

5.2. Законы теплового излучения

Распределение энергии в спектре теплового излучения имеет вид:

Закон Стефана – Больцмана: энергетическая светимость ЧТ пропорциональна 4-й степени абсолютной температуры:

$$R_T = \sigma T^4 \text{ — для ЧТ, } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

$$R_T = \alpha \sigma T^4 \text{ — для серого тела, } (\alpha < 1).$$

Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум теплового излучения ч.т. обратно пропорциональна температуре:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Перечисленные выше законы являются эмпирическими, т.е. они получены опытным путем. Макс Планк *теоретически* вывел формулу, которая описывает представленную на графике (рис.23), зависимость $r_{\lambda,T}$ от λ , а также позволяет теоретически получить законы Стефана – Больцмана и Вина:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1},$$

где c – скорость света в вакууме, $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Изучение распределения интенсивности в спектре теплового излучения ЧТ при высоких температурах привело к возникновению гипотезы, выдвинутой Планком, которая предполагает, что вещество излучает свет не сплошным потоком, а отдельными порциями – квантами. Эйнштейн развил гипотезу Планка, в свою очередь предположив, что свет и испускается, и распространяется, и поглощается как совокупность квантов или частиц, получивших названия фотонов. При этом энергия каждого фотона равна произведению его собственной частоты и постоянной Планка:

$$W_{\phi} = h\nu.$$

Предположение Эйнштейна о фотонной (корпускулярной) природе света получило экспериментальное подтверждение, когда были открыты фотоэффект и эффект Комптона.

5.3. Фотоэффект

Фотоэффект – это вылет электронов из вещества под действием света.

Законы фотоэффекта:

- 1) сила фотоэлектрического тока, возникающего при освещении фотокатода монохроматическим светом, пропорциональна интенсивности света, падающего на фотокатод;
- 2) скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, падающего на фотокатод;
- 3) с изменением длины волны скорость фотоэлектронов меняется.

5.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Уравнение Эйнштейна получено теоретически. По своей сути это уравнение является следствием применения закона сохранения энергии к фотоэффекту и содержит в себе все три эмпирических закона фотоэффекта, сформулированных выше:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2},$$

ν – собственная частота падающего фотона,

$A_{\text{вых}}$ – работа, совершаемая электроном для выхода на поверхность металла,

$\frac{m_e v^2}{2}$ – кинетическая энергия выбитого электрона.

5.5. Красная граница фотоэффекта

Для того, чтобы фотоэффект произошел, падающий фотон должен обладать энергией $W_{\phi \min}$, как минимум обеспечивающей выход электрона на поверхность материала, т.е.

$$W_{\phi \min} = h\nu_{\min} = A_{\text{вых}}$$

Длина волны λ , соответствующая частоте $\nu_{\min}$, называется красной границей фотоэффекта и равна

$$\lambda_{\phi.г.} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}},$$

где c – скорость света в вакууме (рис. 24).

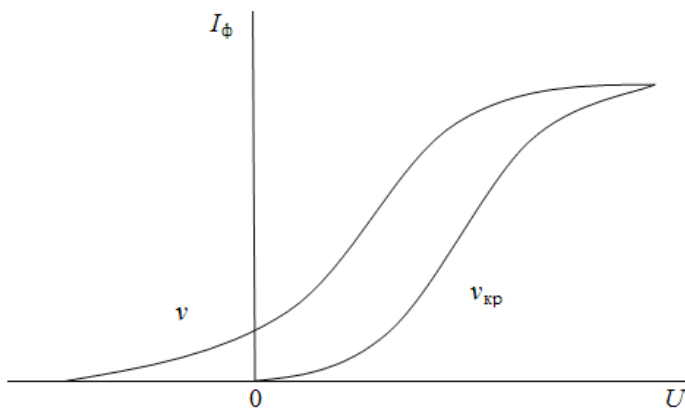


Рисунок 24 – вольт-амперная характеристика фотоэффекта

5.6. Эффект Комптона

Суть эффекта состоит в том, что при взаимодействии электромагнитного излучения малых длин волн – рентгеновского и гамма ($\lambda \rightarrow 10^{-8} - 10^{-11}$ м) с электронами происходит упругое рассеяние этих волн, которое сопровождается изменением их длины волны λ . Такое изменение противоречит классической теории, согласно которой при таком рассеянии λ не должна меняться. Эффект Комптона подтверждает правильность квантовых представлений об электромагнитном излучении как о потоке фотонов. Этот эффект может рассматриваться как результат процесса упругого столкновения двух «частиц» – фотона и электрона, при котором фотон передает электрону часть своей энергии и импульса, что сопровождается уменьшением его энергии $h\nu$, а, следовательно, и уменьшением его частоты ν , т.е. увеличением его длины волны λ .

5.7. Примеры практического применения законов теплового излучения и фотоэффекта в строительстве

Законы теплового излучения используется для бесконтактного измерения температуры тел. Применяя законом смещения Вина, по экспериментально определенной длине волны на которую приходится максимум теплового излучения, можно определить температуру раскаленных и самосветящихся тел (цветовая температура).



Рисунок 25 – иллюстрация эффекта Комптона

Пользуясь законом Стефана-Больцмана, по экспериментально найденной интегральной энергетической светимости исследуемого тела, можно определить температуру тела в широком диапазоне температур, включая комнатную. Прибор для бесконтактного определения температуры тела в отдельной точке называется пирометром. Визуальное наблюдение за распределением температуры на поверхности исследуемого объекта (например, здания) проводится с помощью тепловизора (радиационная температура). Отметим, что большинство строительных материалов в инфракрасной области, хорошо описываются моделью черного тела.

Разновидность фотоэффекта – вентильный фотоэффект (фотоэффект в запорном слое n - p перехода) лежит в основе работы солнечных батарей, являющихся все более распространенным оборудованием для уже построенных и строящихся домов (альтернативный источник электрической энергии).

6. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

После открытия явлений интерференции, дифракции, поляризации света, однозначно указывающих на его волновые свойства, а также открытия фотоэффекта и эффекта Комптона, которые однозначно указывают на наличие у света корпускулярных (точнее – квантовых) свойств, была сформулирована теория корпускулярно-волнового дуализма света. Эта теория подразумевает наличие у света и волновых, и квантовых свойств. Такая сложная природа света стимулировала возникновение гипотезы, которую впервые высказал французский физик Луи де Бройль. Согласно этой гипотезе, элементарным частицам вещества также свойственна сложная природа (корпускула – волна), т.е. в частности электронам присущи волновые свойства, которые проявляются при движении *электронов* в малых объемах, например в атомах.

