

# ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие  
для абитуриентов



Минск БГТУ 2004

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие  
для абитуриентов

Минск 2004

УДК 53 (076.6)  
ББК 22.3  
Ф 50

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета.

Авторы-составители:

*Л.П. Гольман, В.К. Долгий, С.И. Лобко, И.И. Наркевич,  
А.М. Олехнович, А.З. Хартанович.*

Рецензенты:

зав. кафедрой теоретической механики БГТУ,  
профессор *В.С. Вихренко*;  
зав. кафедрой медицинской и биологической физики БГМУ  
доцент *Г.К. Ильич*,

Ф 50	<b>Физика:</b> Учебно-методическое пособие для абитуриентов / Авт.-сост. Л.П. Гольман и др. – Мн.: БГТУ, 2004. – 89 с.
------	--

ISBN985-434-319-7

Учебно-методическое пособие написано в соответствии с программой для поступающих в ВУЗы Республики Беларусь и ориентировано на систематизацию знаний по физике с целью сдачи вступительного экзамена в форме тестирования либо традиционным образом.

Весь курс физики в пособии разделен на 14 частей (тем), в каждой из которых приведена часть программы, краткий обзор теории с основными законами и формулами, а также рекомендации, направленные на поиск рационального метода решения задач.

Может быть рекомендовано слушателям подготовительного отделения и подготовительных курсов БГТУ.

УДК 53 (076.6)  
ББК 22.3

ISBN 985-434-319-7	© Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», 2004
--------------------	---

*Перед человеком к разуму три пути:  
путь размышления – это самый бла-  
городный; путь подражания – это  
самый легкий; путь личного опыта –  
самый тяжелый.*

*Конфуций*

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Общие требования к знаниям абитуриентов**

Вступительный экзамен в 2004 г. по физике в Белорусском государственном технологическом университете абитуриенты сдают в виде тестирования. Объем и содержание учебного материала, выносимого на экзамен, определяются программой вступительных испытаний в вузы по физике. Отметим, что эти программы незначительно изменяются из года в год, так что данное пособие может оказаться полезным и в будущем.

Что же надо знать и уметь абитуриенту, чтобы уверенно выдержать конкурсный экзамен? Для этого необходимо:

- 1) знать содержание и смысл физических понятий, величин и терминов; знать единицы физических величин и их определения;
- 2) знать содержание и сущность физических принципов и законов; знать уравнения законов и границы их применимости;
- 3) понимать функциональную зависимость между физическими величинами, входящими в ту или иную формулу (уравнение);
- 4) знать и понимать содержание физических теорий, их основные положения, постулаты и следствия;
- 5) уметь применять законы и исходные положения теорий для объяснения и толкования различных физических явлений и процессов (в объеме программы);
- 6) знать математику в объеме программы средней школы;
- 7) уметь решать задачи по всем разделам программы;
- 8) проявить осведомленность в вопросах, связанных с историей важнейших открытий в физике.

Тесты для проведения вступительных экзаменов составляются в строгом соответствии с действующей программой и рекомендациями МО Республики Беларусь. Содержание каждого теста определяется на основе следующих нормативных документов:

1. Программы для учреждений, обеспечивающих получение

общего среднего образования с русским языком обучения с 11-летним сроком обучения по физике 2003 г.

2. Программы вступительных испытаний в вузы по физике 2004 г.

3. Десятибалльной системы оценки результатов учебной деятельности учащихся. Инструктивно-методические материалы.

4. Учебных пособий для изучения физики в школе с 11-летним сроком обучения, утвержденных МО РБ.

### **Структура экзаменационной работы (теста)**

Работа состоит из 40 тестовых заданий, разделенных на две части, отличающиеся формой (типом) заданий. *Первая часть* содержит 33 задания, которые предусматривают выбор абитуриентом единственного правильного ответа (тип А) из 5 приведенных его вариантов. *Вторая часть* содержит 7 заданий с началом краткого ответа (тип В), который нужно абитуриенту завершить (после решения задания).

Все 40 заданий распределены по основным разделам физики (механика – 10; молекулярно-кинетическая теория и термодинамика – 7; электродинамика – 13; колебания и волны – 3; оптика – 3; основы СТО – 1; квантовая и ядерная физика – 3); при этом каждый тест содержит задания пяти уровней сложности: 1 уровень (*узнавания основных формул, правил, законов*) – 2 задания; 2 уровень (*неосознанного воспроизведения, решение расчетной задачи с использованием одной формулы*) – 7 заданий; 3 уровень (*воспроизведение на уровне понимания, решение расчетной задачи с использованием двух формул по одной либо разным темам*) – 15 заданий; 4 уровень (*применение знаний в знакомой ситуации, решение расчетной задачи с использованием цепочки из 3–5 формул из одного или разных разделов*) – 14 заданий; 5 уровень (*применение знаний в незнакомой ситуации, решение задачи с использованием цепочки из 3–5 формул по любым разделам с одним нестандартным элементом*) – 2 задания).

Для выполнения работы выделяется 3 часа (180 минут).

Ниже в качестве образца (с. 8) приведен один тест, уровни заданий которого соответствуют «Сборнику заданий по физике» (Н.Ф. Горовая, В.В. Жилко, Л.И. Исаченкова и др., Мн., 2003).

### **Общие рекомендации по систематизации знаний при подготовке к вступительному экзамену в виде тестирования**

Основная цель настоящего пособия – сориентировать абитуриентов на тот уровень требований, которые предъявляются на вступи-

тельном экзамене по физике в БГТУ; оказать конкретную методическую помощь абитуриенту для систематизации его знаний при подготовке к экзамену и тем самым сделать ее более целенаправленной, осмысленной и успешной.

В основу разработки пособия положена программа для поступающих в вузы в 2004 году. Весь учебный материал, выносимый на экзамен, разделен на 14 тем, каждая из которых представляет собой логически заверченный и в большинстве случаев достаточно обширный блок учебной информации. На наш взгляд, такая дозировка учебного материала при его повторении способствует развитию логического мышления, требует анализа, создает предпосылки для обобщения и систематизации знаний, определяет пути подхода к решению определенного типа задач. Каждая из тем имеет одинаковую структуру и включает вопросы программы, основные теоретические положения и рекомендации о рациональных приемах решения задач.

При подготовке к вступительному экзамену в виде тестов рекомендуем, кроме школьных учебников и пособий для поступающих в ВУЗы, использовать учебную литературу, содержащую тестовые задачи.

Рекомендуем прорабатывать учебный материал по выделенным темам, переходя от одной к другой в той последовательности, в которой они располагаются в данном пособии. Заново повторяя вопросы теории, постарайтесь выделить в каждом из них самое основное и осмыслить его.

Успех при решении задач обеспечивается глубоким пониманием сущности законов физики, явлений и процессов; способностью анализировать конкретную физическую ситуацию; умением применять общие теоретические положения к частным случаям, положенным в основу каждой тестовой задачи. Каждую задачу целесообразно решать по плану, который определяется логикой мыслительной деятельности абитуриента, направленной на достижение поставленной в задаче цели. Изложим последовательность и содержание этих действий.

**1. Осмысливание физического содержания задачи.** Внимательно прочитайте условие задачи, обращая внимание на каждое слово, термин, понятие, тщательно прослеживая связь между ними. Постарайтесь четко представить себе, о каком явлении (процессе) идет речь; вспомните физический смысл величин; выясните, какие величины (параметры), характеризующие это явление (процесс), явно или неявно задаются, а какие надо определить. Такое рассмотрение усло-

вия позволит вам установить, по какому разделу или теме составлена данная задача.

**2. Запись краткого условия задачи.** Используя общепринятые обозначения, выпишите известные (заданные) величины, избавившись от дольных и кратных единиц СИ, а искомые величины разместите отдельно под чертой. Компактная запись условия позволяет быстрее ориентироваться во всей совокупности данных, на основе которых надлежит решить задачу.

**3. Выполнение иллюстраций к задаче.** Выполните соответствующий условию рисунок (схему, график и т. д.). Он позволит прояснить содержание задачи и изобразить величины (особенно векторные), о которых говорится в задаче.

**4. Анализ содержания задачи и поиск путей ее решения.**

а) Осмыслите допущения и упрощающие предположения, которые оговорены в тексте задачи или подразумеваются. Иногда вам самим нужно сделать необходимые допущения (например, пренебречь трением или сопротивлением воздуха в задачах механики).

б) Предыдущие действия позволили вам подойти вплотную к анализу физического содержания задачи, который позволит установить математические связи между величинами, указанными в условии задачи, и другими величинами, характеризующими данное явление. В результате этого вы сможете обнаружить недостающие данные справочного характера и подойти, что очень важно, к составлению уравнений (или уравнения), являющихся основой решения задачи.

**5. Составление уравнений и их решение.** Необходимые уравнения составляются с использованием законов, лежащих в основе рассматриваемых явлений, и с учетом указанных в задаче или сделанных вами допущений. Решив составленное уравнение (или систему уравнений), вы получите формулу, выражающую искомую величину через известные величины, и сможете рассчитать ее значение.

**6. Проверка и анализ полученного уравнения.**

а) Вместо обозначений физических величин подставьте в формулу единицы их измерения в СИ. Выполните над ними необходимые математические действия. В результате должна получиться единица измерения искомой величины. Несовпадение единиц левой и правой частей является явным признаком неверности решения. Это действие полезно еще в одном отношении – оно способствует осмысленному запоминанию учебного материала (уравнений, формул, единиц физических величин и др.).

б) Проверьте, если это возможно, применимость полученной вами формулы к известным частным случаям. Если уравнение имеет не одно решение, то надо обязательно выяснить физический смысл и применимость каждого из них.

**7. Численные расчеты.** Подставьте числовые значения всех величин в расчетную формулу и произведите вычисления. При решении тестовых задач чаще всего достаточно получить приближенный ответ. Стремитесь оценить полученный результат с точки зрения его правдоподобности и соответствия условиям, оговоренным в задаче.

После повторения теоретического материала переходите к проработке примеров (решенных задач в пособиях) или решайте задачи (из сборников или тестов). При этом важно каждый раз проследить, как практически реализуется рекомендованный выше общий план решения, осмыслить применяемые приемы и методы решения. Не запоминайте решения, а стремитесь всегда понять логику приведенных рассуждений. С целью самопроверки полезно воспроизвести самостоятельно решение той или иной задачи, приведенное в пособиях.

Подготовка к вступительным экзаменам и сами испытания – ответственный период в вашей жизни. Он отличается напряженным умственным трудом, требует мобилизации всех сил и способностей. Поэтому очень важно четко планировать свою работу на весь период подготовки и на каждый день. Старайтесь строго соблюдать режим, управлять своими волевыми усилиями, осознанно регулировать эмоциональное состояние.

В ходе экзамена (при работе над тестовыми задачами) важно быть в бодром состоянии, внутренне сосредоточенным и активным. В таком случае повышается возможность владеть собой, мобилизовать внимание, память, мышление и полнее использовать и проявить имеющиеся знания и опыт. Растерянность, чрезмерное волнение приводят к снижению устойчивости внимания, к торможению мыслительных процессов. Никогда не суетитесь, тщательно обдумывайте и проверяйте каждый шаг ваших действий, так как малейшая неточность даже при выполнении математических операций может свести на нет все ваши предыдущие правильные действия физическое плана.

Надеемся, что наши советы и рекомендации помогут вам при подготовке к вступительным экзаменам. **Желаем успеха!**

## ОБРАЗЕЦ ТЕСТА ПО ФИЗИКЕ

### Инструкция для абитуриентов

Тест состоит из 33 заданий типа А и 7 заданий типа В. На его выполнение отводится 180 минут. Задания можно выполнять в том порядке, как они расположены в тесте, либо, ориентируясь по сокращенным обозначениям отдельных разделов физики (*МЕХ* – механика, *МОЛ* – молекулярная физика, *КОЛ* – колебания и волны, *ЭЛ* – электростатика и постоянный ток, *МАГ* – магнетизм, *ОПТ* – оптика, *СТО* – специальная теория относительности, *КВ* – квантовая и ядерная физика), решать задания каждого раздела отдельно. Если задание не удастся выполнить сразу, перейдите к следующему и, если останется время, вернитесь к пропущенным заданиям. При выполнении теста разрешено пользоваться калькулятором. Во всех тестовых заданиях, если специально не оговорено в условии, сопротивлением воздуха при движении тел следует пренебречь, а ускорение свободного падения  $g$  следует полагать равным  $10 \text{ м/с}^2$ . Универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ . Число Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ . Постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ . Заряд электрона  $e = 1,62 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ . Масса протона  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Масса нейтрона  $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ . Атомная единица массы:  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

#### Часть 1. Задания типа А.

*К каждому заданию в части А дано несколько ответов, из которых только один верный. Номер своего ответа сопоставьте с номером правильного ответа в таблице на стр. 15.*

**А1 МЕХ 1.** Какие из приведенных зависимостей пути  $s$  и модуля скорости  $v$  от времени  $t$ :

1) $v = 4 + 2t$	2) $s = 3 + 5t$	3) $s = 5t^2$	4) $s = 3t^2 + 2t$	5) $v = 2 + 3t + 4t^2$
-----------------	-----------------	---------------	--------------------	------------------------

описывают равноускоренное прямолинейное движение точки?

1) 1, 3, 4	2) 2, 3, 4	3) 3, 4, 5	4) 4, 5, 1	5) 5, 1, 2
------------	------------	------------	------------	------------

**А2 МОЛ 1.** Единица давления Па в системе СИ может быть представлена как

1) $\text{кг/м}^2$	2) $\text{кг/м}^3$	3) $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$	4) $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	5) $\text{кг/с}^2$
--------------------	--------------------	--	--	--------------------

**А3 МЕХ 2.** По двум параллельным железнодорожным путям равномерно движутся два поезда в одном направлении: грузовой – со скоростью 48 км/ч и пассажирский – со скоростью 102 км/ч. Какова величина относительной скорости поездов?

1) 5 м/с	2) 10 м/с	3) 15 м/с	4) 20 м/с	5) 25 м/с
----------	-----------	-----------	-----------	-----------

**A4 МЕХ 2.** Если массу спутника, движущегося по круговой орбите над поверхностью Земли на высоте  $h \ll R_3$ , увеличить в 2 раза, его первая космическая скорость

1) увеличится в 4 раза	2) увеличится в 2 раза	3) не изменится	4) уменьшится в 2 раза	5) уменьшится в 4 раза
------------------------	------------------------	-----------------	------------------------	------------------------

**A5 МОЛ 2.** Чтобы при изобарном нагревании газа его объем увеличился вдвое по сравнению с объемом при  $0^\circ\text{C}$ , температуру газа нужно

1) уменьшить на $200^\circ\text{C}$	2) увеличить на $200^\circ\text{C}$	3) увеличить на $273^\circ\text{C}$	4) увеличить на $372^\circ\text{C}$	5) увеличить на $546^\circ\text{C}$
-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

**A6 КОЛ 2.** Материальная точка совершает синусоидальные колебания с амплитудой 8 см и начальной фазой  $\pi/3$ . При частоте колебаний 0,25 Гц через одну секунду после начала колебаний смещение точки от положения равновесия будет равно

1) 2 см	2) 4 см	3) 6 см	4) 7 см	5) 8 см
---------	---------	---------	---------	---------

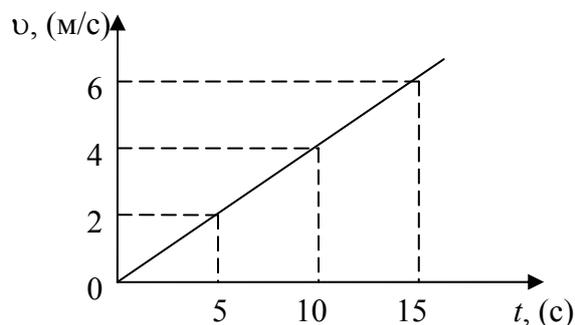
**A7 МЕХ 3.** Если поезд, двигаясь от остановки с постоянным ускорением, прошел 180 м за 15 с, то за первые 5 с от начала движения он прошел

1) 10 м	2) 20 м	3) 36 м	4) 60 м	5) 80 м
---------	---------	---------	---------	---------

**A8 МЕХ 3.** Дальность полета тела, брошенного с башни в горизонтальном направлении со скоростью 10 м/с, равна высоте бросания. С какой высоты брошено тело?

1) 15 м	2) 20 м	3) 30 м	4) 10 м	5) 50 м
---------	---------	---------	---------	---------

**A9 МЕХ 3.** График зависимости скорости от времени для груза массой 50 кг, который поднимают вверх с помощью троса, представлен на графике. Какова сила натяжения троса?  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .



1) 10 Н	2) 510 Н	3) 480 Н	4) 520 Н	5) 500 Н
---------	----------	----------	----------	----------

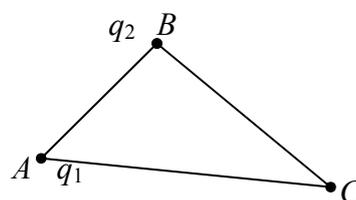
**A10 МОЛ 3.** Если в сосуде при давлении  $10^5$  Па плотность идеального газа составляет  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , то средняя квадратичная скорость молекул этого газа равна

1) 160 м/с	2) 250 м/с	3) 300 м/с	4) 450 м/с	5) 500 м/с
------------	------------	------------	------------	------------

**A11 ЭЛ 3.** Как уменьшится сила кулоновского взаимодействия двух точечных разноименных электрических зарядов в вакууме, если положительный заряд уменьшили вдвое, а отрицательный увеличили в 4 раза? Расстояние между зарядами не изменилось.

1) уменьшится в 2 раза	2) увеличится в 2 раза	3) увеличится в 8 раз	4) уменьшится в 8 раз	5) увеличится в 4 раза
------------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------

**A12 ЭЛ 3.** Определить потенциал поля, создаваемого двумя зарядами  $q_1 = 5 \text{ мкКл}$  и  $q_2 = -4 \text{ мкКл}$ , находящимися в вершинах  $A$  и  $B$  треугольника  $ABC$ , в его третьей вершине  $C$ .  $BC = 40 \text{ см}$ ,  $AC = 50 \text{ см}$ .



1) $18 \cdot 10^4 \text{ В}$	2) $9 \cdot 10^4 \text{ В}$	3) $0 \text{ В}$	4) $-9 \cdot 10^4 \text{ В}$	5) $-18 \cdot 10^4 \text{ В}$
------------------------------	-----------------------------	------------------	------------------------------	-------------------------------

**A13 ЭЛ 3.** При замыкании источника тока на внешнее сопротивление  $4 \text{ Ом}$  в цепи протекает ток  $0,3 \text{ А}$ , а при замыкании на сопротивлении  $7 \text{ Ом}$  протекает ток  $0,2 \text{ А}$ . Определите ЭДС источника.

1) $2,7 \text{ В}$	2) $2,4 \text{ В}$	3) $2,1 \text{ В}$	4) $1,8 \text{ В}$	5) $1,5 \text{ В}$
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

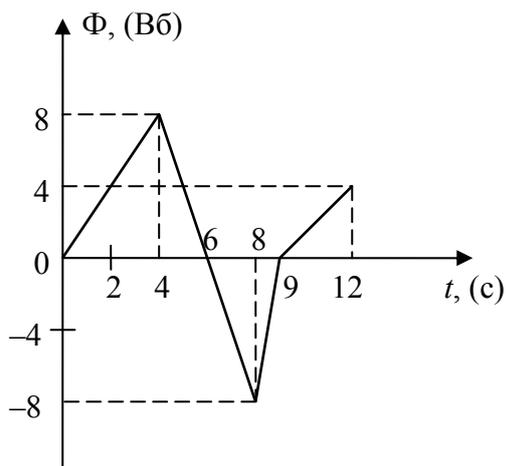
**A14 ЭЛ 3.** Через раствор соли серебра пропускался ток, плотность которого  $j$ . Электрохимический эквивалент серебра равен  $k$ , плотность серебра  $\rho$ . За время электролиза выделился слой серебра толщиной  $h$ . Определите время электролиза.