Гипотеза де Бройля получила подтверждение в 1927 г., когда была обнаружена дифракция электронного пучка. В 1930 г. явление дифракции было обнаружено для потоков ионов и атомов. Де Бройль сопоставил движению частиц волну, получившую название волны де Бройля, длина которой связана с импульсом:

$$\lambda_{\text{д.Б.}} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p},$$

где m , v и p – масса, скорость и импульс частицы. Это выражение аналогично выражению дуализма света:

$$\lambda = \frac{h}{p_{\text{д.Б.}}}, \text{ где } p_{\text{д.Б.}} = \frac{h\nu}{c}.$$

Гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально обнаружением дифракции электронов на кристаллах. Волновые свойства частиц могут быть истолкованы только статистически. В этом случае поведение каждой отдельной частицы не может быть определено достоверно, может быть указана лишь вероятность того или иного поведения частиц.

Классическая физика занимается описанием макроскопического мира, а квантовая физика – микромира.

Методы классической физики при описании макромира основаны на том, что все величины, характеризующие те или иные процессы и явления, могут изменяться непрерывным образом.

Квантовая физика при описании микромира основывается на дискретном (т.е. прерывистом) изменении характеристик процессов и явлений. Поэтому в отличие от классической физики в квантовой понятие траектории движения объекта не имеет смысла, и можно рассматривать только вероятность его нахождения в той или иной точке фазового пространства (рис. 26).

Отсутствие траектории движения означает, что мы не можем с любой точностью одновременно определить координату и импульс микрообъекта. Степень точности их одновременного определения была сформулирована Гейзенбергом в виде соотношения:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar \quad (6.1)$$

$$\text{где } \hbar = \frac{h}{2\pi},$$



Рисунок 26 – иллюстрация к классическому а) и квантовому б) описанию движения свободной частицы

Δx – неточность определения координаты объекта,

Δp_x – неточность определения импульса объекта,

h – постоянная Планка.

Выражение (6.1) получило название «соотношение неопределенностей».

Рассмотрим несколько простых примеров:

1) скорость электрона $v_{\square} = 10^6$ м/с, точность определения этой скорости ~ 0,01%, тогда из соотношения неопределенностей получаем точность определения Δx :

$$\Delta x = \frac{h}{m\Delta v} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^2} \approx 7 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

т.е. относительно высокая точность и для ограниченного участка можно рассматривать электроны как корпускулы и говорить о траектории;

2) электрон движется в атоме с $v_{\square} = 2,2 \cdot 10^6$ м/с. То, что он движется в атоме, позволяет определить его координату с точностью до размеров атома, равных $\approx 10^{-10}$ м. При этом $\Delta v_{\square} = 7,1 \cdot 10^6$ м/с, т.е. погрешность в определении скорости $v_{\square}$ больше, чем сама скорость. Конечно, в этом случае представлять электрон в виде механической частицы нельзя;

3) не микро, а макрочастица $m = 10^{-18}$ кг, допустим ее положение определено с точностью до микрона, т.е. $\Delta x = 10^{-6}$ м, тогда $\Delta v_{\square} \approx 10^{-9}$ м/с, т.е. даже самые маленькие макрочастицы будут вести себя как корпускулы и не проявляют волновых свойств.

Основным носителем информации о волновых и квантовых свойствах микрочастиц является волновая функция Ψ . Для ее нахождения нужно решить уравнение Шредингера.

Используя упрощенную форму записи, для движения свободных частиц это уравнение можно представить в виде

$$\ddot{\Psi} + k\Psi = 0$$

где $\ddot{\Psi}$ – вторая производная от Ψ , k – волновое число.

Уравнение Шредингера в квантовой механике играет такую же основополагающую роль, как и 2-й закон Ньютона в классической механике. Очевидно, что этому уравнению удовлетворяют все значения Ψ , приведенные ниже:

$\Psi(\square)$	$\sin kx$	$\cos kx$	e^{kx}	e^{-kx}
$\ddot{\Psi}(\square)$	$-k^2 \sin kx$	$-k^2 \cos kx$	$k^2 e^{kx}$	$k^2 e^{-kx}$

Можно показать, что решением уравнения Шредингера является линейная комбинация значений либо первой, либо второй пары функций.

$$\text{при } k^2 > 0: \Psi(x) = A_1 \sin kx + B_1 \cos kx,$$

$$\text{при } k^2 < 0: \Psi(x) = C e^{|k|x} + D e^{-|k|x}.$$

В классической механике в отличие от квантовой значение $k^2 < 0$ не имеет смысла.

6.1. Строение атома

В начале 20-го столетия Резерфорд предложил модель строения атома, основываясь на результатах опытов, которые однозначно указывали на то, что атом состоит из ядра, в котором сосредоточено примерно 99% его массы, и электронов, которые вращаются вокруг положительно заряженного ядра по круговым орбитам. При этом суммарный заряд электронов по абсолютной величине совпадает с положительным зарядом ядра, что обеспечивает электрическую нейтральность атома.

Эта модель хорошо согласовывалась с результатами экспериментов и с теми представлениями об атоме, которые были в тот момент в науке. Однако, в этой модели содержались определенные противоречия:

1. Электроны, двигаясь по круговой орбите, а следовательно, с ускорением, должны излучать (а значит и терять) энергию. Потеря энергии электронов приводит к уменьшению радиуса орбиты, по которой он движется, т.е. движение электрона должно происходить по спирали и привести к его «падению» на ядро. Время такого процесса, т.е. время «жизни» атома, приблизительно 10^{-8} с. При этом, однако, наличие стабильных «долгоживущих» атомов подтверждалось многочисленными экспериментами и сомнений не вызывало;

2. двигаясь по орбите, электрон должен *непрерывно* излучать энергию, однако излучения от атомов, находящихся в невозбужденном состоянии, не было обнаружено.

Для разрешения указанных противоречий датский физик Нильс Бор сделал следующие предположения, которые получили название *постулаты Бора*.

Электроны движутся вокруг ядер по круговым орбитам, из которых разрешенными являются только орбиты определенных радиусов.

По второму закону Ньютона на электрон действует кулоновская сила $F_k = k \frac{e^2}{r}$. Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение $a_n = \frac{v^2}{r}$. По второму закону Ньютона $m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r}$.



Рисунок 27 – испускание фотона при переходе электрона на более низкую орбиту

Электрон на каждой

из разрешенных орбит обла-

дает определенной энергией

$$W = W_k + W_n = \frac{m v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \text{и}$$

движется по этой орбите, не излу-

чая энергию. Допустимые или раз-

решенные орбиты Бор назвал стационарными состояниями.