1) $\frac{h\rho}{4kj}$	2) $\frac{h\rho}{kj}$	3) $\frac{2h\rho}{kj}$	4) $\frac{h\rho}{2kj}$	5) $\frac{4h\rho}{kj}$
------------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	------------------------

**A15 КОЛ 3.** С какой частотой будет раскачиваться математический маятник в салоне самолета, движущегося в горизонтальном направлении с ускорением  $4 \text{ м/с}^2$ . Длина маятника  $43 \text{ см}$ .

1) $0,2 \text{ с}^{-1}$	2) $0,4 \text{ с}^{-1}$	3) $0,6 \text{ с}^{-1}$	4) $0,8 \text{ с}^{-1}$	5) $1,0 \text{ с}^{-1}$
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

**A16 МАГ 3.** При изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, как показано на графике, максимальный модуль ЭДС индукции, возникающей в контуре, наблюдается в промежуток времени



1) 0–4 с	2) 4–6 с	3) 4–8 с	4) 8–9 с	5) 9–12 с
----------	----------	----------	----------	-----------

**A17 ОПТ 3.** Луч света падает на плоскопараллельную пластину под углом  $60^\circ$ . Угол преломления  $30^\circ$ . При выходе из пластинки луч сместился на расстояние, равное 5,8 см. Толщина пластинки равна

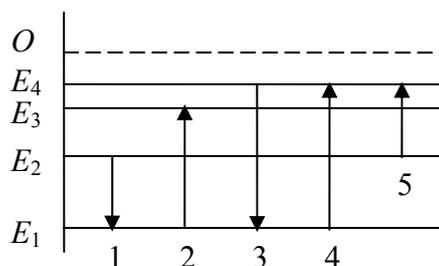
1) 6,5 см	2) 15,0 см	3) 18 см	4) 10,0 см	5) 9,0 см
-----------	------------	----------	------------	-----------

**A18 ОПТ 3.** Изображение точечного источника света  $S^*$  и сам источник  $S$  расположены относительно главной оптической оси тонкой линзы так, как показано на рисунке. Формула линзы для данного случая имеет вид



1) $-D = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f}$	2) $D = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$	3) $-D = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$	4) $-D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$	5) $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$
---	---------------------------------------	--	--	---------------------------------------

**A19 КВ 3.** На диаграмме энергетических уровней атома, переход, связанный с излучением фотона наибольшей частоты, изображен стрелкой



1) 1	2) 2	3) 3	4) 4	5) 5
------	------	------	------	------

**A20 КВ 3.** Найдите энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра  ${}_{27}^{59}\text{Co}$ , если  $m_p = 1,0078$  а.е.м.,  $m_n = 1,0087$  а.е.м.,  $M_{\text{я}} = 58,9332$  а.е.м.

1) 6,35 МэВ	2) 7,75 МэВ	3) 8,78 МэВ	4) 9,79 МэВ	5) 11,15 МэВ
-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

**A21 МЕХ 4.** Во сколько раз центростремительное ускорение тела на экваторе больше, чем на широте 60 градусов?

1) $\sqrt{3}/2$	2) $\sqrt{3}$	3) 2	4) $\sqrt{2}$	5) 5
-----------------	---------------	------	---------------	------

**A22 МЕХ 4.** Мотоциклист совершает крутой поворот, двигаясь по дуге окружности радиусом 10 м со скоростью 10 м/с. Под каким углом к горизонту он должен наклониться, чтобы сохранить равновесие?

1) $\alpha = \arctg 0,1$	2) $\alpha = \pi/6$	3) $\alpha = 45^\circ$	4) $\alpha = \arctg 0,5$	5) $\alpha = \arcsin 0,1$
--------------------------	---------------------	------------------------	--------------------------	---------------------------

**A23 МОЛ 4.** Баллон содержит идеальный газ при температуре 27 °С и давлении 250 кПа. Если из баллона выпустить 80 % газа и охладить его до температуры 12°С, то в баллоне установится давление

1) 38 кПа	2) 152 кПа	3) 94 кПа	4) 72 кПа	5) 76 кПа
-----------	------------	-----------	-----------	-----------

**A24 МОЛ 4.** Какое количество теплоты получил одноатомный идеальный газ при изобарическом нагревании, если его внутренняя энергия увеличилась на 150 Дж?

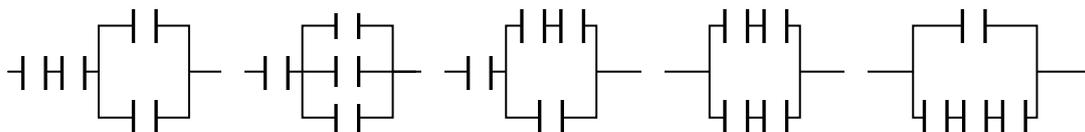
1) 150 Дж	2) 200 Дж	3) 250 Дж	4) 300 Дж	5) 350 Дж
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

**A25 МОЛ 4.** В идеальной тепловой машине абсолютная температура холодильника вдвое меньше температуры нагревателя. Не меняя температуры нагревателя, температуру холодильника понизили вдвое. Определите, во сколько раз увеличился КПД машины.

1) 3/2	2) 3	3) 2	4) 4/3	5) 5/2
--------	------	------	--------	--------

**A26 ЭЛ 4.** Имеется 4 одинаковых конденсатора емкостью  $C$  каждый. По какой схеме нужно их соединить, чтобы общая емкость была равна  $3C/4$ ?

А)                      Б)                      В)                      Г)                      Д)



1) А	2) Б	3) В	4) Г	5) Д
------	------	------	------	------

**A27 ЭЛ 4.** При подключении к источнику постоянного тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$  двух одинаковых сопротивлений во внешней цепи выделится одна и та же мощность как при последовательном, так и при параллельном их соединении. Мощность во внешней цепи равна

1) $\frac{\varepsilon^2}{3r}$	2) $\frac{\varepsilon^2}{r}$	3) $\frac{3\varepsilon^2}{r}$	4) $\frac{\varepsilon^2}{4r}$	5) $\frac{2\varepsilon^2}{9r}$
-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------

**A28 МАГ 4.** Электрон движется по окружности радиуса 2 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,02 Тл. Найдите импульс электрона.

1) $6,4 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с	2) $3,2 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с	3) $12,8 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с	4) $1,6 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с	5) $1,28 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с
-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------

**A29 МАГ 4.** Медное кольцо радиусом 5 см помещают в однородное магнитное поле с индукцией 8 мТл перпендикулярно линиям индукции. Какой заряд (в мКл) пройдет по кольцу, если его повернуть на  $180^\circ$  вокруг оси, совпадающей с его диаметром. Сопротивление единицы длины кольца 2 мОм/м.

1) 50	2) 100	3) 150	4) 200	5) 250
-------	--------	--------	--------	--------

**A30 МАГ 4.** Резонанс в колебательном контуре, содержащем конденсатор емкостью 2 мкФ, наступает при частоте 300 Гц. Если параллельно первому конденсатору подключают другой конденсатор, то резонансная частота становится равной 100 Гц. Найдите емкость второго конденсатора.

1) 8 мкФ	2) 12 мкФ	3) 16 мкФ	4) 18 мкФ	5) 20 мкФ
----------	-----------	-----------	-----------	-----------

**A31 КОЛ 4.** Небольшой шарик, подвешенный на легкой пружине, совершает вертикальные гармонические колебания с амплитудой 2 см. Полная энергия колебаний 0,3 мДж. При каком смещении (в мм) от положения равновесия на шарик действует возвращающая сила 22,5 мН?

1) 15 мм	2) 20 мм	3) 25 мм	4) 30 мм	5) 35 мм
----------	----------	----------	----------	----------

**A32 СТО 4.** Найдите кинетическую энергию электрона в МэВ, движущегося со скоростью 0,6  $c$  ( $c$  – скорость света в вакууме).

1) 0,1 МэВ	2) 0,13 МэВ	3) 0,16 МэВ	4) 0,2 МэВ	5) 0,25 МэВ
------------	-------------	-------------	------------	-------------

**A33 ЭЛ 5.** Протон и  $\alpha$ -частица, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в заряженный плоский конденсатор параллельно пластинам. Как соотносятся между собой на выходе из конденсатора смещение протона ( $h_p$ ) и  $\alpha$ -частицы ( $h_\alpha$ ) по оси, перпендикулярной пластинам конденсатора?

1) $h_p = 4h_\alpha$	2) $h_p = 2h_\alpha$	3) $h_p = h_\alpha$	4) $h_\alpha = 2h_p$	5) $h_\alpha = 4h_p$
----------------------	----------------------	---------------------	----------------------	----------------------

## Часть 2. Задания типа В.

Ответом может быть только число, равное значению искомой величины, выраженной в единицах измерения, указанных в условии задания. Если в ответе получается число в виде дроби, то округлите его до целого числа и сопоставьте с правильным ответом в таблице на с. 15.

**В1 МАГ 2.** Длина прямолинейного проводника, на который со стороны однородного магнитного поля с индукцией  $0,1$  Тл действует сила  $1$  Н при пропускании по проводнику тока  $5$  А, причем проводник расположен под углом  $30^\circ$  к вектору индукции поля, равна... (м).

**В2 ОПТ 2.** Если дифракционную решетку с периодом  $0,01$  мм заменить решеткой с периодом  $0,02$  мм, изменение числа максимумов дифракционного спектра излучения с длиной волны  $600$  нм будет равно....

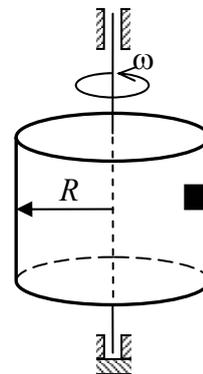
**В3 КВ 2.** Если минимальная частота излучения, способного вызвать фотоэффект у платины, равна  $1,28 \cdot 10^{15}$  Гц, то при облучении платины излучением с частотой  $1,5 \cdot 10^{15}$  Гц наибольшая кинетическая энергия вырываемых электронов будет равна... (эВ).

**В4 МОЛ 3.** Если смешать две жидкости одинаковой массы и удельной теплоемкости, но разной температуры – температура первой жидкости  $250$  К, температура второй  $350$  К, то температура образовавшейся смеси будет равна... (в  $^\circ\text{C}$ ).

**В5 МЕХ 4.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $30$  м/с. Если принять потенциальную энергию тела в точке бросания равной нулю, то кинетическая энергия тела будет равна половине его потенциальной энергии при подъеме на высоту, равную... (м).

**В6 ЭЛ 4.** Стальной шарик плотностью  $7,8$  г/см<sup>3</sup> и радиусом  $1$  см помещен в воду. Однородное электрическое поле создано двумя параллельными пластинами и направлено вертикально вверх. Расстояние между пластинами  $20$  см, разность потенциалов  $400$  В. Чтобы шарик оказался взвешенным в жидкости, его заряд должен быть равен... (мкКл).

**В7 МЕХ 5.** Цилиндр радиуса  $R$ , расположенный вертикально, вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью, равной  $\omega$ . На внутренней поверхности цилиндра находится небольшое тело, вращающееся вместе с цилиндром. Тело не будет скользить вниз при минимальной величине коэффициента трения скольжения между телом и поверхностью цилиндра, равном....



## ТАБЛИЦЫ ОТВЕТОВ

### Номера правильных ответов на задания типа А

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
1	4	3	3	3	2	2	2	4	5	2
A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22
3	4	2	4	4	4	2	3	3	3	3
A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33
1	3	1	2	1	1	4	3	1	2	2

### Ответы на задания типа В

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
4	16	1	27	30	142	$\frac{g}{\omega^2 R}$

# Тема 1. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

## Программа по теме

Механическое движение. Система отсчета. Относительность движения. Материальная точка. Траектория. Путь и перемещение.

Равномерное движение. Графическое представление равномерного движения.

Неравномерное движение. Средняя скорость. Мгновенная скорость. Закон сложения скоростей в классической механике.

Равноускоренное движение. Ускорение. Графическое представление равноускоренного движения. Свободное падение.

Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью. Линейная и угловая скорости. Период и частота вращения. Центробежное ускорение.

## Основные теоретические положения и рекомендации

**Кинематика** – это раздел механики, изучающий механическое движение без учета причин (сил), которые его вызывают.

**Механическим движением тела** называется изменение положения тела или его частей в пространстве относительно других тел с течением времени. Положение тела в пространстве и его движение можно задать только относительно какого-нибудь другого тела (тела отсчета). С телом отсчета связывают определенным образом выбранную систему координат и способ (прибор) измерения времени (они образуют *систему отсчета*). Чаще всего в качестве системы координат выбирают прямоугольную декартову систему, один из вариантов которой для определения положения точки соответственно на прямой, плоскости и в пространстве изображен на рис. 1.

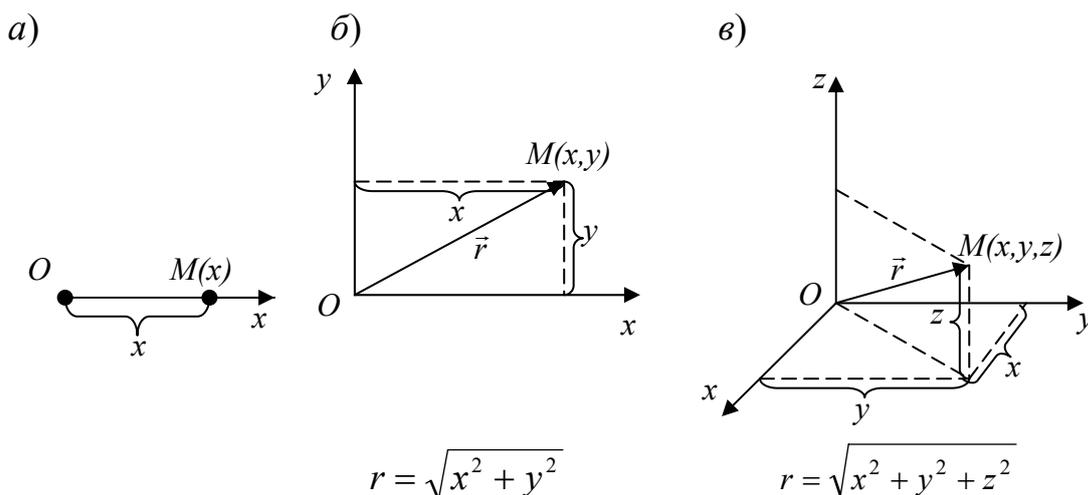


Рис. 1

Основными кинематическими характеристиками движения являются *перемещение, скорость, ускорение, траектория* и пройденный телом *путь*. Эти характеристики зависят от используемой системы отсчета, поэтому механическое движение является *относительным*.

Одним из основных понятий кинематики является **материальная точка**, под которой понимают тело, размерами которого в данной конкретной задаче можно пренебречь.

**Траектория** – линия, которую описывает материальная точка в пространстве при своем движении. **Путь**  $s$  – расстояние, пройденное точкой при ее движении по траектории (путь  $s$  – скалярная положительная величина).

**Перемещение**  $\Delta \vec{r}$  – вектор, соединяющий начальное и конечное положения точки. В общем случае  $|\Delta \vec{r}| \neq s$  (см. рис. 2), при прямолинейном движении тела в одном направлении  $|\Delta \vec{r}| = s$ .

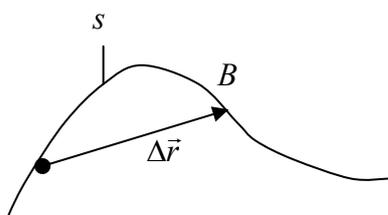


Рис. 2

По виду траектории точки различают *прямолинейное* и *криволинейное* движения. По характеру движения точки по любой траектории движение может быть *равномерным* и *неравномерным*. Используют понятия *средней* и *мгновенной* скорости. **Средняя скорость точки** численно равна отношению пройденного пути  $\Delta s$  к промежутку времени  $\Delta t$  движения.

$$\boxed{v_{cp} = \Delta s / \Delta t, \text{ или } v_{cp} = s/t.} \quad (1.1)$$

**Мгновенная скорость** (вектор) – это скорость в данный момент времени в данной точке траектории. Она характеризует быстроту и направление движения в положении, соответствующем этому моменту времени:

$$\boxed{\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t},} \quad (1.2)$$

где  $\Delta \vec{r}$  – малое перемещение, а  $\Delta t$  – малый промежуток времени, за который это перемещение произошло. Вектор скорости  $\vec{v}$  всегда направлен по касательной к траектории. Единица скорости  $[v] = 1 \text{ м/с}$ .

Величина, характеризующая изменение вектора скорости в единицу времени, называется **ускорением**.

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{D\vec{v}}{\Delta t} \text{ – мгновенное ускорение,} \quad (1.3)$$

где  $D\vec{v}$  – малое изменение вектора мгновенной скорости за малый промежуток времени  $\Delta t$ . Единица ускорения  $[a] = 1 \text{ м/с}^2$ . В случае прямолинейной траектории вектор ускорения  $\vec{a}$  направлен так же, как и вектор скорости при ускоренном движении, и противоположно вектору скорости – при замедленном движении. При криволинейном движении ускорение направлено под некоторым углом к вектору скорости.

*Движение, при котором тело за любые равные промежутки времени проходит одинаковые расстояния, называется **равномерным***. Если к тому же траектория движения прямая, то движение будет равномерным и прямолинейным. Для такого движения ускорение  $\vec{a} = 0$ , скорость  $\vec{v} = \text{const}$ , перемещение  $\Delta\vec{r} = \vec{v}\Delta t$ , а пройденный путь

$$s = vt \text{ – для равномерного движения.} \quad (1.4)$$

*Движение тела, при котором модуль скорости за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину, называется **равнопеременным движением***. Если при этом движение прямолинейное (и  $\vec{a} = \text{const}$ ), то векторы скорости и перемещения определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{a}t \\ \Delta\vec{r} &= \vec{v}_0t + \vec{a}t^2/2 \end{aligned} \text{ – для равнопеременного движения по прямой.} \quad (1.5)$$

Если при этом вектор ускорения  $\vec{a}$  сонаправлен с вектором скорости  $\vec{v}$ , то движение будет равноускоренным, если вектор  $\vec{a}$  противоположен  $\vec{v}$ , то движение равнозамедленное. Для прямолинейного равнопеременного движения уравнения (1.5) можно записать в скалярном виде ( $|\Delta\vec{r}| = s$ ):

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \\ s &= v_{0x}t + a_x t^2 / 2. \end{aligned} \text{ – уравнения в проекции на ось } x. \quad (1.6)$$

Если из формул (1.6) для скорости и пути исключить время, то получим очень важную для решения задач формулу, связывающую пройденный путь ( $s$ ) и модуль ускорения ( $a$ ) с модулями конечной ( $v$ ) и начальной ( $v_0$ ) скорости:

$$v^2 - v_0^2 = \pm 2as. \quad (1.6^*)$$

Если точка одновременно участвует в двух движениях (сложное

движение), то ее результирующее перемещение  $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2$ , а результирующая скорость  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ , т. е. перемещения и скорости тела складываются как векторы (по правилу параллелограмма или треугольника). Здесь  $\Delta\vec{r}_1$  и  $\vec{v}_1$  – перемещение и скорость тела относительно подвижной системы отсчета (например, движение пассажира относительно вагона);  $\Delta\vec{r}_2$  и  $\vec{v}_2$  – перемещение и скорость пассажира вместе с подвижной системой (вагоном) относительно неподвижной (например, полотна дороги);  $\Delta\vec{r}$  и  $\vec{v}$  – результирующее перемещение и скорость точки относительно системы координат, условно выбранной за неподвижную (пассажира относительно полотна дороги).

Важным частным случаем равнопеременного прямолинейного движения является *свободное падение* тел, которое осуществляется под действием только силы тяжести на высотах  $h \ll R$ , где  $R$  – радиус планеты. Ускорение свободного падения  $\vec{g}$  совпадает по направлению с вектором силы тяжести. Оно не зависит от массы тела, но зависит от широты местности и высоты  $h$ , на которой находится движущееся у поверхности Земли тело. На широте  $\varphi = 45^\circ$  и на уровне моря ускорение  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . При соблюдении условия  $h \ll R$  ускорение свободного падения  $\vec{g} = \text{const}$ , и поэтому можно использовать формулы равнопеременного движения (с учетом того, что  $\vec{a} = \vec{g}$ ), т. е.

$$\boxed{v = v_0 \pm gt, h = h_0 + v_0 t \pm \frac{gt^2}{2} \text{ – уравнения свободного падения. (1.7)}}$$

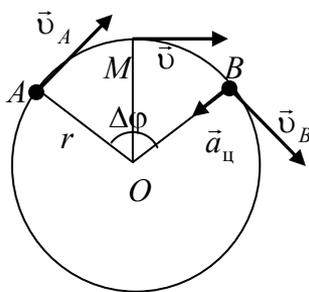


Рис. 3

**Равномерное движение по окружности** – простейший частный и наиболее важный случай криволинейного движения – это такое движение, при котором скорость точки с течением времени не изменяется по величине, а изменяется только по направлению. Скорость  $\vec{v}$  (линейная) движения точки  $M$  в любой момент времени направлена по касательной к траектории движения (рис. 3). Поскольку скорость точки изменяется по направлению,

то при равномерном движении по окружности точка имеет ускорение. Это ускорение направлено в любой момент времени к центру  $O$  и называется *центростремительным ускорением*. Можно показать, что центростремительное ускорение

$$a_{\text{ц}} = v^2 / r - \text{центробежное ускорение.} \quad (1.8)$$

Поскольку при этом движении  $v$  и  $r$  – постоянные величины, то и  $a_{\text{ц}} = \text{const}$ . Для описания равномерного движения точки по окружности вводят понятия *периода*  $T$ , *частоты*  $n$ , т. е. числа оборотов в единицу времени и угловой скорости  $\omega$ . **Период**  $T$  – *промежуток времени, за который тело совершает один полный оборот*, т. е.  $T = 2\pi r / v$  ( $T = 1/n$ ). Единица периода  $[T] = 1 \text{ с}$ , а единица частоты  $[n] = 1 \text{ с}^{-1}$ . Если движущуюся точку соединить с центром окружности, то радиус  $r = OM$  (рис. 3) при перемещении точки  $M$  из  $A$  в  $B$  за время  $\Delta t$  повернется на угол  $\Delta\phi$ . Быстроту этого поворота характеризуют *угловой скоростью*

$$\omega = \Delta\phi / \Delta t = 2\pi / T = 2\pi n. \quad (1.9)$$

Единица угловой скорости  $[\omega] = 1 \text{ рад/с}$ .

Поскольку  $\Delta\phi = \Delta S / r$ , то  $\omega = v / r$ , тогда центробежное ускорение

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} r = 4\pi^2 n^2 r. \quad (1.10)$$

При вращении тела вокруг оси все его точки (кроме тех, которые лежат на оси вращения) движутся по окружностям, поэтому их скорость  $v$  связана с угловой скоростью  $\omega$  тела соотношением

$$v = \omega r - \text{связь линейной и угловой скоростей.} \quad (1.11)$$

## Тема 2. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ И СТАТИКИ

### Программа по теме

Первый закон Ньютона. Инерциальная система отсчета. Принцип относительности Галилея. Масса. Сила. Сложение сил.

Второй закон Ньютона.

Третий закон Ньютона.

Силы упругости. Виды деформаций. Закон Гука.

Силы трения покоя, скольжения.

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Ускорение свободного падения.

Вес тела. Невесомость.

Движение искусственных спутников. Первая космическая скорость.

Момент силы. Условия равновесия тел. Центр тяжести тела. Центр масс тела. Виды равновесия.

### Основные теоретические положения и рекомендации

*Динамика* – это раздел механики, изучающий движение тел в зависимости от причин (сил), которые его вызывают. Основные величины динамики – масса, сила, импульс.

**Масса ( $m$ )** – мера инерционных и гравитационных свойств тел. Единица массы  $[m] = 1$  кг. Масса – величина скалярная. При малых скоростях движения масса не зависит от скорости. Эта зависимость проявляется при движениях со скоростями, приближающимися к скорости света.

**Сила ( $\vec{F}$ )** – векторная величина, характеризующая действие одного тела (или силового поля) на другое и вызывающая его ускорение и деформацию. Если на материальные точки действует несколько сил, то их действие можно заменить действием одной силы – равнодействующей, равной геометрической сумме составляющих сил. Следовательно, силы складываются как векторы (по правилу параллелограмма или треугольника).

**Импульс ( $\vec{p}$ )** – векторная величина, численно равная произведению массы тела на вектор скорости его движения:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Единица импульса  $[p] = 1$  кг·м/с.

В основе динамики лежат законы Ньютона.

**Первый закон Ньютона:** существуют такие системы отсчета, в которых всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока под действием сил оно не будет выведено из этого состояния. Системы отсчета, о ко-

торых идет речь в первом законе Ньютона, называются **инерциальными**, а сам закон называется **законом инерции**. Физический смысл первого закона Ньютона состоит в утверждении существования инерциальных систем отсчета. Если найдена хотя бы одна инерциальная система отсчета, то любая другая система, движущаяся относительно данной равномерно и прямолинейно, также будет инерциальной.

**Второй закон Ньютона:** ускорение, с которым движется тело (материальная точка), прямо пропорционально приложенной силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе этого тела, т. е.

$$\boxed{m\vec{a} = \vec{F} - \text{основной закон динамики.}} \quad (2.1)$$

Последняя форма записи чаще всего используется при решении задач. Во втором законе под силой  $\vec{F}$  следует в общем случае понимать равнодействующую всех сил, приложенных к телу. Единица силы – производная единица:  $[F] = [m][a] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ Н}$ .

Поскольку  $\vec{a} = (\vec{v} - \vec{v}_0) / \Delta t$ , то второй закон Ньютона ( $m\vec{a} = \vec{F}$ ) можно записать в следующем виде:

$$\boxed{m(\vec{v} - \vec{v}_0) = \vec{F}\Delta t - \text{закон изменения импульса.}} \quad (2.2)$$

Величина  $\vec{F}\Delta t$  – *импульс силы*. Следовательно, изменение импульса тела  $\Delta\vec{p} = m\vec{v} - m\vec{v}_0$  за некоторое время  $\Delta t$  равно импульсу равнодействующей всех сил, приложенных к телу, за то же время.

**Третий закон Ньютона:** при взаимодействии двух тел сила  $\vec{F}_1$ , с которой первое тело действует на второе, равна по величине и противоположна по направлению силе  $\vec{F}_2$ , с которой второе тело действует на первое, т. е.

$$\boxed{\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 - \text{третий закон Ньютона.}} \quad (2.3)$$

Кратко говорят, что при взаимодействии двух тел действие равно противодействию.  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  имеют одинаковую природу, но приложены к разным телам.

К этим трем законам Ньютона добавляют **закон независимого действия сил**: если на тело действует несколько сил, то результат действия каждой силы не зависит от действия остальных. Именно из этого закона вытекает геометрический способ сложения сил в динамике.

Под действием сил твердые тела, кроме приобретения ускорения, деформируются, т. е. изменяют свою форму и размеры. Основными видами деформаций являются деформации *растяжения* (или *сжатия*) и *сдвига*. Деформации бывают *упругими* и *неупругими*. При упругих деформациях после устранения действующей силы тело приобретает первоначальную форму и размеры.

Вследствие деформаций в телах возникают *силы упругости*. Сила упругости в случае растяжения – сжатия

$$\boxed{F = -k\Delta l \text{ – закон Гука (в области упругости)},} \quad (2.4)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение образца,  $k$  – коэффициент жесткости. Единица коэффициента жесткости  $[k] = 1 \text{ Н/м}$ . Знак «–» указывает на то, что сила упругости направлена в сторону, противоположную перемещению частиц тела при деформации.

Если принять во внимание площадь  $S$  поперечного сечения образца, его первоначальную длину  $l_0$  и деформирующую силу  $F$ , приложенную перпендикулярно поперечному сечению образца, то для относительной деформации  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  закон Гука примет следующий вид:

$$\boxed{\sigma = E\varepsilon,} \quad (2.5)$$

где  $\sigma = F/S$  – механическое напряжение,  $E = kl_0/S$  – модуль Юнга, который зависит только от материала тела. Единица модуля Юнга  $[E] = 1 \text{ Н/м}^2$ .

При относительном перемещении одного тела относительно другого, которое условно можно принять за неподвижное, возникает явление *трения*. Различают *сухое* и *вязкое* трения. Сухое трение будет в том случае, когда между соприкасающимися поверхностями отсутствует жидкость или специальная смазка. При их наличии говорят о вязком трении. Различают также *трение скольжения* и *трение качения* (например, в подшипниках). В случае трения скольжения выполняется закон, согласно которому сила трения  $F_{\text{тр}}$ , направленная противоположно скорости движущегося тела, прямо пропорциональна нормальной реакции поверхности  $N$ , по которой движется тело:

$$\boxed{F_{\text{тр}} = \mu N,} \quad (2.6)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения (безразмерная величина), зависящий от материала трущихся поверхностей, степени их обработки

и скорости движения.

Закон притяжения тел открыл Ньютон, анализируя известные результаты астрономических наблюдений (законы Кеплера) за движением небесных тел.

Этот закон гласит, что между любыми материальными точечными массами  $m_1$  и  $m_2$  существуют силы притяжения, прямо пропорциональные произведению масс этих тел и обратно пропорциональные квадрату расстояния между ними.

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ — закон всемирного тяготения или гравитации.} \quad (2.7)$$

Коэффициент пропорциональности  $G$  (гравитационная постоянная) определен опытным путем ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ). В записанной форме закон всемирного тяготения справедлив только: а) для тел, которые можно считать материальными точками; б) для тел со сферически симметричным распределением плотности (например, шаров). В этом случае под  $r$  следует понимать расстояние между центрами тел. В случае земного тяготения этот закон выполняется достаточно точно для любого тела, расположенного на Земле или вблизи ее поверхности, т. к. в этом случае его размеры малы по сравнению с радиусом Земли, а под  $r$  следует понимать расстояние от тела до центра Земли.

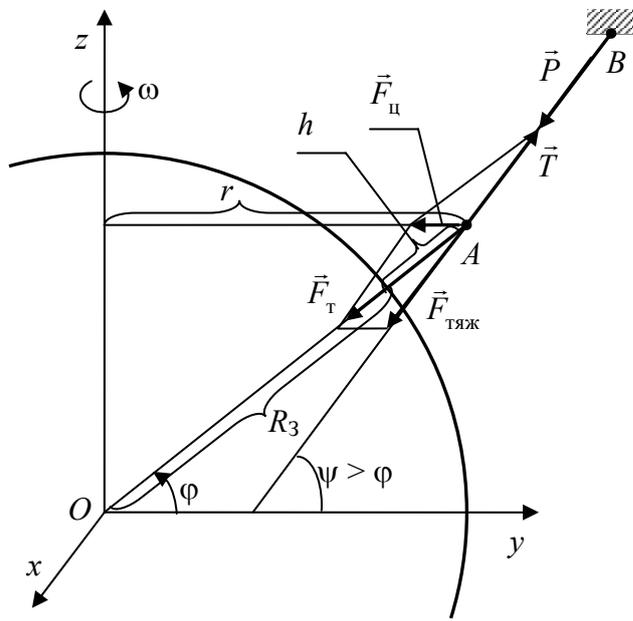


Рис. 4

Для уяснения различия между весом  $\vec{P}$  и силой тяжести  $\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}$ , а также ее физической сущности рассмотрим тело  $A$  массой  $m$ , которое закреплено в точке  $B$  подвеса с помощью короткой нити (троса) и находится в состоянии равновесия по отношению к Земле (рис. 4). Нить  $AB$  расположена вдоль вертикали, которая слегка отклонена от линии  $OA$ , определяющей широту  $\varphi$  местности, т. к. сила натяжения  $\vec{T}$  троса и

сила  $\vec{F}_T$  тяготения создают центростремительное ускорение, вызванное суточным вращением Земли. Поэтому равнодействующая этих сил называется *центростремительной силой*:

$$\boxed{\vec{F}_ц = \vec{F}_T + \vec{T}.} \quad (2.8)$$

Ее модуль можно рассчитать, используя второй закон Ньютона:

$$\boxed{F_ц = ma_ц = m \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r; \quad r = (R_3 + h) \cos \varphi.} \quad (2.9)$$

Сила  $\vec{F}_ц^*$ , которая равна по модулю центростремительной силе и противоположна ей по направлению, называется *центробежной* ( $\vec{F}_ц^* = -\vec{F}_ц$ ). Равнодействующая силы тяготения  $F_T$  и центробежной силы  $\vec{F}_ц^*$  является силой тяжести для заданной широты  $\varphi$ :

$$\boxed{\vec{F}_{тяж} = \vec{F}_T + \vec{F}_ц^* \Rightarrow \vec{F}_{тяж} = m\vec{g} - \text{сила тяжести}.} \quad (2.10)$$

Свободное, т. е. незакрепленное тело под действием силы тяжести будет (в отсутствие начальной скорости) двигаться по направлению к Земле. В случае  $h \ll R_3$  ( $h$  – высота, на которой находится тело над поверхностью Земли) это движение будет равноускоренным и прямолинейным (вдоль вертикали). Если тело получило начальную скорость в горизонтальном направлении или под некоторым углом к горизонту, то его движение будет *сложным*, поскольку тело движется равномерно и прямолинейно по горизонтали (в этом направлении силы не действуют) и равнопеременно по вертикали. Траекторией криволинейного движения тела в этом случае будет некоторая часть параболы или одной из ее ветвей.

Если тело закреплено на подвесе или лежит на подставке, то оно действует на опору с силой  $\vec{P}$ , которая называется *весом тела*. Вес тела  $\vec{P}$  отличается от силы тяжести  $\vec{F}_{тяж}$ : 1) сила тяжести приложена к самому телу и всегда  $\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}$ ; 2) сила веса приложена к подставке или подвесу и равна по величине и противоположна по знаку (согласно третьему закону Ньютона) силе реакции подвеса  $\vec{T}$  или подставки:

$$\boxed{\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}),} \quad (2.11)$$

где  $\vec{a}$  – ускорение движения несвободного тела. Например, при движении тела ускоренно вверх или замедленно вниз вес тела  $P$  числен-

но больше силы тяжести  $F_{\text{тяж}}$  (тело испытывает перегрузки). В случае, когда  $a = g$ , вес тела  $P = 0$  и оно находится в состоянии невесомости. В состоянии равновесия тела его вес равен силе тяжести.

Следует отметить, что, поскольку  $F_{\text{ц}} \ll F_{\text{Т}}$ , то сила тяжести мало отличается по величине и направлению от силы тяготения. Поэтому в практических расчетах можно считать, что  $mg = G m M_3 / R^2$ , тогда  $g \approx GM_3 / (R_3 + h)^2$ .

Искусственными спутниками Земли являются тела, движущиеся по траекториям (круговым или эллиптическим) на высотах  $h$ , малых по сравнению с радиусом Земли. Чтобы тело стало спутником, ему надо придать определенную скорость (*первую космическую скорость*). Ее можно рассчитать из условия, что для искусственного спутника, движущегося со скоростью  $\vec{v}_1$ , центростремительной силой является сила тяготения, т. е.  $m v_1^2 / (R_3 + h) = G m M_3 / (R_3 + h)^2$ . Отсюда  $v_1 = \sqrt{GM_3 / (R_3 + h)}$ . Как отмечалось выше, ускорение  $g \approx GM_3 / (R_3 + h)^2$ . Поэтому для первой космической скорости получаем  $v_1 = \sqrt{g(R_3 + h)}$ . В приближении  $h \ll R_3$  скорость  $v_1 = \sqrt{gR_3} = \sqrt{9,81 \cdot 6370 \cdot 10^3} = 7,9$  км/с.

Часто на практике приходится иметь дело с телами, которые являются неподвижными относительно некоторой системы отсчета, т. е. они находятся в равновесии. *Часть механики, в которой изучаются условия равновесия тел, называется статикой. Условием равновесия тела, которое может двигаться поступательно, является равенство нулю равнодействующей всех сил, приложенных к телу, т. е.*

$$\boxed{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \text{ — условие равновесия сил, приложенных к телу.}} \quad (2.12)$$

Если тело может вращаться около неподвижной оси, то для описания его движения или равновесия вводится понятие *момента силы*. **Моментом силы  $M_0$  относительно точки  $O$**  называется произведение модуля силы  $F$  на ее плечо  $d$ , т. е.

$$\boxed{M_0 = Fd} \quad (2.13)$$

**Плечом силы  $d$**  называется кратчайшее расстояние от центра вращения  $O$  (оси) до линии действия силы. Моменты сил, стремящих-

ся вызывать вращение тел по часовой стрелке, обычно принято считать положительными, а против часовой стрелки – отрицательными. Тело, имеющее неподвижную ось вращения (ось  $z$ ), находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех действующих на тело сил относительно этой оси равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^n M_{iz} = 0 \text{ – условие равновесия моментов сил.} \quad (2.14)$$

Если тело может двигаться поступательно и вращаться, то для его равновесия необходимо выполнение условий (2.12) и (2.14) одновременно.

**При решении задач данной темы рекомендуем:**

1. а) выяснить начальные условия движения точки или тела. Установить, какие силы действуют на рассматриваемый объект (тело) в процессе его движения, и изобразить эти силы на рисунке;

б) записать второй закон Ньютона в векторной форме  $m\vec{a} = \vec{F}$ , помня, что в правой части этого уравнения  $\vec{F}$  – равнодействующая всех сил, приложенных к данному телу. Если в задаче речь идет о движении системы тел, то такое уравнение надо записать для каждого тела системы. При необходимости нужно записать еще уравнения кинематики, связывающие соответствующие ускорения и (или) скорости;

в) с учетом геометрии задачи нужно выбрать систему координат. Направления осей ее должны быть такими, чтобы при проецировании на них векторных уравнений можно было получить наиболее простые скалярные уравнения. Например, при движении тела по наклонной плоскости ось  $OX$  системы координат выгоднее сориентировать вдоль направления вектора ускорения  $\vec{a}$ , ось  $OY$  – перпендикулярно ему;

г) спроецировать все записанные векторные уравнения на оси выбранной системы координат. Полученную систему уравнений решить относительно искомых величин.

Имейте в виду следующее. Силу реакции опоры необходимо находить только при решении тех задач, в которых учитывается сухое трение или если условие задачи этого требует. И еще. Если тела связаны нитью, массой которой можно пренебречь, то сила натяжения нити оказывается одинаковой по всей длине. Такое же утверждение

будет выполняться и в том случае, если нить перекинута через невесомый блок и если трением, возникающим при его вращении, пренебрегают.

2. Задачи по динамике равномерного движения по окружности решаются так же, как и задачи по динамике прямолинейного движения, с тем отличием, что при движении тела по окружности вектор ускорения (центростремительного) направлен к ее центру.

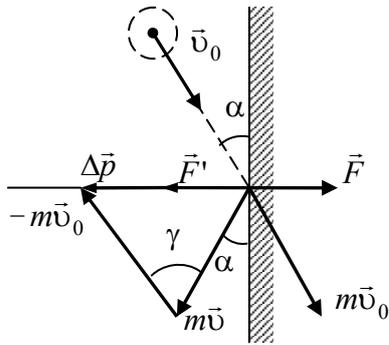


Рис. 5

3. При решении некоторых задач динамики необходимо использовать второй закон Ньютона в форме  $\Delta \vec{p} / \Delta t = \vec{F}$ . Поучительным примером может служить решение такой задачи. Мяч массой  $m$  ударяется о гладкую стенку под углом  $\alpha$  к ней и отскакивает без потери скорости. Найти модуль средней силы  $F$ , действующей на стенку со стороны мяча, если скорость мяча перед ударом равна  $v_0$ , а продолжительность удара  $\Delta t$ .