Испускание электромагнитной волны происходит только определенной порцией и только тогда, когда электрон переходит из одного состояния (m) в другое состояние (k) с меньшей энергией. При таком переходе испускается фотон энергией

$$h\nu = W_m - W_k.$$

6.2. Атомные спектры

Твердые тела, жидкости и плотные газы имеют непрерывный спектр излучения, что обусловлено взаимодействием атомов, образующих эти системы.

Сильно разреженные газы имеют не непрерывный, а дискретный спектр испускания. Каждое вещество характеризуется своим, характерным только для него *спектром испускания*, который позволяет идентифицировать вещества.

Если излучение с непрерывным спектром проходит через газ, то в спектре газа появляются темные линии, соответствующие светлым линиям в линейчатом спектре испускания данного газа. Такой спектр (с темными линиями) называется *спектром поглощения*. Установлено, что газы поглощают свет на тех же частотах, на которых они излучают.

В разреженных газах атомы находятся на больших расстояниях друг от друга, поэтому излучают или испускают свет *изолированные атомы*, а не атомы, взаимодействующие между собой, как это имеет место в твердых телах, жидкостях и плотных газах.

В спектрах большинства атомов трудно «просто так» заметить какие-либо закономерности. Однако некоторые закономерности можно определить, рассматривая простейший атом – атом водорода, в котором вокруг ядра «вращается» только один электрон.

Результаты исследований спектра атома водорода были обобщены в виде формулы Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad \text{или} \quad \nu = R c \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где ν – частота, c – скорость света в вакууме и отражены на рис 29. Эта теория позволила рассчитать характеристики атома водорода (энергию, r_0 – радиус первой орбиты) и объяснить существование атомных спектров различных элементов. Глав-

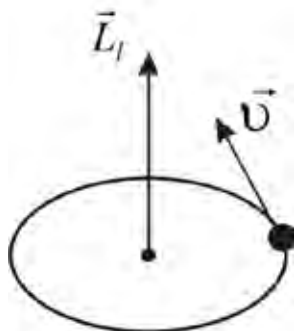


Рисунок 28 – к планетарной модели атома водорода

Их энергия $E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ эВ}$ (рис.29).

Атомы возбуждаются и переходят в состояния с более высокой энергией (по сравнению с основным) в результате столкновений с другими атомами или электронами, а также при поглощении фотона соответствующей частоты.

Для описания найденных экспериментально закономерностей атомных спектров были введены некоторые целые или дробные числа, получившие название *квантовых чисел*. Однако настоящий смысл квантовых чисел и связанной с ними дискретности некоторых физических величин, характеризующих поведение микро-частиц, был раскрыт лишь квантовой механикой.

6.3. Квантовые числа

Набор квантовых чисел, исчерпывающе определяющий состояние квантовой

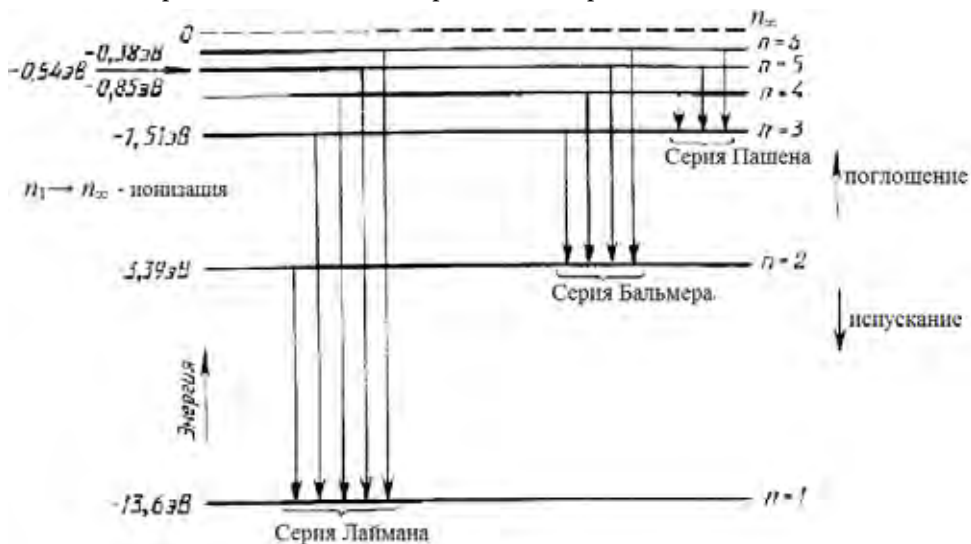


Рисунок 29 – диаграмма энергетических уровней в атоме водорода

системы, называется *полным*. Состояние электрона в атоме определяется четырьмя значениями квантовых чисел и соответствует четырем степеням свободы электрона, который связан с тремя пространственными координатами и *спином*. Для атома водорода и водородоподобных атомов это:

n – главное квантовое число, определяет уровни энергии;

l – орбитальное число, определяет величину момента импульса электрона (в классической теории – форму орбиты);

m_e – магнитное квантовое число, определяет величину проекции момента импульса электрона на направление внешнего магнитного поля:

$\vec{L}_l$ – орбитальный момент импульса электрона, определяется числовым значением и направлением $L_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar$, $l = 0, 1, 2, (n-1)$. Проекция вектора $\vec{L}_l$ на направление внешнего поля $L_{e,z} = \hbar m_e$, $m_e = 0; \pm 1; \pm 2 \dots, \pm e$.

6.4. Спин электрона

Экспериментально было обнаружено, что при прохождении потока атомов с одним валентным электроном через магнитное поле происходит расщепление этого потока на два пучка. Объяснение этому явлению было найдено в предположении, что электрон обладает собственным механическим моментом импульса, не связанным с движением электрона как целого, который получил название *спин*. Спин – квантовая величина, не имеет классического аналога: $L_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar$,

где s – спиновое квантовое число.

$$L_{sz} = m_s \hbar,$$

где m_s – магнитное спиновое число.

Для электрона $s = \frac{1}{2}$, $m_s = \pm \frac{1}{2}$. Электрон и другие микрочастицы с дробным спиновым числом называются *фермионами*. Спиновые числа могут быть и целыми (а также равными нулю). Частицы с целым спиновым числом называются *бозоны* (*мезоны*, *фотоны* и т.д.). Для фермионов выполняется *принцип Паули*: в одном и том же квантовом состоянии может находиться не более одного электрона.

6.5. Лазеры

Лазер – прибор, генерирующий когерентный свет высокой интенсивности. Название лазер – это аббревиатура (*LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – усиление света посредством вынужденного излучения). Излучение лазера представляет собой почти идеальную плоскую волну.

Принцип действия лазера основан на квантовом эффекте: фотон может поглощаться атомом *только тогда*, когда его энергия $h\nu$ совпадает с разностью энергий между заполненным энергетическим уровнем атома и свободным возбужденным уровнем (т.е. уровнем с более высокой энергией, чем основной). Если атом уже находится в возбужденном состоянии, то он может самопроизвольно перейти в энергетически более низкое состояние с испусканием фотона. Фотон, обладающий соответствующей энергией, при столкновении с возбужденным атомом стимулирует переход атома в энергетически более низкое состояние. Излучение, сопровождающее такой переход, называется *вынужденным*. При таком излучении не только сохраняется падающий фотон, но и в результате перехода атома в энергетически более низкое

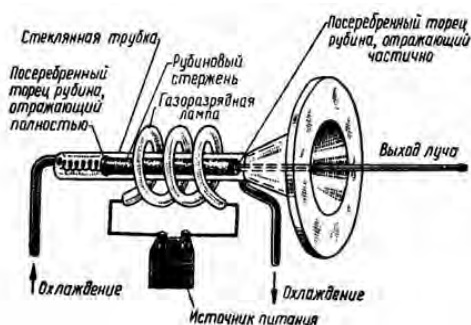


Рисунок 30 – схема рубинового лазера

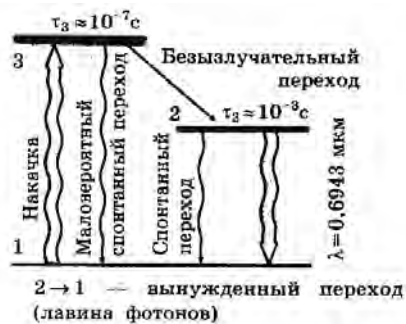


Рисунок 31 – схема энергетических уровней рубинового лазера

состояние возникает фотон *такой же частоты*. Оба фотона оказываются *в фазе* относительно друг друга. Именно так возникает в лазере когерентное излучение.

Обычно большая часть атомов находится в нижнем энергетическом состоянии, и поэтому падающие фотоны в основном поглощаются. Чтобы получить когерентное излучение в результате вынужденного испускания, необходимо удовлетворить двум условиям:

1) атомы должны находиться в энергетически более высоком возбужденном состоянии, т.е. необходима *инверсная заселенность* уровней, при которой число атомов в энергетически более высоком состоянии превышает число атомов в энергетически более низком состоянии, так что испускание фотонов преобладает над поглощением;

2) энергетически более высокое состояние должно быть метастабильным, т.е. атомы в нем должны находиться дольше, чем обычно ($3 \cdot 10^{-3}$ с – метастабильное состояние, а 10^{-8} с – обычный уровень), переход в более низкое состояние является вынужденным, а не спонтанным (самопроизвольным).

Синтетический рубин имеет следующий состав: $Al_2O_3 + 0,05\% Cr$. На уровне 2 ($\tau_2 = 10^{-3}$ с) происходит накопление ионов хрома (инверсия заселенностей уровней 1→2). 2→1 – вынужденный переход (лавины фотонов).

Предположим, что атомы находятся в энергетически более высоком состоянии. На рис.32,а изображен рубиновый стержень с внешними зеркалами, расположенные вблизи торцов стержня. Одно из зеркал (левое) – сплошное, а другое – полупрозрачное (пропускает 1-2% падающего излучения). Некоторые из возбужденных атомов довольно быстро переходят в более низкое состояние.

Один из возбужденных атомов изображен слева (рис.32,б). Если излученный им фотон испытывает столкновение с другим возбужденным атомом, то он побуждает этот атом испустить фотон той же частоты что и падающий фотон (оба фотона синфазны). Эти фотоны в дальнейшем сталкиваются с другими возбужденными атомами, стимулируя дальнейшее вынужденное излучение, и процесс приобретает лавинный характер. При попадании фотонов на любое из зеркал большинство из них отражается, и при движении в обратном направлении они продолжают стимулировать испускание атомами новых фотонов. Небольшая часть фотонов, «болтающихся» между зеркалами, выходит через полупрозрачное зеркало. Именно эти фотоны и

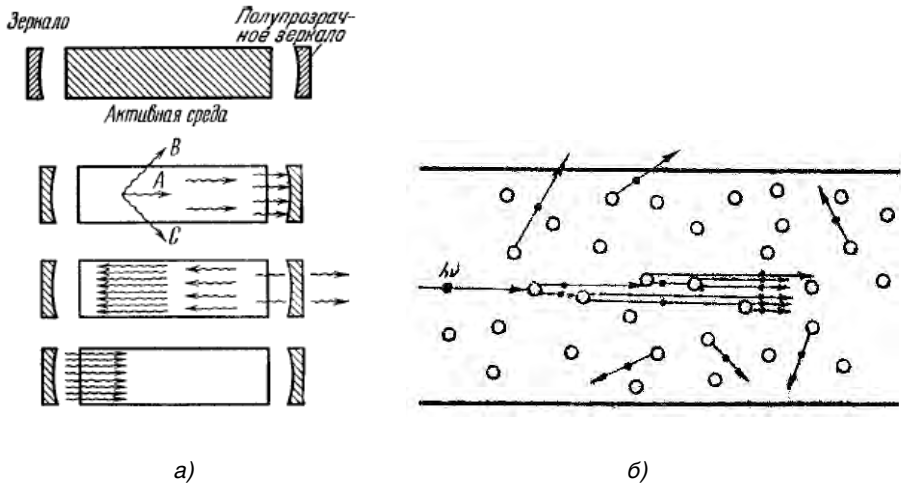


Рисунок 32 – а) схема расположения внешних зеркал; б) возникновение индуцированного излучения.

образуют узкий когерентный пучок излучения лазера, который, в отличие от пучка обычного света, не рассеивается в пространстве.

6.6. Свойства излучения лазеров, используемые в практических целях

Высокая когерентность: голография, лазерная связь, запись информации.

Идеальная монохроматичность: определение газового состава атмосферы.

Большая мощность: сварка, резка тугоплавких металлов, сверление отверстий и т.д.

Малое угловое расхождение: геодезические системы для измерений расстояний.

6.7. Применение лазеров в строительстве

Лазеры используются при проведении всевозможных измерений и контроля строительных элементов конструкций, являясь серьезным конкурентом традиционным измерительным приборам и оборудованию. Это уровень и лазерный отвес, лазерный нивелир, дальномер, лазерная рулетка, лазерный построитель плоскости и т.д.

Определяются напряжений в прозрачных моделях зданий и сооружений.

Лазерные установки применяются для контроля промышленного загрязнения среды на предприятиях стройиндустрии.