удара  $\Delta t$ .

Согласно третьему закону Ньютона, средняя сила  $\vec{F}$  (рис. 5) удара мяча о стенку равна по величине и противоположна по направлению средней силе  $\vec{F}'$ , с которой стенка действует на мяч. Именно сила  $\vec{F}'$  определяет изменение импульса  $\Delta \vec{p}$  мяча. По второму закону Ньютона  $\vec{F}' = \Delta \vec{p} / \Delta t$ . Подчеркнем, что вектор  $\Delta \vec{p}$  совпадает с направлением вектора  $\vec{F}'$ . Но  $\Delta \vec{p} = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ . Разность векторов  $m\vec{v}$  и  $m\vec{v}_0$  можно представить как сумму вектора  $m\vec{v}$  и вектора  $(-m\vec{v}_0)$  (рис. 5). Тогда вектор  $\Delta \vec{p}$  легко найти по правилу треугольника. Поскольку удар абсолютно упругий, то  $|m\vec{v}| = |m\vec{v}_0|$ . По теореме косинусов или другим способом находим, что  $|\Delta p| = 2|m v_0| \sin \alpha$  (угол  $\gamma = 2\alpha$ ). Поэтому модуль средней силы удара  $|F'| = (2|m v_0| \sin \alpha) / \Delta t$ .

Заметим, что экзаменуемые часто испытывают затруднения при решении такого типа задач. При их решении надо твердо помнить, что импульс тела – векторная величина, и уметь применять правило вычитания векторов или переходить к их проекциям на оси.

4. При решении задач на статическое равновесие тел, так же как и при решении динамических задач, нужно, прежде всего, выяснить, какие силы действуют на рассматриваемое тело. Записать в векторной

форме условие равновесия сил (см. уравнение (2.12)):  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0$ . Выбрать систему координат. При этом оси  $OX$  и  $OY$  направить так, чтобы проекции сил на них выражались по возможности наиболее просто. Для этого нужно проследить за тем, чтобы углы между некоторыми силами и выбранными направлениями осей оказались равными  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  или были заранее известны. Затем спроецировать векторное уравнение на выбранные оси. Решив совместно полученные скалярные уравнения, определить искомые величины.

В тех случаях, когда тело может вращаться вокруг неподвижной оси (или точки), необходимо воспользоваться условием (2.14) для равновесия моментов сил. Согласно ему, алгебраическая сумма моментов сил относительно любой оси (точки) равна нулю, т. е.  $M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = 0$ . При этом моменты сил, вращающие тело по часовой стрелке, берутся со знаком «+», а все моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, – со знаком «-». Если в задаче ось вращения не указана, то уравнение моментов сил составляют относительно любой оси, однако выбранной так, чтобы через нее проходили линии действия неизвестных сил.

В более сложных случаях приходится одновременно использовать и первое, и второе условия равновесия.

## Тема 3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

### Программа по теме

Импульс тела. Импульс силы. Закон сохранения импульса. Реактивное движение.

Механическая работа. Мощность. Работа силы тяжести, силы упругости, силы трения. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике.

Простые механизмы и их применение. Равенство работ при использовании простых механизмов. Коэффициент полезного действия механизмов.

### Основные теоретические положения и рекомендации

При рассмотрении законов сохранения импульса и энергии необходимо остановиться на понятии системы тел. *Под системой тел в механике понимают совокупность тел, взаимодействующих между собой посредством сил.* Силы, действующие на тела системы, подразделяются на внутренние, действующие между телами, входящими в систему, и внешние, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в рассматриваемую систему. *Если на систему внешние силы не действуют (или их действие взаимно скомпенсировано), система называется замкнутой.*

*Импульсом системы называется векторная сумма импульсов тел, образующих систему, т. е.  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = m_1\vec{v}_1 + m_1\vec{v}_1 + \dots + m_n\vec{v}_n$ .* Используя третий закон Ньютона, можно доказать, что изменить импульс системы могут только внешние силы. При этом  $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ . В этом соотношении под  $\Delta\vec{p}$  следует понимать изменение импульса системы, а под  $\vec{F}$  – векторную сумму всех внешних сил, приложенных к системе. Если механическая система замкнута ( $\vec{F} = 0$ ), то  $\Delta\vec{p} = 0$ . Это значит, что *при любых взаимодействиях, происходящих в замкнутой системе тел, импульс системы не изменяется.*

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const} \text{ – закон сохранения импульса.} \quad (3.1)$$

На законе сохранения импульса основано реактивное движение. Простейшая (сигнальная) ракета состоит из корпуса (рис. 6), осветительного вещества и порохового заряда. До зажигания импульс этой системы равен нулю, так как действие внешних сил скомпенсировано.

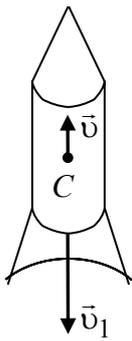


Рис. 6

При зажигании пороховые газы массой  $m_1$  будут вырываться из ракеты со скоростью  $\vec{v}_1$  вниз. Появится импульс  $\vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1$ . Согласно закону сохранения импульса, корпус ракеты и осветительный состав получат точно такой же импульс, направленный в противоположную сторону (вверх). Здесь рассмотрен только принцип реактивного движения. В действительности устройство и полет различного вида ракет значительно сложнее, хотя бы уже потому, что все топливо, содержащееся в ракете, сгорает не сразу, а постепенно, т. е. имеет место движение тел с изменяющейся

массой.

При перемещении тела на некоторое расстояние  $\Delta S$  под действием постоянной силы  $\vec{F}$  совершается механическая работа, численно равная (рис. 7)

$$\Delta A = F \Delta s \cos \alpha \text{ — определение работы силы.} \quad (3.2)$$

Работа — величина скалярная. Единица работы  $[A] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Дж}$  (джоуль).

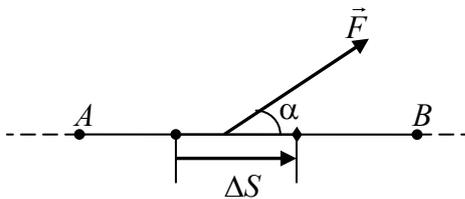


Рис. 7

В зависимости от значения  $\cos \alpha$  работа может быть положительной, отрицательной и равной нулю. Для нахождения полной работы при перемещении тела из точки  $A$  в точку  $B$  нужно просуммировать работы  $\Delta A$  на отдельных участках  $\Delta S$ .

Эффективность механизмов, совершающих работу, определяется их мощностью, которая численно равна  $\Delta A / \Delta t = N$ . Единица мощности  $[N] = \text{Дж/с} = 1 \text{ Вт}$  (ватт).

Количественной мерой различных видов движения и взаимодействия тел является энергия. В механике различают *кинетическую* и *потенциальную* энергии. **Кинетической энергией** обладает тело массой  $m$ , движущееся со скоростью  $v$ . Она рассчитывается по формуле

$$E_k = mv^2 / 2 \text{ — кинетическая энергия.} \quad (3.3)$$

Если имеется система движущихся тел, то их полная кинетическая энергия равна сумме энергий отдельных тел, т. е.

$E_k = \sum_{i=1}^n (m_i v_i^2 / 2)$ . Единица кинетической энергии  $[E_k] = 1$  Дж. Изме-

нить  $E_k$  можно, совершая над телом или системой тел работу  $A$ . В частности, если под действием какой-либо силы тело изменило свою скорость от  $v_0$  до  $v$ , то имеет место:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = A \text{ — теорема об изменении кинетической энергии.} \quad (3.4)$$

Если между телами действуют силы тяготения, тяжести, упругости, электростатического взаимодействия, работа в поле которых не зависит от формы пути, а зависит только от начального и конечного положения тела, то такие силы называются **потенциальными (или консервативными)**. Энергия взаимодействия между телами в этом случае называется **потенциальной энергией**.

Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту  $h$  над поверхностью Земли (нулевой уровень энергии  $E_{\text{п}}$  выбран на поверхности Земли):

$$E_{\text{п}} = mgh \text{ — энергия в поле сил тяжести.} \quad (3.5)$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела (пружины) при деформации растяжения – сжатия:

$$E_{\text{п}} = k(\Delta l)^2 / 2 \text{ — энергия деформированной пружины,} \quad (3.6)$$

здесь  $\Delta l$  – абсолютная деформация,  $k$  – коэффициент упругости. Сумма  $E = E_k + E_{\text{п}}$  есть полная механическая энергия системы.

Если на тела системы действуют только потенциальные (консервативные) силы, то полная энергия такой системы тел сохраняется. Кинетическая энергия в этом случае может переходить в потенциальную, и наоборот, но полная механическая энергия будет неизменной.

$$E = E_k + E_{\text{п}} = \text{const} \text{ — закон сохранения энергии в механике.} \quad (3.7)$$

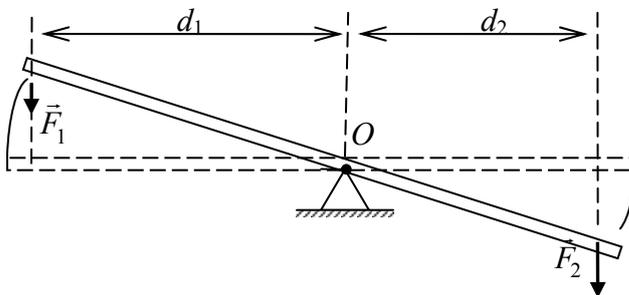


Рис. 8

**Простыми механизмами** называются устройства, позволяющие совершать работу без применения источников немеханической энергии. К ним относятся: наклонная плоскость,

рычаг, блок, ворот, клин, винт и др. С их помощью удастся изменить модуль (наклонная плоскость, рычаг) силы, совершающей работу, или ее направление (блок).

**Рычаг** – тело, имеющее ось вращения, к которому приложены силы, поворачивающие его относительно оси вращения. Условием равновесия рычага первого рода (рис. 8) является равенство значений моментов сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , приложенных к нему, т. е.

$$\boxed{F_1 d_1 = F_2 d_2} \text{ – правило рычага Архимеда,} \quad (3.8)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – плечи сил  $F_1$  и  $F_2$  соответственно. Аналогичное условие равновесия имеет место и для рычага второго рода (силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  находятся по одну сторону от опоры).

**Наклонная плоскость** применяется для подъема груза на некоторую высоту. Она дает выигрыш в силе во столько раз (без учета сил трения), во сколько раз длина наклонной плоскости больше ее высоты.

При использовании *неподвижного блока* величина силы не изменяется, а изменяется только ее направление. В случае подвижного блока сила, необходимая для равномерного подъема груза (без учета трения), в два раза меньше его силы тяжести.

При использовании простых механизмов выполняется **золотое правило механики**: с помощью простого механизма нельзя получить выигрыш в работе, т. е. во сколько раз выигрываем в силе, во столько раз проигрываем в расстоянии.

Для характеристики степени совершенства реальных механизмов используется коэффициент полезного действия (КПД).

$$\boxed{\eta = A_{\text{полезн}} / A_{\text{зат.}}} \quad (3.9)$$

КПД любого механизма показывает, какую часть от затраченной работы составляет полезная работа.

### При решении задач данной темы рекомендуем:

1. Убедиться, что система *замкнута*. Тогда следует использовать закон сохранения импульса. Если силы, действующие в системе, имеют потенциальный характер (силы тяжести, тяготения, упругости), то можно применять закон сохранения механической энергии.

В этом случае важное значение имеет рациональный выбор нулевого уровня потенциальной энергии, который в процессе решения

задачи изменять нельзя.

2. Закон сохранения импульса записывать вначале в векторной форме. И лишь после проецирования векторных уравнений на оси координат (см. рекомендации к теме 2) проводить вычисления искомых величин. Если окажется, что система не замкнута, но проекция внешних сил на некоторое направление равна нулю, то проекция суммарного импульса на это направление будет сохраняться во все время движения тел системы.

3. Очень важно на своем опыте убедиться, что применение законов сохранения энергии и импульса во многих случаях упрощает решение некоторого класса задач, так как позволяет записать уравнения для начального и конечного состояний без учета промежуточных этапов взаимодействий тел в системе.

## Тема 4. ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ

### Программа по теме

Давление. Закон Паскаля. Гидростатическое давление. Сообщающиеся сосуды. Гидравлический пресс.

Атмосферное давление. Опыт Торричелли. Изменение атмосферного давления с высотой. Барометры и манометры.

Архимедова сила для жидкостей и газов. Условия плавания тел.

### Основные теоретические положения и рекомендации

**Давление** – скалярная физическая величина, равная отношению величины силы, равномерно распределенной по некоторой площадке и направленной перпендикулярно к площади этой площадки,  $p = F/S$ . Единица давления  $[p] = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$  (паскаль). Следовательно, сила давления  $F = pS$ . Если площадка находится внутри жидкости, то на нее действует гидростатическое давление, обусловленное силой тяжести жидкости. Величина этого давления

$$p = \rho gh \text{ – гидростатическое давление,} \quad (4.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота столба жидкости, расположенной над площадкой.

Давление на заданной глубине  $h$  в жидкости не зависит от ориентации площадки. Сила давления на дно сосуда площадью  $S_{\text{д}}$  равна  $F_{\text{д}} = \rho gh S_{\text{д}}$ . Давление жидкости на боковую плоскую стенку площадью  $S_{\text{бок}}$  создает силу  $F_{\text{бок}} = p_{\text{ср}} S_{\text{бок}} = \rho gh S_{\text{бок}} / 2$ . Следует иметь в виду, что давление на дно сосуда не зависит от того, будет ли этот сосуд цилиндрическим, сужающимся или расширяющимся, так как давление определяется только высотой столба жидкости. Сила давления на дно сосуда не обязательно равна силе тяжести жидкости, содержащейся в нем (она зависит от формы сосуда).

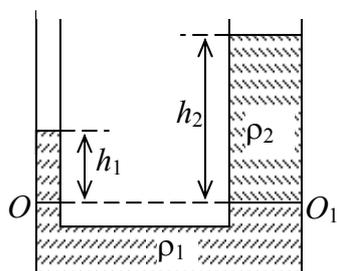


Рис. 9

**Закон Паскаля:** жидкости и газы передают оказываемое на них давление без изменения в любую точку жидкости или газа. В этом законе проявляется хорошая текучесть и слабая сжимаемость жидкости. Необходимо иметь в виду, что давление в сосуде с жидкостью на глубине  $h$  определяется как внешним давлением, одинаковым для всех точек жидкости, так и гидростатическим, т. е.  $p = p_{\text{вн}} + \rho gh$ .

ским, т. е.  $p = p_{\text{вн}} + \rho gh$ .

Сосуды, соединенные в своей нижней части, называются **сообщающимися** (рис. 9). Если в сосуды налиты разнородные жидкости с плотностями  $\rho_1 \neq \rho_2$ , то жидкость с большей плотностью опустится вниз и вытеснит жидкость с меньшей плотностью (на рис. 9  $\rho_1 > \rho_2$ ). В случае равновесия гидростатические давления в обоих коленах на выбранном уровне  $OO_1$  равны, т. е.  $\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2$ , или

$$\boxed{\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (4.2)$$

Следовательно, высота столбов разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональна их плотностям. Од-

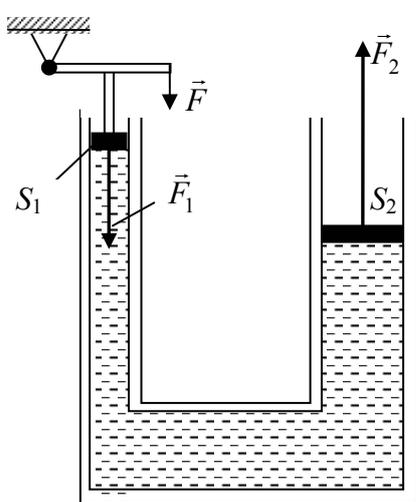


Рис. 10

нородные жидкости в сообщающихся сосудах устанавливаются на одном уровне ( $h_1 = h_2$ ). По принципу сообщающихся сосудов работают шлюзы, гидравлические прессы, некоторые виды манометров и др. приборы (устройства).

Гидравлический пресс. Он представляет собой два цилиндрических сообщающихся сосуда, заполненные жидкостью (водой или маслом) и закрытые поршнями площадью  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 10). По закону Паскаля давление, создаваемое внешней силой  $F_1$  на поршень сечением  $S_1$ , передается без изменения его величи-

ны на поршень сечением  $S_2$ , т. е.  $p_1 = p_2$ , или

$$\boxed{\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \Rightarrow F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}} \quad (4.3)$$

Сила давления  $F_2$  второго поршня во столько раз больше силы давления первого, во сколько раз площадь второго поршня больше площади первого.

*Атмосферное давление* обусловлено силой тяжести воздушной оболочки, окружающей Землю. Плотность воздуха и пропорциональное ей давление атмосферы убывают с увеличением высоты по достаточно сложному закону. Впервые величину атмосферного давления

измерил Э. Торричелли. Он установил, что давление атмосферы, которое считается *нормальным*, уравнивается высотой столба ртути, равной 760 мм. Следовательно, нормальное атмосферное давление  $p_{\text{атм}} = \rho_{\text{рт}} gh = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 \approx 1,01325 \cdot 10^5$  Па. На практике (особенно в метеорологии) давление измеряют и в несистемных единицах – атмосферах или мм рт. ст. (1 атм  $\cong 10^5$  Па, 1 мм рт. ст.  $\cong 133$  Па).

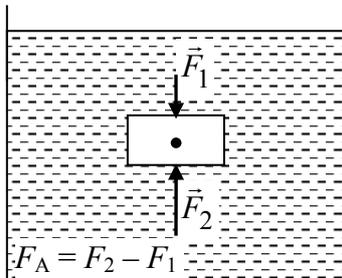


Рис. 11

**Закон Архимеда:** на погруженное в жидкость (или газ) тело действует выталкивающая сила, равная силе тяжести жидкости (или газа), вытесненной этим телом ( $V_{\text{тела}}$  – объем вытесненной жидкости):

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{тела}} \quad (4.4)$$

Эту формулу легко вывести, подсчитав разность сил гидростатического давления, действующих на нижнее и верхнее основания тела простейшей геометрической формы (цилиндр, параллелепипед) (рис. 11). Из закона Архимеда вытекают следующие условия плавания тел.

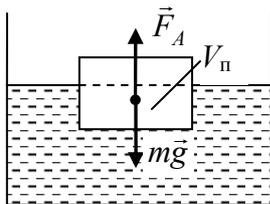


Рис. 12

1) Если  $F_A > mg$  ( $m$  – масса тела), то тело всплывает. Движение тела прекратится и установится равновесие в положении, для которого выполняется условие

$$mg = F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{п}}, \quad (4.5)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем погруженной части тела (рис. 12).

2) Если  $F_A = mg$ , то тело может быть неподвижным в любом месте объема жидкости или газа.

3) Если  $F_A < mg$  – тело тонет. Эти условия справедливы и для воздушных шаров и дирижаблей. Последнее высказывание не относится к полету самолетов, ракет и др. летательных устройств.

## Тема 5. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

### Программа по теме

Основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование. Строение и основные свойства твердых тел, жидкостей и газов.

Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.

Температура. Связь температуры со скоростью теплового движения частиц. Температурные шкалы. Измерение температуры.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева). Изотермический, изохорный и изобарный процессы. Закон Дальтона.

Внутренняя энергия. Способы изменения внутренней энергии. Количество теплоты. Теплоемкость. Работа в термодинамике. Закон сохранения энергии в тепловых процессах (первое начало термодинамики). Адиабатный процесс. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.

Второе начало термодинамики. Тепловые двигатели. Принцип действия тепловых двигателей. КПД теплового двигателя.

Испарение и конденсация. Насыщенные и ненасыщенные пары. Кипение.

Влажность воздуха. Методы измерения влажности.

Кристаллические и аморфные тела. Плавление и отвердевание. Механические свойства твердых тел.

### Основные теоретические положения и рекомендации

*Количество вещества определяется числом его молей:*

$$\nu = m / M = N / N_A, \quad (5.1)$$

где  $m$  – масса вещества;  $M$  – его молярная масса;  $N$  – число молекул;  $N_A = 6,62 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – постоянная Авогадро.

*Идеальный газ – модель реального газа, в которой не учитываются объем молекул и силы взаимодействия между ними.* Реальные газы при низких давлениях (мало превышающих атмосферное) и достаточно высоких температурах близки по своим свойствам к идеальному газу.

*Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа (для давления  $p$ ) имеет вид*

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{KB}}^2 = \frac{2}{3} n \bar{E}_k, \quad (5.2)$$

где  $n = N/V$  – концентрация молекул;  $m_0$  – масса молекулы;  $v_{\text{кв}}$  и  $\bar{E}_k$  – соответственно средняя квадратичная скорость и средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения одной молекулы.

Из (5.2) видно, что через посредство средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа устанавливается зависимость давления  $p = nkT$ , а следовательно, и температуры  $T$  газа от параметров его молекул:

$$\boxed{\bar{E}_k = \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,} \quad (5.3)$$

где  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура газа;  $T = (t+273)$  К, где  $t$  – температура по шкале Цельсия.

**Абсолютная температура  $T$**  – мера средней кинетической энергии движения молекул (атомов) вещества изолированной системы в условиях ее термодинамического равновесия.

Из уравнения (5.3) следует, что средняя квадратичная скорость молекул газа

$$\boxed{v_{\text{кв}} = \sqrt{3kT / m_0} = \sqrt{3RT / M}.} \quad (5.4)$$

Уравнение для давления в виде  $p = nkT$  получается из уравнения Клапейрона – Менделеева

$$\boxed{pV = \frac{m}{M} RT.} \quad (5.5)$$

Это уравнение связывает параметры состояния газа (массу, давление, объем и температуру) и поэтому называется *уравнением состояния газа*.

Из уравнения (5.5) следует, что плотность идеального газа

$$\boxed{\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT}.} \quad (5.6)$$

*Давление  $p$  газовой смеси в состоянии равновесия равно сумме парциальных давлений  $p_i$  газов, образующих эту смесь:*

$$\boxed{p = \sum_i p_i \text{ – закон Дальтона.}} \quad (5.7)$$

Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее независимых параметров, называется термодинамическим процессом.

Применяя уравнение (5.6) к любым двум равновесным состояниям газа, масса которого не изменяется ( $m = \text{const}$ ), имеем

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const} - \text{уравнение Клапейрона.} \quad (5.8)$$

Процессы в газе постоянной массы ( $m = \text{const}$ ), при которых один из трех параметров ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) остается неизменным, называются **изопроцессами**. Уравнения, описывающие эти процессы, могут быть получены из (5.8), хотя в историческом плане они были получены экспериментально.

*Изотермический процесс* ( $T = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const} \Rightarrow pV = \text{const} - \text{закон Бойля - Мариотта.} \quad (5.9)$$

*Изобарный процесс* ( $p = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{const} \Rightarrow \frac{V}{T} = \text{const} - \text{закон Гей-Люссака.} \quad (5.10)$$

*Изохорный процесс* ( $V = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \text{const} \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{const} - \text{закон Шарля.} \quad (5.11)$$

На рис. 13 представлены графики перечисленных процессов.

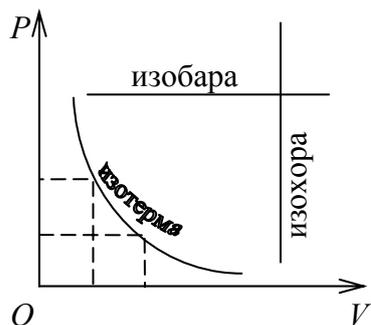


Рис. 13

**Абсолютной влажностью воздуха**  $\rho$  называется величина, равная массе водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха, т. е. плотность водяного пара в воздухе.

*Относительная влажность воздуха*

$$\varphi = (\rho / \rho_0) \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

где  $\rho$  – абсолютная влажность при данной температуре;  $\rho_0$  – плотность насыщенного водяного пара при той же температуре.

Учитывая пропорциональную зависимость между  $\rho$  и  $p$  (см. формулу (5.6.)), относительную влажность можно определить и по формуле

$$\boxed{\varphi = (p / p_0) \cdot 100\%}, \quad (5.12^*)$$

где  $p$  – парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре;  $p_0$  – давление насыщенного водяного пара при той же температуре.

**Точкой росы** называется температура  $t_p$ , при которой пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным ( $\varphi = 100\%$ ).

**Внутренняя энергия  $U$  системы** равна кинетической энергии хаотического движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер) и потенциальной энергии их взаимодействия. В общем случае внутренняя энергия системы определяется ее параметрами: температурой  $T$  и объемом  $V$ . Изменение внутренней энергии тела (системы) может происходить в результате двух различных процессов: теплообмена и совершения механической работы. Принято считать, что количество теплоты  $Q > 0$ , если к системе подводится теплота, и работа  $A > 0$ , если система совершает работу над внешними телами. Работа внешних тел над системой  $A' < 0$  и  $Q < 0$ , когда система отдает теплоту.

Первый закон термодинамики – это частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии в применении к системам, в которых существенную роль играют тепловые процессы. Этот закон утверждает: *количество теплоты, полученное системой от окружающих тел, идет на изменение внутренней энергии и на совершение ею работы над внешними телами:*

$$\boxed{\left. \begin{array}{l} Q = \Delta U + A \\ \Delta U = Q + A' \end{array} \right\} \text{ – первый закон термодинамики.}} \quad (5.13)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой  $m$  от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ , определяется по формуле

$$\boxed{Q = cm(t_2 - t_1)}, \quad (5.14)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость вещества. Единица удельной теплоемкости  $[c] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Теплоемкость тела массой  $m$

$$\boxed{C = cm}. \quad (5.15)$$

Количество теплоты, необходимое для превращения кристаллического вещества массой  $m$  при температуре плавления в жидкость:

$$Q_{\text{пл}} = \pm \lambda m \text{ – плавление или кристаллизация,} \quad (5.16)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления. Единица удельной теплоты плавления  $[\lambda] = 1 \text{ Дж/кг}$ .

*Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости массой  $m$  при температуре кипения в пар:*

$$Q_{\text{п}} = \pm r m \text{ – испарение или конденсация,} \quad (5.17)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования. Единица удельной теплоты парообразования  $[r] = 1 \text{ Дж/кг}$ .

*Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива массой  $m$ :*

$$Q_{\text{сг}} = q m, \quad (5.18)$$

где  $q$  – удельная теплота сгорания топлива. Единица удельной теплоты сгорания топлива  $[q] = 1 \text{ Дж/кг}$ .

При наличии только теплообмена между телами системы выполняется уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0, \quad (5.19)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  – теплоты, полученные или отданные телами системы.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа массой  $m$  равна сумме кинетических энергий поступательного движения всех молекул:

$$U = \frac{3}{2} k T N = \frac{3}{2} k T \frac{m}{M} N_A = \frac{3}{2} \nu R T. \quad (5.20)$$

Работа, совершаемая идеальным газом при изобарном расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ , определяется по формуле

$$A = p(V_2 - V_1) = \nu R \Delta T. \quad (5.21)$$

Здесь используется равенство  $p \Delta V = \nu R \Delta T$ , которое вытекает из уравнения Клапейрона – Менделеева при  $p = \text{const}$  (см. (5.5)).

При изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ )  $\Delta T = 0$ , поэтому изменение внутренней энергии газа  $\Delta U = 0$ . Тогда, согласно первому закону термодинамики  $Q = A$ , т. е. подведенное количество теплоты идет только на совершение работы газом над внешними телами.

При изохорном процессе ( $V = \text{const}$ )  $\Delta V = 0$  и  $A = 0$ . Значит,  $Q = \Delta U$ , т. е. количество теплоты, сообщаемое газу, идет только на

увеличение его внутренней энергии.

При изобарном процессе ( $p = \text{const}$ )  $Q \neq 0$ ,  $\Delta U \neq 0$ ,  $A \neq 0$ . Поэтому  $Q = A + \Delta U$ , т. е. подведенное количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

При адиабатном процессе теплообмена нет,  $Q = 0$ . Поэтому  $A = -\Delta U$ , т. е. работа совершается газом за счет уменьшения его внутренней энергии. В этом случае температура газа будет понижаться. Если внешние силы сжимают газ, совершая над ним работу, то  $\Delta U = A'$  и температура газа повышается.

*Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя, который преобразует тепловую энергию в механическую:*

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (5.22)$$

где  $A$  – работа, совершаемая двигателем;  $Q_1$  и  $Q_2$  – количество теплоты, соответственно полученное от нагревателя и отданное холодильнику.

*Максимальное значение КПД теплового двигателя равно КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно:*

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (5.22^*)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – соответственно температуры нагревателя и холодильника.

## Тема 6. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Программа по теме

Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона. Закон сохранения электрического заряда.

Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции электрических полей. Работа электростатического поля при перемещении заряда. Потенциал. Разность потенциалов. Напряжение. Связь между напряжением и напряженностью для однородного электростатического поля. Электростатическое поле точечного заряда.

Проводники в электростатическом поле. Электростатическая защита.

Диэлектрики в электростатическом поле. Диэлектрическая проницаемость вещества. Конденсаторы. Емкость. Емкость плоского конденсатора. Соединение конденсаторов. Энергия заряженного конденсатора.

Энергия электрического поля.

### Основные теоретические положения и рекомендации

Взаимодействие электрических зарядов подчиняется **закону Кулона**: силы, с которыми взаимодействуют два неподвижных точечных заряда прямо пропорциональны произведению величин этих зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, равны между собой и направлены вдоль прямой, соединяющей заряды, в противоположные стороны. Величина силы взаимодействия зависит от среды, в которой находятся заряды. Величина каждой из сил определяется выражением

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2} \text{ — закон Кулона,} \quad (6.1)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды (для вакуума  $\epsilon = 1$ );  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная; коэффициент  $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ . Единица заряда  $[q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}$  (Кулон).

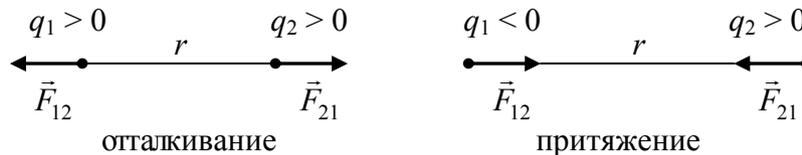


Рис. 14

Закон Кулона справедлив также и для заряженных тел шарообразной формы, если только заряды  $q_1$  и  $q_2$  распределены равномерно по объему или по поверхности этих тел. При этом радиусы тел могут быть соизмеримы с расстояниями  $r$  между их центрами.

Как же следует поступить, если в какой-либо задаче мы имеем дело с числом зарядов, большим двух? В таких случаях имейте в виду следующее. Опыты показывают, что силы взаимодействия между каждой парой этих зарядов не зависят от наличия остальных. Поэтому результирующую силу, действующую на каждый заряд, определяйте по правилу векторного сложения сил, действующих на него со стороны всех остальных зарядов.

**Закон сохранения электрического заряда:** *в электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной*. Обратите внимание на то, что этот закон, в частности, выполняется при различных видах электризации тел.

Взаимодействие неподвижных зарядов и заряженных тел осуществляется через посредство создаваемых ими электростатических полей. Эти поля в каждой точке пространства характеризуются *напряженностью  $\vec{E}$  и потенциалом  $\varphi$* .

**Напряженность** – *силовая характеристика поля, в данной каждой точке поля она равна отношению силы, с которой поле действует на точечный положительный (пробный) заряд  $q_0$ , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:*

$$\boxed{\vec{E} = \vec{F} / q_0 \text{ – напряженность электрического поля.}} \quad (6.2)$$

Единица напряженности электрического поля  $[E] = 1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$ .

Считается, что точечный «пробный» заряд  $q_0$  не создает поля (точнее, он должен быть малым, чтобы его полем можно было пренебречь) и не искажает поля других зарядов.

При решении задач важно понимать, что со стороны поля напряженностью  $\vec{E}$  на любой находящийся в нем заряд (заряженное тело) действует сила

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} \text{ – электростатическая сила.}} \quad (6.2^*)$$

Если в задаче речь идет о статическом равновесии заряженного тела, то надо выяснить, какие еще неэлектрические силы действуют на тело. Затем, выполнив соответствующий рисунок, составить уравнения равновесия (в проекциях на оси координат). Если заряженная

частица массой  $m$  (электрон, протон, ион т. п.) влетает в однородное поле, то под действием только силы  $\vec{F} = q\vec{E}$  она будет двигаться с постоянным ускорением:  $m\vec{a} = q\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = q \cdot \vec{E} / m = \text{const}$ . Такого типа задачи надо решать, используя уравнение движения в проекции на оси с учетом начальных условий (так же, как в механике).

Напряженность поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{\epsilon r^2} = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}. \quad (6.3)$$

Когда  $q > 0$ , то вектор  $\vec{E}$  в каждой точке поля направлен радиально от заряда, а при  $q < 0$  – радиально к заряду.

**Принцип суперпозиции:** если поле создается системой зарядов, то его напряженность  $\vec{E}$  в данной точке равна векторной сумме напряженностей полей, возбуждаемых в этой точке каждым из зарядов системы:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n. \quad (6.4)$$

Электрическое поле называется **однородным**, если в любой точке его напряженность одинакова по величине и направлению. Такое поле возбуждается, например, в пространстве между обкладками плоского заряженного конденсатора.

Работа при перемещении заряда между двумя точками в электростатическом поле не зависит от формы его траектории, а определяется лишь положением этих точек. Поэтому электростатическое поле является потенциальным. Величина, равная отношению работы, совершаемой силами поля при перемещении положительного пробного заряда  $q_0$  между двумя точками поля, к величине этого заряда, называется **разностью потенциалов**  $\varphi$ :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = A_{12}/q_0 \Rightarrow \varphi = W / q_0, \quad (6.5)$$

где  $W$  – потенциальная энергия взаимодействия.

Потенциал  $\varphi$  в данной точке поля является скалярной энергетической характеристикой электростатического поля. Потенциал точечного заряда  $q$  в точке на расстоянии  $r$  от него:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} = k \frac{q}{r}. \quad (6.6)$$

Если  $q > 0$ , то  $\varphi > 0$ , а если  $q < 0$ , то  $\varphi < 0$ . Единица потенциала  $[\varphi] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В}$  (вольт). Потенциал поля системы зарядов определяется по формуле, в которой учитывается знак потенциала.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n \text{ — принцип суперпозиции для потенциала.} \quad (6.7)$$

Из формулы (6.5) следует, что работа, совершаемая силами поля при перемещении любого заряда  $q$  из точки 1 в точку 2, определяется выражением

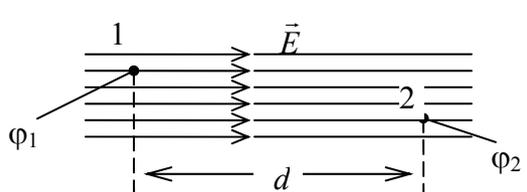
$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (6.8)$$

При решении задач надо иметь в виду, что если работа по перемещению заряда совершается силами только электростатического поля, то теорема об изменении кинетической энергии имеет следующий вид:

$$m v_2^2 / 2 - m v_1^2 / 2 = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (6.9)$$

где  $m$  — масса частицы;  $v_1$  и  $v_2$  — ее скорость соответственно в начальной и конечной точках, разность потенциалов между которыми равна  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Если работа  $A_{12} < 0$ , то кинетическая энергия частиц уменьшается, а потенциальная энергия ее на столько же возрастет.

Связь между напряженностью однородного электрического поля и разностью потенциалов выражается формулой



$$E = (\varphi_1 - \varphi_2) / d, \quad (6.10)$$

Рис. 15

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  — разность потенциалов между точками поля, находящимися одна от другой на расстоянии  $d$  (вдоль линии напряженности поля).

Два изолированных и близко расположенных друг от друга проводника, заряженные равными по значению и противоположными по знаку зарядами, образуют *конденсатор*. Эти проводники называются *обкладками конденсатора*.

**Электрической емкостью** конденсатора называют скалярную величину, характеризующую его свойства накапливать и сохранять электрические заряды и связанное с этими зарядами поле. Электро-

емкость конденсатора равна отношению заряда  $q$  одной из обкладок к разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$  между ними:

$$C = q/U. \quad (6.11)$$

Единица емкости  $[C] = 1 \text{ Кл/1 В} = 1 \text{ Ф}$  (фарада).

Емкость конденсатора с диэлектриком, заполняющим все пространство между обкладками:

$$C = \varepsilon C_0, \quad (6.12)$$

где  $C_0$  – емкость этого же конденсатора в случае, когда изолятором служит вакуум, а практически чаще всего воздух.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d, \quad (6.13)$$

где  $S$  – площадь одной из обкладок (пластин), взаимно перекрывающейся с другой обкладкой;  $d$  – расстояние между обкладками.

Емкость батареи конденсаторов вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^n C_i \quad \text{– при параллельном соединении,} \\ \frac{1}{C} &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad \text{– при последовательном соединении.} \end{aligned} \quad (6.14.)$$

Энергия  $W$  заряженного конденсатора (энергия его электрического поля):

$$W = \frac{1}{2} qU = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2 \Rightarrow W_{\text{поля}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2 V. \quad (6.15)$$

Энергия электрического поля выражается через основную характеристику – напряженность  $E$ . Энергия поля, приходящаяся на единицу объема:

$$w = \varepsilon_0 \varepsilon E^2/2. \quad (6.16)$$

Если поле однородно, то в объеме  $V$  сосредоточена электрическая энергия

$$W = w \cdot V = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V. \quad (6.17)$$

## Тема 7. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

### Программа по теме

Электрический ток. Сила тока. Условия существования электрического тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление. Последовательное и параллельное соединение проводников.

Работа и мощность тока. Количество теплоты, выделяемое в проводке с током. Закон Джоуля – Ленца. Электродвижущая сила. Источники тока. Закон Ома для замкнутой цепи.

Электрический ток в металлах. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры. Сверхпроводимость.

Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковые приборы.

Электрический ток в жидкостях. Электролиз. Законы электролиза.

Электрический ток в газах. Виды газового разряда и их применение. Понятие о плазме.

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Электронно-лучевая трубка.

### Основные теоретические положения и рекомендации

*Электрическим током называется всякое упорядоченное движение свободных заряженных частиц (носителей зарядов). В металлах такими носителями являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в газах – в основном электроны и положительные ионы.*

Уясните процессы, вызывающие возникновение свободных носителей зарядов в различных средах. Особое внимание уделите выяснению механизма возникновения свободных носителей зарядов в чистых и примесных полупроводниках.

Направленное движение свободных носителей зарядов во всех средах возникает под действием сил внешнего электрического поля.

*Силой тока называют скалярную величину, равную отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени его прохождения:*

$$I = \Delta q / \Delta t. \quad (7.1)$$

Единица силы тока  $[I] = 1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с} = 1 \text{ А}$  (ампер).