7. АТОМНОЕ ЯДРО

К началу 30-х годов XX столетия была разработана модель атомного ядра, которая оказалась достаточно сложной. В этой модели осталось много неясного, но несмотря на это она до сих пор находит широкое применение.

Согласно этой модели ядро состоит из частиц двух типов: *протонов* и *нейтронов*. Так как они обладают волновыми свойствами, то говорить о них как о частицах можно для наглядности и простоты изложения.

Протон является ядром простейшего атома – водорода. Он имеет положительный электрический заряд ($+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), и массу $m_p \approx 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

Нейтрон электрически нейтрален, его масса почти совпадает с массой протона: $m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг. В физической литературе нейтроны и протоны часто объединяют общим наименованием: *нуклоны*.

Ядра атомов часто называют *нуклидами*. Число протонов в нуклиде (ядре) называют *атомным номером* и обозначают буквой Z . Общее число протонов и нейтронов (нуклонов) называется *массовым числом* и обозначается буквой A . Общее обозначение химического элемента: ${}_Z^AX$.

В электрически нейтральном атоме атомный номер Z указывает одновременно на число протонов и число электронов, а так как основные свойства атомов определяются числом электронов, то атомный номер Z характеризует конкретный химический элемент.

В ядрах одного и того же химического элемента число протонов *всегда* одно и то же, а число нейтронов может быть различным. Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются *изотопами*. Например, ${}_{6}^{11}\square$, ${}_{6}^{12}\square$, ... ${}_{6}^{16}\square$ – изотопы углерода. Распространенность изотопов одного и того же элемента различна (${}_{6}^{12}\square$ – 98,9%, а ${}_{6}^{13}\square$ ~1,1%). В периодической системе элементов приведены массы элементов, полученные усреднением масс изотопов по их распространению в природе. Многие изотопы вообще не встречаются в природе, а могут быть получены с помощью ядерных реакций. Все трансурановые элементы с $Z > 92$ могут быть получены только искусственно.

Приблизительно размеры ядер были определены Резерфордом в опытах по рассеянию заряженных частиц.

Корпускулярно-волновой дуализм не позволяет определять точные размеры ядра – пространственные размеры будут несколько «размыты». Тем не менее, приближенно размеры ядра поддаются измерению, и наиболее точные из них были проведены путем рассеяния быстрых электронов на ядрах. Оказалось, что ядра имеют приблизительно сферическую форму, причем радиус ядра возрастает в зависимости от массового числа A : $R \sim A^{1/3}$. Так как объем сферы $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, то объем ядра пропорционален числу нуклонов $V \sim A$.

Общая масса ядра *всегда* меньше суммы масс составляющих это ядро нуклонов. Эта разность масс показывает, какую энергию необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны, и называется *полной энергии связи*. Если бы масса ядра была в точности равна массе составляющих его нуклонов, то это ядро самопроизвольно распалось бы без сообщения ему дополнительной энергии. Для обеспечения стабильности ядра его масса должна быть меньше массы составляющих его нуклонов. Полную энергию связи ядра, деленную на число нуклонов

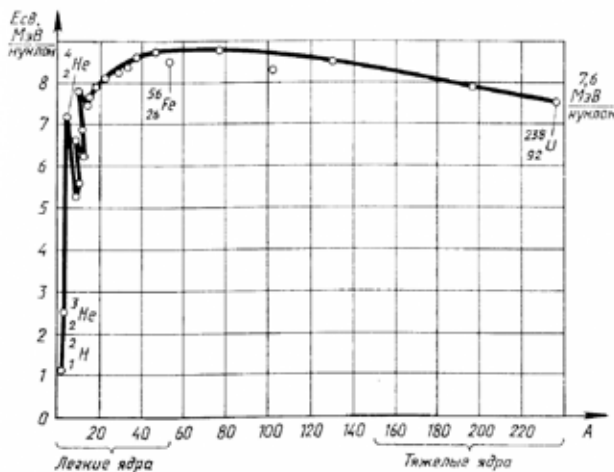


Рисунок 33 – график зависимости энергии связи на нуклон от массового числа

(массовое число A), называют *удельной энергией связи* (или средней энергией связи на нуклон).

При анализе зависимости удельной энергии связи от массового числа видно, что с увеличением A удельная энергия связи сначала возрастает, затем выходит на насыщение при $A \approx 15$ (примерно 8 МэВ на нуклон).

При $A > 60$ кривая плавно спадает. Это означает: нестабильность тяжелых ядер и стабильность среднетяжелых и легких ядер.

Ядра атомов можно анализировать не только с точки зрения энергии, но и с точки зрения тех сил, которые удерживают нуклоны в ядре. Протоны и нейтроны не могли бы самопроизвольно образовать ядро, т.к. все протоны положительно заряжены одноименно, и поэтому между ними действуют кулоновские силы отталкивания. Так как стабильные ядра существуют, то ясно, что должна существовать какая-то сила, которая препятствует разваливанию ядра и превосходит кулоновскую. Эта сила получила название *сильного (или ядерного) взаимодействия*. Сильное взаимодействие – это притяжение, действующее между всеми нуклонами (как протонами, так и нейтронами). Таким образом, между протонами действуют две силы: отталкивание (кулоновское) и притяжение (сильное взаимодействие). Нейтроны не имеют электрического заряда, поэтому лишь притягивают и протоны и нейтроны благодаря сильному взаимодействию.

Сильное взаимодействие оказалось более сложным, чем гравитационное и электромагнитное взаимодействия. Точное математическое описание его в полной мере пока не построено. Однако, множественные исследования природы этого взаимодействия позволили установить ряд его важных свойств.

Одним из важнейших свойств сильного взаимодействия является его *короткодействие* – сильное взаимодействие проявляется только на очень малых расстояниях. Сильное взаимодействие двух нуклонов оказывается очень большим, если расстояние между ними $r < 10^{-15}$ м (т.е. размер ядра) и спадает практически до нуля при $r > 10^{-15}$ м. В отличие от сильного взаимодействия электромагнитные и грави-

тационные силы называются *дальнодействующими*, т.к. действуют на больших расстояниях.

Сильное взаимодействие обладает и другими особенностями, например, если ядро содержит слишком много или слишком мало нейтронов по сравнению с числом протонов, то сильное взаимодействие ослабевает – при нарушении баланса между протонами и нейтронами ядра становятся нестабильными. Стабильные ядра обнаруживают тенденцию к выравниванию числа протонов и нейтронов ($N = Z$, $N = A - Z$) вплоть до $A \approx 30 \div 40$. За этой областью стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов ($N > Z$). Этот фактор отражает рост кулоновского расталкивания с увеличением атомного номера Z (числа протонов). Поэтому для поддержания стабильности ядра требуется большее число нейтронов, у которых имеется лишь ядерное притяжение. При очень больших Z (т.е. большого числа протонов в ядре) избыток нейтронов уже не в состоянии скомпенсировать сильно возросшее кулоновское отталкивание, которое действует по всем объему ядра, а сильное взаимодействие «работает», в основном, между «соседями». Поэтому при $Z > 82$ стабильных ядер уже не существует.

Под стабильным ядром понимается ядро, которое существует «сколь угодно долго». Нестабильным является ядро, которое превращается в другое ядро в результате радиоактивного распада. В существовании определенного типа радиоактивного распада проявляется еще один вид ядерного взаимодействия, который получил название *слабого взаимодействия*. Оно проявляется при β -распаде при превращении протона в нейтрон или нейтрона в протон. Слабое взаимодействие слабее сильного (ядерного) и кулоновского, но сильнее гравитационного.

Два вида ядерных сил – сильное и слабое взаимодействие – вместе с кулоновским и гравитационным взаимодействием образуют четыре известные фундаментальные взаимодействия в природе.

8. РАДИОАКТИВНОСТЬ

В 1896 г. Анри Беккерель открыл явление радиоактивности – некоего самопроизвольного излучения. Изучение этого явления показало, что ни самые интенсивные физические (сильное охлаждение, нагрев, давление и т.д.), ни химические воздействия не оказывают на него влияния. Дальнейшие исследования однозначно указали на атомное ядро как на источник радиоактивности, т.е. наличие ядерных сил является причиной *нестабильности* некоторых изотопов, которые *распадаются* с испусканием того или иного излучения.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе. Их радиоактивность называется *естественной радиоактивностью*. Другие нестабильные изотопы могут быть созданы в лабораторных условиях как продукты ядерных реакций. Такие изотопы называются *искусственными*, а их радиоактивность – *искусственной радиоактивностью*.

Резерфорд и другие обнаружили, что радиоактивное излучение можно разделить по своей проникающей способности на три различных вида:

- 1) излучение одного вида едва проникало сквозь лист обычной бумаги. Оно получило название α -излучения;
- 2) излучение второго вида проходило сквозь алюминиевую пластину толщиной до 3 мм и получило название β -излучения;
- 3) излучение третьего вида свободно проходило через слой свинца толщиной в несколько сантиметров и получило название γ -излучения.

Кроме различия по проникающей способности, все три вида излучения отличаются электрическим зарядом и, следовательно, по разному отклоняются электрическим и магнитным полем: α -лучи заряжены положительно, β -лучи заряжены отрицательно, γ -лучи нейтральны.

И, наконец, было обнаружено, что все три вида излучения представляют собой уже известные до этого в физике частицы:

- α -лучи (α -частицы) – это ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$, т.е. каждая α -частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, связанных вместе;
- β -лучи состоят из электронов, испускаемых ядром, которые абсолютно идентичны по своим свойствам электронам на орбитах вокруг ядра;
- γ -лучи (γ -кванты) представляют собой фотоны очень высокой энергии.

Рассмотрим более подробно все три вида излучений.

8.1. α -излучение

Ядро, образующееся в результате испускания исходным ядром α -частицы, должно отличаться от исходного, которое теряет два протона и два нейтрона (ядро ${}^4_2\text{He}$). Например, радий-226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$), являющийся источником α -частиц, при распаде превращается в ядро с $Z = 88 - 2 = 86$ и $A = 226 - 4 = 222$, т.е. в радон (Rn):

$${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}.$$

При α -распаде всегда образуется *новый химический элемент*: дочернее ядро всегда отличается от *материнского*. Превращение одного элемента в другой иногда называют *трансмутацией*.

α -распад обусловлен тем, что сильное взаимодействие не в состоянии обеспечить стабильность очень тяжелых ядер. Вследствие короткодействия оно связывает только со-

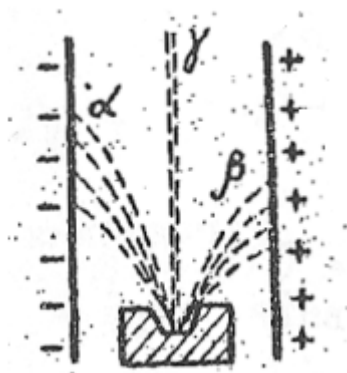
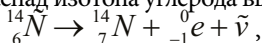


Рисунок 34 – отклонение α -, β -, γ -лучей электрическим, магнитным полем

рождается *внутри самого ядра*: один из нейтронов превращается в протон, испуская при этом (для сохранения заряда) электрон. Свободные нейтроны действительно распадаются подобным образом: $n \rightarrow p^+ + e^-$. Чтобы подчеркнуть ядерное происхождение таких электронов, их часто называют не электронами, а β -частицами. Тем не менее, они ничем не отличаются от орбитальных электронов по своим свойствам.

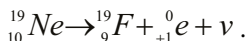
Тщательные эксперименты показали, что разность энергий и импульсов материнского и дочернего ядер больше, чем энергия и импульс «рожденного» электрона, т.е. под «угрозой» были поставлены законы сохранения и импульса, которые никогда ранее не нарушались. В 1930 г. Вольфганг Паули высказал гипотезу, что при β -распаде помимо электрона испускается еще одна частица – *нейтрино* (т.е. маленький нейтрон), которая и уносит часть энергии и импульса, обеспечивая выполнение законов сохранения. Нейтрино имеет нулевой заряд, нулевую или очень малую массу, напоминает по своим свойствам фотон и движется со скоростью света (или близкой к скорости света, если масса отлична от нуля). Детальную теорию β -распада разработал в 1934 г. Энрико Ферми. Он дал название *нейтрино* и постулировал наличие «слабого взаимодействия» при β -распаде. В 1956 г. все положения его теории получили экспериментальное подтверждение. При β -распаде действительно решающую роль играет слабое взаимодействие, благодаря которому нейтрино взаимодействует с веществом, «заставляя» нейтрон испускать электрон и превращаться в протон. С учетом нейтрино, β -распад изотопа углерода выглядит таким образом:



где $\tilde{\nu}$ – антинейтрино.

Изотопы, которые обладают избытком нейтронов по сравнению с числом протонов, распадаются с испусканием электрона. Те нестабильные изотопы, у которых дефицит нейтронов по сравнению с числом протонов, распадаются с испусканием позитрона (${}^0_{+1}e$) – античастицы электрона с положительным зарядом.