В случае металлического проводника на основе электронной теории для силы тока получается следующее выражение:

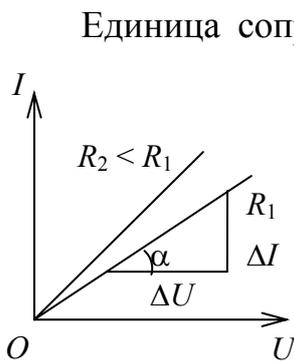
$$I = enSv, \quad (7.2)$$

где  $e$  – абсолютная величина заряда электрона;  $n$  – концентрация электронов, т. е. число свободных электронов в единице объема проводника;  $S$  – площадь его поперечного сечения;  $v$  – средняя скорость упорядоченного движения электронов.

За направление тока принимают направление движения положительных зарядов в проводнике.

**Закон Ома для участка цепи:** сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$\boxed{I = U / R} \text{ – закон Ома для участка цепи.} \quad (7.3)$$



Единица сопротивления  $[R] = 1 \text{ В/А} = 1 \text{ Ом}$ . Согласно закону

Ома, график зависимости силы тока от напряжения (*вольтамперная характеристика*) для данного проводника представляет собой прямую линию (рис. 16). В выбранном масштабе тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс  $\Delta I / \Delta U = 1 / R$ . Очевидно, чем меньше сопротивление проводника, тем больше тангенс угла наклона графика. Величину  $U = I \cdot R$  часто называют падением напряжения на участке

Имейте в виду, что в металлах и электролитах зависимость силы тока от напряжения подчиняется закону Ома. Для газов и полупроводников этот закон в общем случае не выполняется. Закон Ома не выполняется и для таких приборов, как вакуумный диод и фотоэлемент.

*Сопротивление проводника*, изготовленного из однородного материала с одинаковым по всей длине  $l$  поперечным сечением  $S$ :

$$\boxed{R = \rho l / S}, \quad (7.4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала. Единица удельного сопротивления материала  $[\rho] = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Для большинства металлов в достаточно широком интервале температур справедлива линейная зависимость  $R$  от температуры  $t$ :

$$\boxed{R_1 = R_0(1 + \alpha t)}, \quad (7.5)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $R$  и  $R_0$  – сопротивления проводника при  $t^\circ\text{C}$  и  $0^\circ\text{C}$  соответственно.

Обратите внимание на то, как электронная теория объясняет наличие электрического сопротивления металлов, а также его зависи-

мость от температуры. Выясните физический смысл температурного коэффициента сопротивления и его единицу измерения. Заметим, что для электролитов этот коэффициент отрицателен. Что же касается полупроводников, то для этого класса веществ сопротивление сильно уменьшается с повышением температуры. Постарайтесь найти объяснение этому факту в учебнике.

Последовательное и параллельное соединение проводников. При *последовательном соединении* проводников (рис. 17) справедливы следующие соотношения.

1. Сила тока во всех проводниках одинакова:  $I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I$ , сумма напряжений на отдельных потребителях равна напряжению на всем участке  $AB$ :  $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ , а общее сопротивление цепи равно сумме сопро-

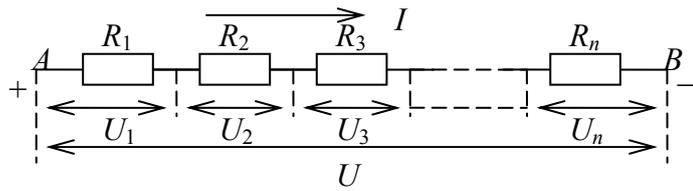


Рис. 17

тивлений отдельных проводников  $R = \sum_{i=1}^n R_i$ .

2. Напряжения на отдельных проводниках (потребителях) пропорциональны их сопротивлениям:  $U_1:U_2:U_3 : \dots R_1:R_2:R_3:\dots$  (в случае двух проводников  $U_1/U_2 = R_1/R_2$ ).

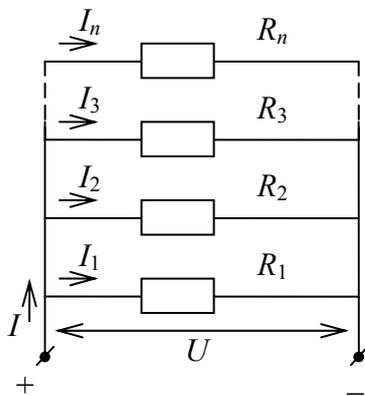


Рис. 18

Приведем соотношения, справедливые для *параллельного соединения* проводников (рис. 18).

1. Напряжения на всех потребителях одинаковы:  $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ , сила тока, протекающего через группу проводников, равна сумме токов, протекающих в отдельных ветвях:  $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ , а общее сопротивление цепи определяется

соотношением  $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ .

2. Силы токов в отдельных ветвях обратно пропорциональны их сопротивлениям:  $I_1 : I_2 : I_3 : \dots = 1/R_1 : 1/R_2 : 1/R_3 \dots$  (в случае двух проводников  $I_1/I_2 = R_2/R_1$ ).

Закон Ома для полной цепи. Уясните назначение источника то-

ка. Осмыслите, какого происхождения сторонние силы действуют в известных вам типах источников.

*Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений ее внешнего и внутреннего участков:*

$$\boxed{I = \varepsilon / (R + r) - \text{закон Ома для полной цепи.}} \quad (7.6)$$

Каждый источник тока характеризуется электродвижущей силой (ЭДС) и внутренним сопротивлением  $r$ . Электродвижущая сила является энергетической характеристикой источника, и она равна отношению работы  $A_{\text{стор}}$ , совершаемой сторонними силами при перемещении электрического положительного заряда  $q$  по замкнутой цепи, к этому заряду:  $\varepsilon = A_{\text{стор}} / q$ .

Работа и мощность тока. При прохождении заряда  $\Delta q = I\Delta t$  по участку цепи электрическое поле совершает работу:

$$\boxed{A = \Delta q(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)I\Delta t = UI\Delta t.} \quad (7.7)$$

Если энергия электрического поля превращается только в тепловую энергию проводника, то справедливо соотношение:

$$\boxed{A = Q = I^2 R\Delta t - \text{закон Джоуля - Ленца,}} \quad (7.8)$$

т. е. количество теплоты  $Q$ , выделяемое в проводнике при прохождении электрического тока, прямо пропорционально произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока через проводник.

Если проявляется только тепловое действие тока на данном участке цепи ( $A = Q$ ), то мощность тока может быть рассчитана по одной из формул:

$$\boxed{P = A/t = UI = I^2 R = U^2 / R.} \quad (7.9)$$

Формулу  $P = I^2 R$  выгоднее использовать в том случае, когда участок цепи состоит из ряда последовательно соединенных потребителей, так как сила тока одинакова в каждом из них. Если же участок цепи состоит из группы потребителей, соединенных между собой параллельно, то выгодно использовать формулу  $P = U^2 / R$ , так как напряжение на каждом из них одинаково. Понятно, это замечание справедливо и относительно формул  $Q = I^2 R\Delta t$  и  $Q = U^2 \Delta t / R$ .

К проводникам *второго рода* – *электролитам* относятся растворы солей и щелочей. При растворении происходит распад веществ на отдельные ионы (*электролитическая диссоциация*). Если сосуд с электролитом с помощью электродов включить в электрическую цепь, то ионы электролита придут в движение, создавая электрический ток. Такая проводимость называется *ионной*. При ионной проводимости на электродах происходит выделение веществ. Этот процесс называется *электролизом*. Фарадей установил, что *масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени*, т. е.

$$m = kq = kI\Delta t \text{ – закон Фарадея для электролиза,} \quad (7.10)$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент вещества. Единица электрохимического эквивалента вещества  $[k] = 1 \text{ кг/Кл}$ .

*Электрохимический эквивалент численно равен отношению массы иона к его заряду ( $m_0 / (ne)$ ) и пропорционален химическому эквиваленту  $k_x = M / n$ , где  $M$  – молярная масса;  $n$  – валентность, т. е.*

$$k = \frac{m_0}{ne} \frac{N_A}{N_A} = \frac{1}{F} \frac{M}{n}, \quad (7.11)$$

где  $F = eN_A = 96\,500 \text{ Кл/моль}$  – число Фарадея.

## Тема 8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Программа по теме

Магнитное взаимодействие токов. Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Проводник с током в магнитном поле. Сила Ампера. Электродвигатель постоянного тока.

Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца.

Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.

Магнитные свойства вещества. Ферромагнетики. Применение ферромагнетиков.

Явление самоиндукции. Энергия магнитного поля.

### Основные теоретические положения и рекомендации

*Магнитное поле* возбуждается упорядоченно движущимися электрическими зарядами и намагниченными телами. Магнитное поле можно обнаружить по его действию на проводники с током (или движущиеся в нем электрические заряды) и магнитные стрелки.

Для характеристики магнитного поля вводится векторная величина  $\vec{B}$ , которая называется *магнитной индукцией*. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением силы, действующей на северный полюс малой магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. В некоторых случаях направление вектора  $\vec{B}$  можно определить с помощью *правила буравчика* (например, в случае магнитного поля прямого тока, катушки с током). Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы  $F_m$ , действующей со стороны магнитного поля на участок  $\Delta l$  проводника с током, к произведению силы тока  $I$  на длину этого участка:

$$B = \frac{F_m}{I\Delta l} \text{ — силовая характеристика магнитного поля.} \quad (8.1)$$

Единица магнитной индукции  $[B] = 1 \text{ Н/А}\cdot\text{м} = 1 \text{ В}\cdot\text{с/м}^2 = 1 \text{ Тл}$  (тесла). Магнитное поле графически изображают с помощью линий магнитной индукции, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ . Линии магнитной индукции всегда *замкнуты*, следовательно, магнитное поле *вихревое*. Это означает, что оно не имеет источников, т. е. в природе нет магнитных зарядов, подобных электрическим.

Сила, действующая со стороны магнитного поля на участок

проводника с током, называется *силой Ампера*. Модуль этой силы вычисляется по формуле

$$F_A = IB\Delta l \sin\alpha \text{ – закон Ампера.} \quad (8.2)$$

Здесь  $\alpha$  – угол между направлением тока на участке  $\Delta l$  проводника и вектором  $\vec{B}$ . Направление силы  $\vec{F}_A$  определяется **правилом левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора  $\vec{B}$  входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на участок проводника.

На основе закона Ампера и, используя правило буравчика и правило левой руки, умейте доказать, что два параллельных прямых провода с током одинакового направления притягиваются, а с токами противоположного направления – отталкиваются.

При решении задач, в которых рассматривается равновесие или движение проводника либо контура с током в магнитном поле, на соответствующем рисунке прежде всего укажите направление тока и направление вектора  $\vec{B}$ . Определив направление силы (сил) Ампера, изобразите также все остальные силы, действующие на проводник (тело). Если проводник находится в равновесии, то составьте уравнения (уравнение), выражающие условия равновесия. Если же проводник движется в магнитном поле, то надо составить динамическое уравнение движения, используя второй закон Ньютона.

*Сила Лоренца* – это сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся в нем заряженную частицу. Модуль этой силы вычисляется по формуле

$$F_L = qvB \sin\alpha \text{ – модуль силы Лоренца,} \quad (8.3)$$

где  $q$ ,  $v$  и  $B$  – модули заряда, скорости и магнитной индукции соответственно;  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Если знак заряда положительный, то направление силы  $F_L$  определяется несколько видоизмененным правилом левой руки (четыре пальца нужно направить по скорости  $\vec{v}$ ). Когда заряд отрицательный, то для определения направления силы  $F_L$  можно пользоваться тем же правилом, но в этом случае вектор  $\vec{F}_L$  будет направлен противоположно отогнутому на  $90^\circ$  большому пальцу левой руки.

Сила Лоренца всегда перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{F}_{\text{Л}}$ . Поэтому она сообщает движущейся заряженной частице только центростремительное ускорение, не изменяя модуля ее скорости и, следовательно, не совершая работы. Если заряженная частица одновременно движется в магнитном и электрическом полях, то на нее, кроме силы  $F_{\text{Л}}$ , действует еще электрическая сила  $\vec{F}_э = \tilde{q}_0 \vec{E}$  ( $\tilde{q}_0$  – заряд с учетом его знака).

**Магнитным потоком** (поток магнитной индукции) *через площадь  $S$  поверхности, охватываемой некоторым плоским контуром, находящимся в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , называется величина*

$$\boxed{\Phi = BS \cdot \cos\beta} \text{ – поток магнитной индукции,} \quad (8.4)$$

здесь  $\beta$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности контура. Единица магнитного потока  $[\Phi] = 1 \text{ В}\cdot\text{с} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А} = 1 \text{ Тл}\cdot\text{м}^2 = 1 \text{ Вб}$  (вебер).

Если катушка сечением  $S$  содержит  $N$  витков и находится в однородном магнитном поле, то полный магнитный поток  $\Phi_{\text{пол}}$ , сцепленный со всеми ее витками, определяется по формуле

$$\boxed{\Phi_{\text{пол}} = N\Phi = NBS\cos\beta} \text{ – потокосцепление.} \quad (8.5)$$

В случае, когда магнитное поле возбуждается током, протекающим по какому-либо контуру, то магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, пропорционален силе тока  $I$ :

$$\boxed{\Phi = LI}, \quad (8.6)$$

где  $L$  – индуктивность контура (проводника).

Единица индуктивности  $[L] = 1 \text{ Вб}/\text{А} = 1 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{А} = 1 \text{ Гн}$  (генри). Индуктивность  $L$  зависит от размеров и формы проводника, а также от магнитной проницаемости  $\mu$  среды, в которой он находится.

**Явление электромагнитной индукции** состоит в том, что при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в последнем возбуждается *электродвижущая сила индукции*  $\varepsilon_i$ . Если контур замкнутый, то под действием этой ЭДС в нем возникает электрический ток, называемый *индукционным*. Согласно **правилу Ленца**, *индукционный ток имеет всегда такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, пронизывающего этот контур.*

Магнитный поток  $\Phi$  сквозь поверхность, ограниченную контуром, может изменяться по ряду причин: за счет изменения геометрических размеров или формы контура, его положения (ориентации) в магнитном поле, вследствие зависимости магнитной индукции  $B$  от времени, а также благодаря совместному влиянию этих факторов. Величина  $\varepsilon_i$  не зависит от способа, которым осуществляется изменение магнитного потока  $\Phi$ .

**Закон электромагнитной индукции:** *электродвижущая сила индукции, возникающая в контуре (катушке), численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром (катушкой), т. е.*

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}N \text{ — закон электромагнитной индукции.} \quad (8.7)$$

Знак «-» в уравнении (8.7) отражает правило Ленца.

Хотя величина ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока, однако механизм возникновения ее при этом оказывается разным. Обратимся сначала к случаю, когда магнитный поток изменяется вследствие движения проводящего контура или его деформации в постоянном магнитном поле. Здесь роль сторонних сил, разделяющих разноименные заряды в проводнике, играет составляющая силы Лоренца, направленная параллельно участкам (или отдельному участку) проводника.

Если неподвижный проводник находится в изменяющемся со временем магнитном поле, то механизм возникновения  $\varepsilon_i$  оказывается в принципе другим. Изменяющееся магнитное поле ( $\Delta B/\Delta t$ ) возбуждает вихревое электрическое поле, под действием которого носители заряда в проводнике приходят в движение. Со стороны вихревого электрического поля на заряд  $q$  действует сила  $\vec{F} = q\vec{E}^*$  ( $\vec{E}^*$  — вектор напряженности этого поля). В отличие от электростатического поля работа сил вихревого поля при перемещении заряда  $q$  по любому замкнутому контуру не равна нулю.

Если магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, изменяется вследствие изменения силы тока, протекающего по этому контуру, то в нем индуцируется ЭДС, которую называют *ЭДС самоиндукции*  $\varepsilon_i$ . *Явление самоиндукции* — частный случай явления электромагнитной индукции. При постоянной индуктивности  $L$  проводника (т. е. при неизменных магнитной проницаемости среды, раз-

мерах и форме контура) ЭДС самоиндукции

$$\boxed{\varepsilon_s = -\frac{\Delta\mathcal{L}}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, - \text{ЭДС самоиндукции,}} \quad (8.8)$$

где  $\Delta I/\Delta t$  – скорость изменения силы тока.

Энергия магнитного поля, создаваемого током силой  $I$ , проходящим по проводнику (соленоиду) индуктивностью  $L$ ,

$$\boxed{W_m = \frac{1}{2} LI^2.} \quad (8.9)$$

В качестве рекомендаций к решению задач рассмотрим наиболее типичные ситуации, встречающиеся в задачах по этой теме.

1. Пусть модуль магнитной индукции  $B$  поля изменяется во времени по линейному закону:  $B = kt$ . Тогда скорость его изменения  $\Delta B/\Delta t = k$  оказывается постоянной. Если в таком поле находится катушка сопротивлением  $R_1$ , замкнутая на резистор сопротивлением  $R_2$ , то в ней будет возбуждаться ЭДС  $\varepsilon_i = -(\Delta B/\Delta t)SN$ . В этом случае, согласно закону Ома, сила индукционного тока  $I_i = \varepsilon_i/(R_1 + R_2) = -kSN/(R_1 + R_2)$  оказывается постоянной. Мощность этого тока  $P = \varepsilon_i I_i = (kSN)^2/(R_1 + R_2)$ . Величина заряда, переносимого индукционным током  $\Delta q = I_i \Delta t = -k\Delta t SN/(R_1 + R_2) = -\Delta\Phi N/(R_1 + R_2)$ . Из последнего выражения видим, что  $\Delta q$  не зависит от времени изменения магнитного потока ( $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ), а определяется только начальным  $\Phi_1 = B_1 SN$  и конечным  $\Phi_2 = B_2 SN$  его значениями. Это важный вывод, который надо понять, запомнить и использовать при решении задач.

2. Предположим, что за некоторый промежуток времени  $\Delta t$  магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную контуром (катушкой), изменяется от  $\Phi_1$  до  $\Phi_2$  по некоторому неизвестному закону. В этом случае можно говорить о среднем значении возбуждаемой ЭДС  $\varepsilon_i$  за указанный промежуток времени  $\Delta t$ ,  $\varepsilon_i = -((\Phi_2 - \Phi_1)/\Delta t)N$ . Если электрическая цепь замкнута (катушка сопротивлением  $R_1$  подсоединена к  $R_2$ , как и в п. 1), то соотношение  $\varepsilon_i/(R_1 + R_2)$  определяет только среднее значение силы индукционного тока за тот же промежуток времени  $\Delta t$ .

3. Пусть плоская катушка (в виде рамки), содержащая  $N$  витков, равномерно вращается с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле, при этом ось катушки лежит в ее плоскости и расположена

перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ . В данных условиях магнитный поток  $\Phi_{\text{пол}} = NBS \cdot \cos\varphi$ , сцепленный с витками катушки, изменяется из-за того, что угол  $\varphi$  между нормалью  $\vec{n}$  рамки и вектором  $\vec{B}$  в процессе вращения рамки изменяется во времени по закону  $\varphi = \omega t$ . Поэтому  $\Phi_{\text{пол}} = NBS \cdot \cos\omega t$ . Чтобы найти, по какому закону будет изменяться ЭДС индукции надо взять производную по  $t$  от выражения для магнитного потока  $\Phi_{\text{пол}}$ :

$$\boxed{\varepsilon_i = (-NBS\omega \cos\omega t)' = NBS\omega \sin\omega t = \varepsilon_m \sin\omega t.}$$

Здесь  $\varepsilon_i$  – мгновенное, а  $\varepsilon_m$  – амплитудное значения ЭДС. Если не учитывать индуктивного сопротивления катушки, то сила индукционного тока в цепи (при выполнении условий, оговоренных в п. 1) будет изменяться по закону

$$\boxed{i = \varepsilon / (R_1 + R_2) = NBS\omega / (R_1 + R_2) = I_m \sin\omega t.}$$

Здесь  $i$  – мгновенное, а  $I_m = \varepsilon_m / (R_1 + R_2)$  – амплитудное значения силы тока. Именно таков принцип действия простейшего генератора переменного тока.