Например:

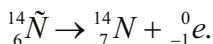


Таким образом, при β^+ -распаде образуется нейтрино, а при β^- -распаде – антинейтрино.

седние нуклоны, в то время, как электростатическое отталкивание действует в объеме всего ядра.

8.2. β -излучение

Превращение одного элемента в другой происходит и при β -распаде ядра. Например:

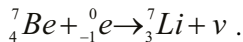


У электрона $Z = -1$, $A = 0$.

При испускании электронов полное число нуклонов A в дочернем ядре такое же, как и в материнском, но поскольку был испущен электрон, то электрический заряд дочернего ядра отличается от заряда материнского ядра.

Испускаемый при β -распаде электрон не имеет отношения к орбитальным электронам. Он

Наряду с β^+ и β^- -распадами существует третий процесс того же типа. Он называется *захватом электрона* и состоит в поглощении ядром одного из орбитальных электронов. Например,



8.3. γ -излучение

γ -излучение представляет собой фотоны очень высокой энергии, распад ядра с испусканием γ -излучения во многом напоминает испускание фотонов возбужденными атомами. Подобно атому, ядро может находиться в возбужденном состоянии. При переходе в основное состояние, т.е. в состояние с более низкой энергией, ядро испускает фотон. Разрешенные энергетические уровни ядра разнесены по энергии значительно, чем энергетические уровни атома: «расстояния» между соседними уровнями в ядре имеет порядок $10^3 \div 10^6$ эВ, в отличие от нескольких эВ в случае энергетических уровней атома. Следовательно, энергии испускаемых фотонов могут изменяться от нескольких кэВ до нескольких МэВ. Т.к. γ -излучение не несет заряда, то при γ -распаде не происходит превращения одного химического элемента в другой.

8.4. Законы сохранения

При радиоактивном распаде всех трех видов выполняются все классические законы сохранения. Энергия, импульс, момент импульса и электрический заряд сохраняются, т.е. эти величины после распада остаются такими же, как и до распада. Установлен и еще один закон сохранения. Это *закон сохранения числа нуклонов*. Согласно этому закону полное число нуклонов (A) остается неизменным при любом радиоактивном распаде, хотя нуклоны одного вида могут превращаться в нуклоны другого вида (протоны в нейтроны и наоборот). Закон сохранения числа нуклонов выполняется при радиоактивном распаде всех трех видов.

8.5. Скорость распада и период полураспада

Макроскопический образец любого радиоактивного изотопа содержит огромное число радиоактивных ядер. Эти ядра распадаются на протяжении некоторого времени по закону радиоактивного распада:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число материнских ядер при $t = 0$ (т.е. в начальный момент времени);

N_t – число ядер, оставшихся к моменту времени t ;

λ – постоянная распада.

Закон радиоактивного распада показывает, что число радиоактивных ядер в данном образце экспоненциально убывает со временем.

Радиоактивный распад – «однократный» процесс, т.е. после распада материнского ядра и его превращения в дочернее ядро повторный распад невозможен. Скорость распада или число распадов в секунду в чистом образце $\frac{dN}{dt}$ называется *активностью* A данного образца.

Активность также убывает со временем по экспоненциальному закону

$$A = \frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t}.$$

$$[\square]_{\text{Cl}} = \text{Бк} = 1 \frac{\text{расп}}{\text{с}}; 1 \text{Кн} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$$

Чем больше постоянная распада, тем выше скорость распада и активность образца.

Для характеристики скорости распада любого изотопа часто пользуются не постоянной λ , а его *периодом полураспада* – промежутком времени, за который распадается половина исходного изотопа в данном образце. Период полураспада обратно пропорционален постоянной распада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

8.6. Строительные материалы как фактор радиационного действия

Одной из основных характеристик строительных материалов является эффективная удельная активность, определяемая отношением эффективной активности $A_{\text{эф}}$ к массе материала. Значение величины ($A_{\text{эф}}/m$) определяется как сумма удельных активностей, наиболее часто встречающихся в строительных материалах радиоактивных изотопов: радия, тория, калия. В зависимости от значения эффективной активности, строительные материалы делятся на классы, определяющие возможность их использования. Для всех видов строительства допустимы материалы, имеющие эффективную удельную активность меньше 370 Бк/кг. Отметим, что в Украине встречаются строительные материалы имеющие более высокие значения активности.

Дозу облучения (внутреннего) человек может получить также из-за наличия в помещении радиоактивного инертного газа радона. Радон – инертный газ без запаха и цвета, образуется непосредственно в процессе распада радионуклида Ra . Радий постоянно образуется в процессе распада урана, всегда присутствующего в земной коре. Источником радона в помещении может быть вытекание его из поверхности Земли (в помещение он попадает через фундамент здания, выделяется с водой, газом и т.д.). Для защиты от радона следует принимать определенные меры. Например, создавать радоно-защитные барьеры.

Важно, также следить за γ -фоном в помещениях. В жилых помещениях он не должен превышать 60 мкР/час. В Украине радиоактивный контроль обязателен для всех сооружаемых жилых домов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОСТИЖЕНИЙ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

(От наноструктурированных объектов к нанотехнологиям)

Еще 30-40 лет назад наиболее перспективной областью научно-технической деятельности с термином микро: микроэлектроника, микропримеси и т.д.

Сегодня все чаще используют термин «нано». Нанообъекты это объекты, имеющие хотя бы один размер $\sim 10^{-9}$ м. Уменьшение размеров исследуемого объекта до некоторого критического размера приводит к значительному изменению его свойств. Это связано с увеличением роли поверхностной энергии, скорости протекания различных процессов, отличием в термодинамических условиях фазовых превращений, появлением размерных эффектов и как следствие – изменение сути физических явлений, определяющих свойства материала. Эти эффекты наиболее ярко проявляются при размерах меньше 40 нм. Отметим, что наночастицы это не отдельные атомы, а образования, состоящие из 100-1000 атомов (так называемые кластеры).

Наиболее полно изучены нанокристаллические фазы углерода. Самые известные из них фуллерен (углерод сферической формы), графен (двумерный кристалл толщиной в один атомный слой), нанотрубки (графеновые слои, сложенные в форме полых квази-нитей).

Отметим, что до 1971 года были известны лишь две объемные фазы углерода – графит, характеризующийся слоистой структурой и алмаз. (Алмазные образования представляют собой монокристаллы).

Открытие и бурное развитие нанокристаллических фаз началось с 1985 года, после изобретения, так называемого, туннельного микроскопа, позволившего сначала увидеть отдельные атомы, а потом и манипулировать с ними.

Отметим, что за последние 30 лет исследования в области наноструктурированных объектов трижды были отмечены нобелевской премией.