Заметим, что при вращении катушки вокруг оси, лежащей в ее плоскости и направленной вдоль вектора  $\vec{B}$ , ЭДС  $\varepsilon_i$  не возникает, так как угол между векторами нормали  $\vec{n}$  и индукции  $\vec{B}$  равен нулю, поэтому поток  $\Phi_{\text{пол}} = 0$ .

4. Изменение магнитного потока может происходить по причине изменения площади  $S$  поверхности, ограниченной деформируемым контуром.

## Тема 9. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Программа по теме

Колебательное движение. Гармонические колебания. Амплитуда, период и частота колебаний. Уравнение гармонических колебаний.

Математический маятник. Период колебаний математического маятника.

Пружинный маятник. Период колебаний пружинного маятника.

Превращения энергии при колебательном движении.

Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

Распространение колебаний в упругих средах. Поперечные и продольные волны. Длина волны. Связь длины волны со скоростью ее распространения.

Звуковые волны. Скорость звука. Ультразвук.

### Основные теоретические положения и рекомендации

**Колебания** – это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенный интервал времени. Различают свободные и вынужденные колебания. **Свободными** называются колебания, при которых тело, будучи выведенным из положения равновесия каким-нибудь внешним воздействием, в дальнейшем предоставлено самому себе. В этом случае колебания происходят только под действием внутренних сил системы (действие внешних сил скомпенсировано). В зависимости от физической природы колебательной системы различают механические (колебания груза, подвешенного на нити или пружине) и электромагнитные колебания.

Простейшим видом колебаний являются *гармонические колебания*. Это такие движения, когда физические величины, например смещение точки  $x$ , ее скорость  $v$ , ускорение  $a$ , изменяются по закону синуса (или косинуса):

$$x = x_m \cos(\omega t + \alpha) \text{ – уравнение гармонических колебаний.} \quad (9.1)$$

В этом уравнении  $x$  – смещение материальной точки из положения равновесия (рис. 19б) в момент времени  $t$ . На рис. 19а показано положение точки в состоянии равновесия. *Максимальное смещение  $x_m$  точки из положения равновесия* (рис. 19в) называется **амплитудой колебаний**. Величина  $(\omega t + \alpha)$  – *фаза колебаний*. Она определяет значение изменяющейся величины в данный момент времени. Величина  $\alpha$  – начальная фаза, т. е. значение фазы в момент времени  $t = 0$ . **Циклическая частота  $\omega$**  численно равна числу полных колебаний, совершаемых за  $2\pi$  секунд. **Периодом** незатухающих колебаний называют

ся тот наименьший промежуток времени  $T$ , по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебания. За время  $T$  совершается одно полное колебание. **Частотой** колебаний  $\nu$  называют число полных колебаний, совершаемых за 1 секунду. Величины  $\omega$ ,  $\nu$  и  $T$  связаны соотношением

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \text{ — уравнения связи параметров колебаний.} \quad (9.2)$$

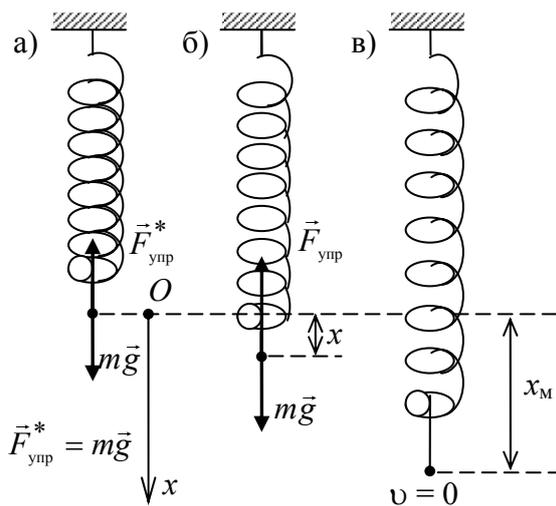


Рис. 19

Гармонические колебания совершаются под действием возвращающей силы, пропорциональной смещению материальной точки из положения равновесия, т. е.  $F_x^B = -kx$ . К таким силам относятся равнодействующая силы упругости и силы тяжести, действующих на тело, подвешенное к пружине (рис. 19). В случае математического маятника такую же роль играет касательная составляющая  $F$  силы тяжести, которая зависит от угла  $\alpha$  отклонения маятника (рис. 20).

маятника (рис. 20).

При действии на груз упругой силы и силы тяжести (рис. 19) второй закон Ньютона в проекции на ось  $Ox$  примет вид  $ma_x = -kx$ . Отсюда ускорение колеблющегося груза

$$a_x = -(k/m)x. \quad (9.3)$$

Из уравнения (9.3) видно, что ускорение гармонически колеблющейся точки прямо пропорционально смещению и противоположно ему по направлению. С другой стороны, ускорение точки

$$a_x = v'_x = x'' = -x_M \omega^2 \cos(\omega t + \alpha) = -\omega^2 x. \quad (9.4)$$

Из сопоставления (9.4) и (9.3) получаем выражения

$$\omega = \sqrt{k/m} \text{ — циклическая частота, } T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{m/k} \text{ — период.} \quad (9.5)$$

Аналогично получается формула для периода малых колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, \quad (9.6)$$

где  $l$  – длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.

При гармонических колебаниях происходит непрерывное превращение кинетической энергии в потенциальную, и наоборот. В случае колебания груза на пружине максимальная потенциальная энергия будет в том случае, когда груз смещен от положения равновесия на величину, равную амплитуде колебания, т. е.  $E_{\text{п}}^{\text{max}} = kx_{\text{м}}^2/2$ . При перемещении в сторону положения равновесия потенциальная энергия постоянно переходит в кинетическую  $E_{\text{к}}^{\text{max}} = m v_{\text{м}}^2/2 = kx_{\text{м}}^2/2$ , которая затем снова переходит в потенциальную при сжатии (или растяжении) пружины после прохождения положения равновесия. Таким образом, полная энергия маятника сохраняется из-за потенциальности сил упругости.

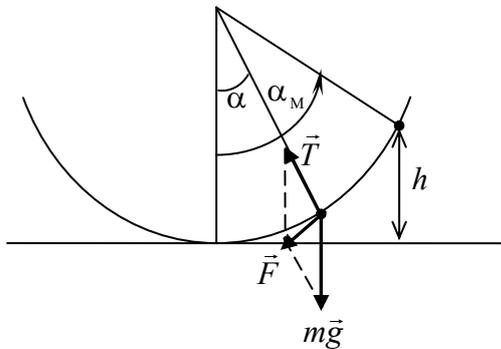


Рис. 20

Аналогичные превращения энергии имеют место при колебаниях математического маятника. Вся потенциальная энергия тела, равная  $mgh$  (рис. 20), полностью переходит в кинетическую  $m v_{\text{м}}^2/2$  к моменту прохождения маятником положения равновесия, которая далее снова переходит в потенциальную при отклонении маятника в противоположную сторону.

В случае колебаний под действием упругих сил полная энергия

В случае колебаний под действием упругих сил полная энергия

$$E = \frac{m v^2}{2} + \frac{k x^2}{2} = \frac{m x_{\text{м}}^2 \omega^2 \sin^2(\omega t + \alpha)}{2} + \frac{k x_{\text{м}}^2 \cos^2(\omega t + \alpha)}{2}. \quad (9.7)$$

Поскольку коэффициент  $k = m \omega^2$ , то для полной энергии гармонически колеблющейся материальной точки получим окончательно следующее выражение:

$$E = \frac{m v_{\text{м}}^2}{2} = \frac{k x_{\text{м}}^2}{2} = \frac{m \omega^2 x_{\text{м}}^2}{2} \text{ — следствие закона сохранения энергии.} \quad (9.7^*)$$

Для возвращающей силы можно записать три равноценных выражения:

$$F_x^B = -kx = -kx_M \cos(\omega t + \alpha) = -m\omega^2 x_M \cos(\omega t + \alpha) = -\sqrt{2E} / x_M \cos(\omega t + \alpha). \quad (9.8)$$

Выражение для полной энергии  $E$  и возвращающей силы  $F_x^B$  справедливы также и в случае колебаний математического маятника. Их удобно применять при решении задач.

Свободные колебания с течением времени затухают, так как в реальных условиях всегда существуют силы сопротивления. Чтобы колебания оставались незатухающими, нужно энергию колеблющейся системы постоянно пополнять за счет действия внешней силы  $F = F_M \sin \omega^* t$ . Колебания в этом случае совершаются с частотой  $\omega^*$  вынуждающей силы и называются *вынужденными*:

$$x = A \cos(\omega^* t + \varphi_0) \text{ — уравнение вынужденных колебаний.} \quad (9.9)$$

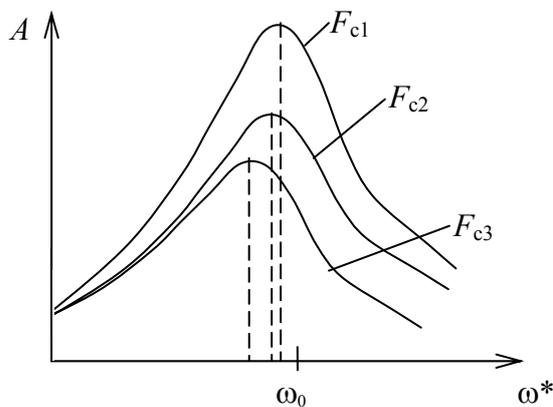


Рис. 21

Амплитуда  $A$  этих колебаний зависит не только от амплитуды  $F_M$  вынуждающей силы, но и от соотношения частот  $\omega^*$  и  $\omega$  ( $\omega$  – собственная частота колебаний системы). В случае, когда  $\omega^*$  близка к  $\omega$ , наступает резкое возрастание амплитуды колебаний (рис. 21). Это явление называется *резонансом*. Величина амплитуды в области резонанса сильно зависит от силы

сопротивления, действующей в системе. Чем меньше сила сопротивления  $F_c$ , тем больше  $A_{рез}$  ( $F_{c1} < F_{c2} < F_{c3}$ ).

Упругие волны. Если источник колебаний находится в упругой сплошной среде, то колебания, создаваемые источником, будут распространяться с течением времени, охватывая все большие области окружающей источник среды. *Процесс распространения колебаний в сплошной среде, периодический во времени и пространстве, называется волной*. Уравнение волны имеет вид

$$x = x_M \sin \omega(t - y/v). \quad (9.10)$$

Здесь  $y$  – координата точки среды, которой достигла волна, распространяясь со скоростью  $v$  от источника, расположенного в точке  $O$

(рис. 22), а  $\varphi = \omega(t - y/v)$  – фаза волны. На этом рисунке изображен график волны, распространяющейся в направлении оси  $y$ . Здесь  $\lambda$  –

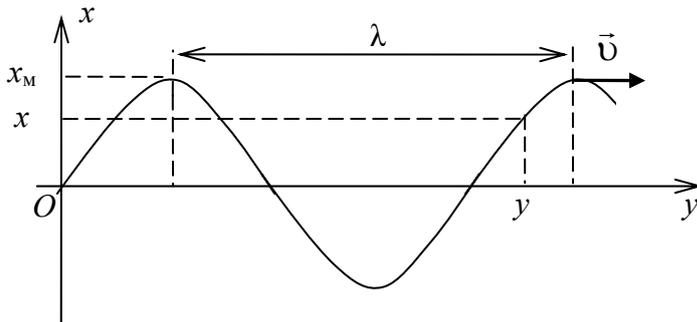


Рис. 22

длина волны – это расстояние, которое проходит фронт волны за время, равное периоду колебаний  $T$ . Другими словами, длина волны  $\lambda$  равна расстоянию между ближайшими точками среды, колеблющимися в одинако-

вой фазе. Для параметров волны справедливы соотношения:

$$\lambda = vT \Rightarrow \lambda = v/\nu \Rightarrow v = \lambda\nu. \quad (9.11)$$

Из выражения для фазы волны  $\varphi = \omega t - \omega y/v$  и формулы (9.11) получается уравнение связи между разностью фаз ( $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ) двух колеблющихся точек и расстоянием  $\Delta x = x_2 - x_1$ ,  $\Delta y = y_2 - y_1$  между ними:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi\nu(y_2 - y_1)/v = 2\pi(y_1 - y_2)/(vT) = 2\pi\Delta y/\lambda. \quad (9.12)$$

Эти соотношения необходимы для решения задач, относящихся к распространению волн в среде.

В упругой среде различают продольные и поперечные волны. В *продольной волне* частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Они обусловлены *деформациями растяжения и сжатия* и могут распространяться в твердых телах, жидкостях и газах. В *поперечной волне* частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном распространению волны. Они обусловлены *деформациями сдвига* и могут распространяться только в твердых телах.

*Звуковые волны* – это упругие волны, имеющие частоту от 16 до 20 000 Гц. Воздействуя на органы слуха человека, они вызывают звуковые ощущения. Механические колебания с частотой  $\nu < 16$  Гц называются *инфразвуковыми*, а с частотой  $\nu > 2 \cdot 10^4$  Гц – *ультразвуковыми*. Звуковые волны характеризуются: *силой звука*, определяемой амплитудой колебаний, *высотой тона*, зависящей от частоты звука, а также скоростью распространения. Скорость звука зависит от механи-

ческих свойств среды и от ее температуры. Звуковые волны в воздухе – *продольные волны*. В твердых телах могут распространяться как продольные, так и *поперечные* звуковые волны.

## Тема 10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Программа по теме

Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Превращения энергии в колебательном контуре. Собственная частота колебаний в контуре.

Переменный электрический ток. Действующие значения силы тока и напряжения. Генератор переменного тока.

Трансформатор. Передача и использование электрической энергии.

Электромагнитные волны. Скорость распространения электромагнитных волн. Свойства электромагнитных волн.

Принципы радиотелефонной связи. Простейший радиоприемник.

### Основные теоретические положения и рекомендации

Свободные колебания в колебательном контуре. *Свободными, или собственными, называются такие колебания замкнутой системы, которые вызываются первоначальным внешним возбуждением и полностью обуславливаются процессами, возникающими в самой системе.*

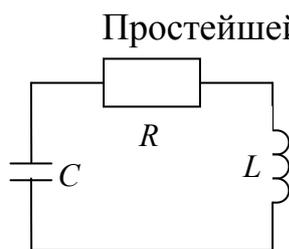


Рис. 23

Простейшей электрической колебательной системой является *колебательный контур* – цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора емкостью  $C$  и резистора сопротивлением  $R$  (рис. 23). Колебания в контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора некоторый начальный заряд или возбудив в катушке индуктивности электрический ток (например, путем включения внешнего магнитного поля, пронизывающего витки катушки). Процесс колебаний в такой цепи заключается в периодической перезарядке конденсатора под действием ЭДС самоиндукции и в протекании переменного тока. Таким образом, в колебательном контуре происходят периодические изменения (т. е. колебания) заряда  $q$ , напряжения  $U$  на обкладках конденсатора и силы тока  $i$ , текущего через катушку индуктивности и резистор.

Идеальный контур. Если сопротивление контура  $R = 0$ , то в нем устанавливаются *незатухающие гармонические колебания*, при которых величины  $q$ ,  $U$  и  $i$  изменяются по следующим законам:

$$q = q_M \cos \omega_0 t, \quad U = \frac{q_i}{C} = U_M \cos \omega_0 t, \quad i = \frac{dq}{dt} = I_M \cos(\omega_0 t - \pi/2), \quad (10.1)$$

где  $q_M$ ,  $U_M = q_M/C$  и  $I_M = q_M\omega_0$  – амплитудные значения заряда, напряжения и силы тока соответственно;  $\omega_0$  – циклическая частота собственных колебаний в контуре, связанная с периодом  $T_0$  этих колебаний:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \Rightarrow T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{LC} \text{ – формула Томпсона.} \quad (10.2)$$

Из (10.1) видно, что колебания заряда и напряжения совершаются в одной и той же фазе, а колебания силы тока отстают по фазе от напряжения на конденсаторе на  $\pi/2$ .

При колебаниях в контуре происходит непрерывный переход энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности, и наоборот. При незатухающих колебаниях энергия, запасенная в колебательном контуре в начальный момент времени, не изменяется с течением времени и равна

$$W = \frac{CU_M^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_M^2}{2} = \text{const.} \quad (10.3)$$

Реальный контур. В любом реальном колебательном контуре сопротивление  $R$  (активное сопротивление катушки индуктивности и соединительных проводов) всегда отлично от нуля. Поэтому в таком контуре происходят потери энергии (энергия, запасенная в контуре, переходит во внутреннюю энергию), и колебания с течением времени затухают (их амплитуда уменьшается с течением времени). Циклическая частота, с которой совершаются *затухающие колебания*, меньше частоты  $\omega_0$  собственных колебаний. Однако, если  $R$  мало (затухание колебаний незначительно), то с достаточно хорошим приближением можно пользоваться формулами (10.2).

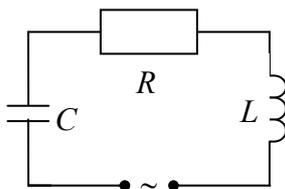


Рис. 24

Вынужденные электромагнитные колебания. Незатухающие (гармонические) колебания в реальном колебательном контуре можно получить, если непрерывно пополнять энергию контура. Для этого необходимо включить последовательно с элементами контура переменную ЭДС или, разорвав контур, подать на образовавшиеся

контакты переменное напряжение  $u^*$  (рис. 24).

$$u^* = U_M^* \cos \omega t, \quad (10.4)$$

где  $U_M^*$  – амплитуда напряжения;  $\omega$  – циклическая частота.

Через некоторое время после замыкания цепи в контуре установятся вынужденные колебания тока, частота которых совпадает с частотой подаваемого напряжения  $u^*$  :

$$i = I_M \cos(\omega t + \varphi), \quad (10.5)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фаз между током и напряжением.

Из (10.5) следует, что вынужденные колебания совершаются с частотой  $\omega$ , не зависящей от параметров контура ( $R, L, C$ ).

Переменный электрический ток. Ток, изменяющийся по закону (10.5), называется *переменным электрическим током*. Переменное напряжение, необходимое для возникновения переменного тока, получается с помощью *генератора переменного тока*. В простейшей модели генератора переменное напряжение возбуждается в замкнутой рамке сопротивлением  $R$ , которое равномерно вращается в однородном магнитном поле. В этом случае сила переменного тока, текущего в рамке, определяется в соответствии с законом Ома:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_M \cos \omega t}{R} = I_M \cos \omega t, \quad I_M = U_M / R.$$

Колебания напряжения на активном сопротивлении совпадают по фазе с колебаниями силы тока.

Для характеристики действия переменного тока вводятся понятия действующей силы тока  $I$  и действующего напряжения  $U$ . **Действующей силой переменного тока называют силу такого постоянного тока, который в том же проводнике и за то же время выделяет такое же количество тепла, что и данный переменный ток.** Аналогично определяется действующее значение напряжения. Действующие значения силы  $I$  тока и напряжения  $U$  определяются формулами:

$$I = I_M / \sqrt{2}, \quad U = U_M / \sqrt{2}, \quad (10.6)$$

где  $I, U$  – действующие значения тока и напряжения;  $I_M, U_M$  – амплитудные значения тока и напряжения.

Именно эти значения измеряются амперметром и вольтметром, включенными в электрическую цепь переменного тока.

Закон Ома для переменного тока. В электрической цепи, состоящей из последовательно включенных активного сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и источника напряжения ( $U = U_M \cdot \cos \omega t$ ), амплитуда силы тока для вынужденных колебаний определяется фор-

мулой

$$I_M = U_M / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}. \quad (10.7)$$

Аналогичное равенство справедливо и для действующих ( $I$  и  $U$ ) значений напряжения и силы тока:

$$I = U / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2} \text{ — закон Ома для цепи переменного тока.} \quad (10.8)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}. \quad (10.9)$$

Величина  $Z$  по аналогии с законом Ома для постоянного тока ( $I = U / R$ ) называется *полным сопротивлением цепи* переменного тока, а величины  $X_L = \omega L$  и  $X_C = 1/(\omega C)$  — *индуктивным и емкостным сопротивлениями* соответственно. Величину  $X = \omega L - 1/(\omega C)$  называют *реактивным сопротивлением*.