Исследование в области наноструктурированных объектов стали основой очередной научно-технической революции, затронувшей многие области техники, в том числе и строительную индустрию.

Так будущее строительного материала ведения повидимому неразрывно связано с применением нанотехнологических подходов, в основе которых лежит контроль за управлением процессом структурообразования, начиная с наноразмерного уровня. Результатом такого подхода является получение новых по составу и качественно отличающихся по структуре и свойствам конструкционных, теплоизоляционных, отделочных материалов в полной мере отвечающих современным тенденциям развития строительной индустрии. Уже сегодня в мире изготовлено с помощью нанотехнологий более 100 различных материалов. Более 20% строительных компаний в развитых странах мира используют такие материалы.

На сегодняшний день имеются сведения об исследованиях в области нанотехнологии и их использовании в строительной индустрии по следующим направлениям:

- конструкционные материалы с уникальными прочностными характеристиками, в том числе новые виды бетона и арматурной стали;
- самоочищающиеся стекла и покрытия;
- гибкие и паропрopusкающие стекла;

-
- теплоизоляционные материалы;
 - фасадные краски с повышенной стойкостью к внешним воздействиям;
 - нанокраски, проводящие электрический ток;
 - гели для склейки материалов, считавшихся ранее несовместимыми и т.д.
- Приведем два примера.

1. Добавление в бетон в малых количествах наночастиц, например, углерода приводит к так называемому дисперсионному микроармированию (армирование лат. – упрочнение, самый известный пример армирования – упрочнение бетонной матрицы стальной арматурой в железобетоне). Наночастицы ускоряют протекающие в бетоне различные реакции, стимулируя рост базальтовых микроволокон. В результате прочность бетона значительно увеличивается.

Рост прочности также имеет место, в карбонопластиках если входящие в состав этого композиционного материала углеродные волокна диаметром 0,005 – 0,01 мм, покрыть слоем из углеродных нанотрубок. В этом случае прочность данного конструкционного материала становится сравнимой с прочностью титана.

2. Одна из характерных особенностей наночастиц – образование путем самосборки определенных структур (так называемая самоорганизация структуры). Это явление используется при получении самоочищающихся стекол. Один из вариантов заключается в следующем: на поверхность стекла наносится нанослой кремнезема (SiO_2). В результате на поверхности стекла образуется нанорельеф – слой самоупорядоченных бугорков размером 50–100 нм. Капли воды не могут удерживаться на такой поверхности и вода стекает вместе с грязью (эффект лотоса).

Как видно из приведенных выше примеров, прогресс в области строительной индустрии не дает возможности предположить, какие физические сведения в ближайшее время будут востребованы строительной наукой. Поэтому выпускники строительных вузов должны иметь достаточно полное представление о физике как основе научно-технического прогресса.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные обозначения пространственных и физических величин

Колебания и волны, оптика, квантовая механика

Время		t	Длина волны		λ	
Отклонение от положения равновесия при механических колебаниях	мгновенное	x	Фазовая скорость		$v_{\square}$	
	бесконечно малое	dx	Геометрическая разность хода лучей		Δ	
	максимальное (амплитуда)	x_{max}, A	Оптическая разность хода лучей		δ	
	обобщенное	S	Показатель преломления		n	
Период колебаний		T	Относительный показатель преломления $n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2}$		$n_{1,2}$	
Частота	колебаний	ν	Плотность энергии (механическая) $w = W / V$		w	
	круговая $\omega = 2\pi\nu$	ω	Вектор	Умова $\vec{P} = w\vec{v}_{\phi}$	$\vec{P}$	
	собственная	ν_0, ω_0		Пойтинга $\vec{S} = \varepsilon_0 c^2 [\vec{E} \cdot \vec{B}]$	$\vec{S}$	
	резонансная	$\omega_{рез}$		Скорость света в вакууме		c
Коэффициенты	затухания	δ	Интенсивность		I	
	жесткости пружины	k	Постоянная	Планка		h
Добротность		Q		Вина		b
Логарифмический декремент		χ				
Номер гармоники		n				
Энергия колебаний	механическая кинетическая	W_k	Волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$		k	
	механическая потенциальная	W_p	Энергия излучения тела		W	
	электрическая	$W_{эл}$	Спектральная плотность энергии излучения		$r_{\lambda,T}$	
	магнитная	$W_{\mathcal{M}}$	Энергетическая светимость		R_T M	

РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. – 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.
2. Джанколли Д. Физика. Т. 1,2. – М.: Мир, 1989.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб.пособие. В 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр.- М.: Наука, 1988.- 496 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб.пособие. В 3-х т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1987.- 320 с.
5. Физика для строительных и архитектурных вузов: Учебное пособие / Серия «Высшее образование». – Ростов н/Дону: Феникс, 2004. – 512 с.
6. Крот Ю.Є. Тексти лекцій з фізики. Розділ «Фізика атома. Квантова механіка». Харківський державний будівельний інститут. Х.-1993.
7. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. – Атомиздат, 1975. – 269 с.
8. Подус Г.М., Крот О.Ю. Фізика в будівництві та будівельній індустрії (посібник з курсу фізики для студентів технічних спеціальностей будівельного профілю). – Харків: ХДТУБА, 2011. – 72 с.
9. Череднік Д.Л., Даньшева С.О., Крот Ю.Є. та ін. «Елементи фізики конденсованого стану і будівельного матеріалознавства»: Навчальний посібник. – Х.: ХНУБА, 2013. – 105 с.
10. Череднік Д.Л., Даньшева С.О., Крот Ю.Є., Подус Г.М. Фізика в будівництві: Навчальний посібник. – Харків: «БУРУН і К», 2014. – 136 с.
11. Копанець Є.Г., Подус Г.М., Даньшева С.О. та ін. Фізичні основи сучасних будівельних технологій та автоматизації: Навчально-методичний посібник до самостійного вивчення дисципліни. – Х.: ХДТУБА, 2010. – 104 с.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

*Даньшева Светлана Олеговна
Корсунский Александр Моисеевич
Подус Галина Николаевна
Полупан Елена Викторовна*

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ

Разделы «Колебания и волны», «Оптика»,
«Атомная и ядерная физика»

Набор: Даньшева С.О.

Подписанно в печать: 25.12.2015г.

Формат: 60х90М/16

Печать цифровая. Усл.печ.л.: 3,06

Тираж: 50 экз.

Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour»

Druk i oprawa: Sp. z o.o. «Diamond trading tour»

Adres wydawcy i redakcji: 00-728 Warszawa, ul. S. Kierbedzia, 4 lok.103
e-mail: info@conferenc.pl