Резонанс в электрической цепи. Из формулы (10.7) видно, что амплитуда переменного тока (вынужденных электромагнитных колебаний) зависит не только от параметров  $R, L, C, U_M$ , но и от частоты  $\omega$ . Она достигает максимального значения при условии, что  $\omega L - 1/\omega C = 0$ , или  $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$ , т. е. при частоте вынуждающего напряжения, совпадающей с частотой собственных колебаний. *Явление резкого возрастания амплитуды силы тока при приближении частоты вынуждающего напряжения к частоте собственных колебаний называется явлением резонанса.*

Одновременно с ростом амплитуды силы тока при резонансе резко возрастают амплитудные напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при  $\omega = \omega_0$  одинаковы и могут во много раз превосходить амплитуду внешнего напряжения. При резонансе сдвиг фаз  $\varphi$  между силой тока  $i$  и вынуждающим напряжением  $u^*$  становится равным нулю.

Трансформатор. Переменный ток имеет преимущество перед постоянным током, поскольку его действующие напряжение  $U$  и силу тока  $I$  можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь мощности. Эта задача решается с помощью трансформатора. Отношение напряжения  $U_1$  на концах первичной обмотки трансформатора к напряжению  $U_2$  на концах вторичной при холостом ходе (концы вторичной обмотки разомкнуты) называется

ся коэффициентом трансформации:

$$K = U_1/U_2 = N_1/N_2. \quad (10.10)$$

Здесь  $N_1$  и  $N_2$  – число витков соответственно в первичной и вторичной обмотках. При  $K > 1$  трансформатор является *понижающим*, при  $K < 1$  – *повышающим*.

Если вторичную обмотку замкнуть (рабочий режим) и предположить, что потери мощности в трансформаторе незначительны (в современных мощных трансформаторах они не превышают 2–3%), то на основании закона сохранения энергии можно считать, что

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2 \text{ или } U_1/U_2 \approx I_2/I_1, \quad (10.11)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – действующие значения силы тока в первичной и вторичной обмотках.

Из (10.11) следует, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот). Поэтому можно положить, что

$$K \approx I_2/I_1 \text{ – коэффициент трансформации.} \quad (10.12)$$

Электромагнитные волны. *Электромагнитной волной* называется периодический во времени и пространстве процесс распространения электромагнитного поля.

В электромагнитной волне вектор напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны (вектору скорости  $\vec{v}$ ), т. е. электромагнитная волна является *поперечной*. Колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в любой точке пространства совершаются в одной и той же фазе (*синфазно*). Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости света ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). В среде электромагнитные волны распространяются со скоростью  $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ , где  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Для электромагнитных волн, так же как и для любых других волн, справедливы соотношения:

$$\lambda = vT \Rightarrow v = \lambda \cdot \nu = \lambda/T, \quad (10.13)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $\nu$  – частота;  $T$  – период колебаний.

Источниками электромагнитных волн являются переменные то-

ки и колеблющиеся (движущиеся с ускорением) электрические заряды (*вибраторы*). Энергия, излучаемая вибратором в единицу времени, пропорциональна четвертой степени частоты. По этой причине излучение промышленных токов с частотой 50 Гц очень мало и не имеет негативных последствий для человека.

Для электромагнитных волн, как и для других волновых процессов, наблюдаются явления отражения, преломления, интерференции и др.

## Тема 11. ОПТИКА

### Программа по теме

Свет. Прямолинейное распространение света.

Законы отражения света. Построение изображений в плоском зеркале.

Законы преломления света. Относительный показатель преломления. Полное отражение.

Дисперсия света.

Линза. Фокус линзы. Построение изображений в тонкой линзе. Формула тонкой линзы.

Оптические приборы: лупа, фотоаппарат, проекционный аппарат. Глаз. Дефекты зрения. Очки.

Когерентность. Интерференция света и ее применение в технике.

Дифракция света. Дифракционная решетка.

### Основные теоретические положения и рекомендации

Элементы геометрической оптики. Основным понятием геометрической оптики является понятие *светового луча*, под которым понимают линию (а не тонкий световой пучок), вдоль которой распространяется световая энергия. В однородной среде свет распространяется прямолинейно, т. е. световые лучи представляют собой прямые линии. При падении световых лучей на границу раздела двух сред происходит отражение и преломление света, которое описывается следующими законами.

**Закон отражения:** *луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$  (рис. 25):*

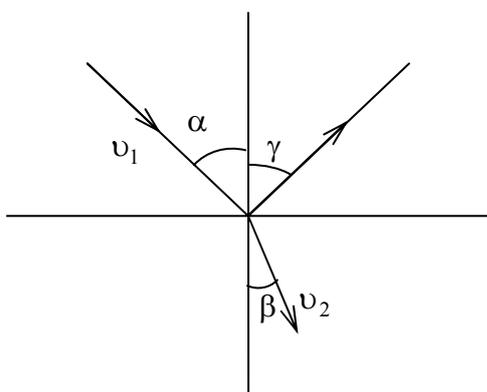


Рис. 25

$$\gamma = \alpha \text{ — закон отражения света.} \quad (11.1)$$

**Закон преломления:** *луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред (рис. 25), т. е.*

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21} \text{ – закон преломления света.} \quad (11.2)$$

Постоянная величина  $n_{21}$  называется *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой (свет проходит из первой среды во вторую). Согласно волновой теории света

$$n_{21} = v_1/v_2, \quad (11.3)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорость распространения света в первой и второй среде соответственно.

Если первой средой является вакуум, то величина

$$n = c/v, \quad (11.3^*)$$

называется *абсолютным показателем преломления* ( $c$  – скорость распространения света в вакууме). Очевидно, что

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{c}{c} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (11.4)$$

Среда, имеющая больший абсолютный показатель преломления, называется *оптически более плотной средой* по сравнению со средой, имеющей меньший абсолютный показатель преломления.

Следует подчеркнуть, что формула (11.3) отражает физический смысл показателя преломления и является определяющей при преломлении света, а формула (11.2) – ее следствием. Некоторые абитуриенты неправильно определяют углы падения, отражения и преломления. Необходимо запомнить, что в оптике все углы определяются как углы между лучами и соответствующими им перпендикулярами к поверхности, восстановленными в точках падения этих лучей.

Следует четко различать понятия абсолютный и относительный показатели преломления и помнить, что абсолютный показатель преломления для данного вещества имеет одно определенное значение и является *характеристикой этого вещества*, тогда как относительный показатель преломления  $n_{21}$  может иметь различные значения в зависимости от того, с какой другой средой граничит данное вещество (данная среда).

Согласно (11.4), при переходе светового луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную показатель  $n_{21} < 1$ , поэтому из закона преломления (11.2) следует, что  $\sin\beta > \sin\alpha$  или  $\beta > \alpha$ ,

т. е. угол преломления  $\beta$  больше угла падения  $\alpha$ . Поэтому при некотором угле падения  $\alpha_0$  синус угла преломления станет равным единице, т. е. преломленный луч скользит по поверхности раздела двух сред (рис. 26). Тогда имеем

$$\boxed{\sin\alpha_0 = n_{21} = n_2/n_1}, \quad (11.5)$$

где  $\alpha_0$  – предельный угол падения.

Если второй средой является воздух, для которого  $n_2 \approx 1$ , то

$$\boxed{\sin\alpha_0 = 1/n_1}. \quad (11.6)$$

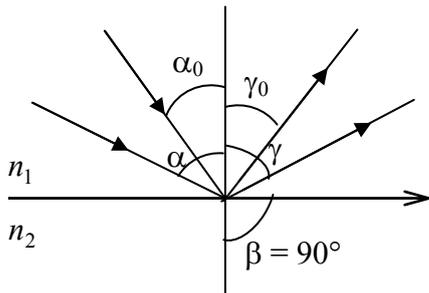


Рис. 26

При угле падения  $\alpha > \alpha_0$  свет полностью отражается от границы раздела, т. е. возникает явление *полного отражения света*, которое часто называют полным внутренним отражением. Таким образом, явление полного отражения света можно наблюдать только при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную и

при условии, что угол падения  $\alpha$  луча больше предельного угла  $\alpha_0$ .

Явления отражения и преломления света лежат в основе действия разнообразных зеркал, призм и линз, являющихся основными деталями оптических приборов, формирующих изображения предметов.

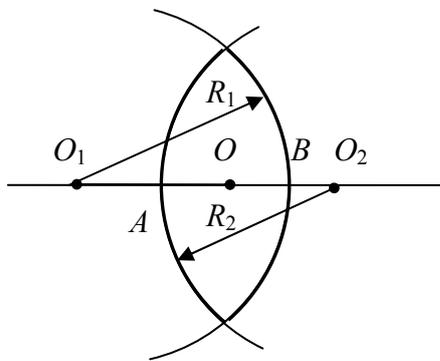


Рис. 27

**Линзой** называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Линза, толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  поверхностей, называется *тонкой* (рис. 27). Линза, которая в середине толще, чем у краев, называется *выпуклой линзой*, а линза, которая у краев толще, чем в середине, называется *вогнутой линзой*.

Прямая, проходящая через центры  $O_1$  и  $O_2$  сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называется *главной оптической осью* (рис. 27). Если толщина линзы пренебрежимо мала, то точки  $A$  и  $B$  (вершины сферических сегментов) расположены столь близко друг от друга, что их можно принять за

одну точку, которую называют *оптическим центром линзы*.

**Оптическая сила линзы** – величина, обратная главному фокусному расстоянию линзы.

$$\boxed{D = 1/F}. \quad (11.7)$$

Единица оптической силы линзы – 1 диоптрия (1 дптр. = 1 м<sup>-1</sup>, т. е. оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно одному метру). Для собирающей линзы  $D > 0$ , для рассеивающей линзы  $D < 0$ .

Оптическую силу линзы можно вычислить по формуле

$$\boxed{D = (n_{21} - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (11.8)$$

где  $n_{21} = n_2/n_1$ ,  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления для материала линзы и окружающей среды;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхностей.

Числовые значения радиусов кривизны выпуклых поверхностей в формулу поставляются со знаком «+», а радиусов кривизны вогнутых поверхностей – со знаком «-».

Если абсолютный показатель преломления вещества линзы больше, чем окружающей среды  $n_{21} > 1$ , то выпуклые линзы будут собирающими ( $D > 0$ ). Вогнутые линзы будут рассеивающими только при  $n_{21} < 1$ .

*Формулой линзы* называется уравнение, связывающее фокусное расстояние  $F$ , расстояние от линзы до изображения  $f$  и расстояние от предмета до линзы  $d$ :

$$\boxed{\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{f} \pm \frac{1}{d}}. \quad (11.9)$$

Производя вычисления по формуле (11.9), необходимо учитывать знаки («+» или «-») величин  $d$ ,  $f$  и  $F$ . Правило знаков: если линза собирающая, то ее фокус действительный и перед членом  $1/F$  ставится знак «+», если же линза рассеивающая, то ее фокус мнимый и перед членом  $1/F$  ставится знак «-». Перед членом  $1/f$  ставится знак «+», если изображение действительное, и знак «-» в случае мнимого изображения. Наконец, перед членом  $1/d$  ставится знак «+» в случае действительно светящейся точки (действительного предмета) и «-», если она мнимая (т. е. если на линзу падает сходящийся пучок лучей,

продолжения которых пересекаются в одной точке).

В том случае, когда  $F$ ,  $f$  или  $d$  неизвестны, то перед соответствующими членами  $1/F$ ,  $1/f$  или  $1/d$  ставится знак «+». Но если в результате вычисления фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения или до источника (предмета) получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник являются мнимыми.

**Линейным увеличением  $\Gamma$**  называется отношение линейного размера (длины или ширины) изображения предмета к линейным размерам (длине или ширине) самого предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h} \text{ или } \Gamma = \frac{f}{d}, \quad (11.10)$$

где  $H$  и  $h$  – размеры изображения и предмета, а увеличение, получаемое с помощью лупы, находится по формуле

$$\Gamma = d_0 / F, \quad (11.11)$$

где  $d_0 = 25$  см – расстояние наилучшего зрения.

Основным свойством линзы является то, что световые лучи, исходящие из какой-либо точки предмета (источника), пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке (изображении) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если после преломления лучи, идущие от источника, собираются в одной точке за линзой, т. е. сходятся, то они образуют *действительное изображение* (рис.

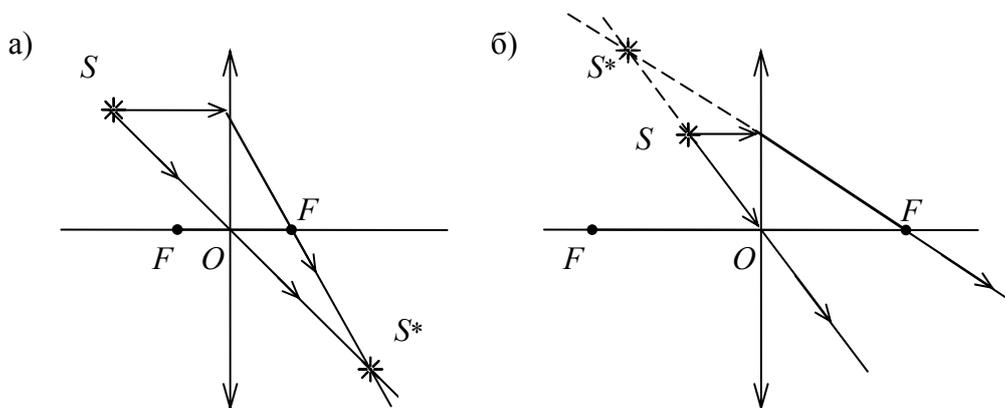


Рис. 28

28а). Если прошедшие через линзу лучи расходятся и пересекаются не сами лучи, а лишь их продолжения, то изображение является *мнимым* (рис. 28б).

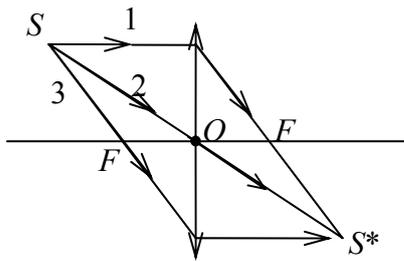


Рис. 29

Для построения изображения в линзе точки предмета достаточно взять два луча, исходящих из этой точки, и найти их точку пересечения после преломления в линзе.

Удобно брать лучи, ход которых заранее известен (рис. 29):

- 1) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси, который после преломления проходит через главный фокус линзы;
- 2) луч, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется;
- 3) луч, проходящий через главный фокус линзы, после преломления идет параллельно главной оптической оси.

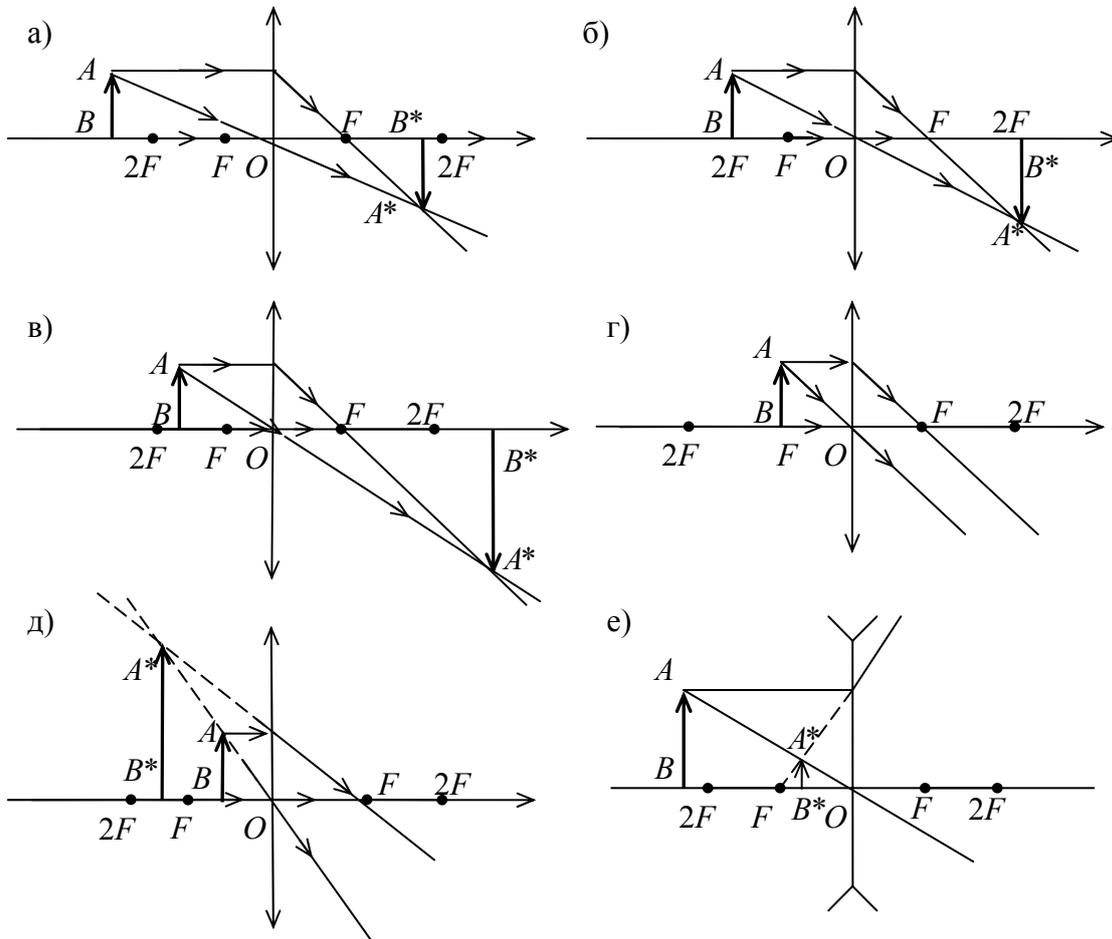


Рис. 30

Возможны шесть типичных случаев, показанных на рис. 30:

а) – изображение действительное, обратное, уменьшенное (принцип работы фотоаппарата); б) – изображение действительное, обратное и равное по величине предмету; в) – изображение действительное, обратное, увеличенное (принцип работы кинопроектора); г) – изображение в бесконечности, так как лучи от каждой точки предмета после преломления в линзе идут параллельно; д) изображение мнимое, прямое, увеличенное (принцип работы лупы); е) изображение мнимое, прямое, уменьшенное.

Элементы волновой оптики. Свет обладает *корпускулярно-волновой природой*. К явлениям, подтверждающим волновую природу света, относятся явления *интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии*. Согласно волновой теории, свет представляет собой электромагнитные волны. В соответствии с этим под *оптикой* понимают раздел физики, изучающий свойства и взаимодействие света с веществом, т. е. электромагнитных волн, длина волны которых лежит в пределах от 1 до  $10^5$  нм. Этот диапазон включает ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра. Длина волны *видимого света* заключена в пределах от 400 до 760 нм (данные относятся к световым волнам в вакууме).

Интерференция света. **Когерентностью** называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов. **Когерентными волнами** называются волны, имеющие постоянную разность фаз. При наложении двух когерентных световых волн происходит наложение вызываемых ими колебаний, в результате этого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства, т. е. возникает *интерференционная картина*, соответствующая явлению интерференции.

Явление интерференции света находит широкое применение на практике. В частности, это явление используется при «просветлении оптики». Как показывают расчеты, толщина  $h$  пленки, которую необходимо с этой целью оптики нанести на каждую поверхность линзы, определяется формулой

$$h = \lambda / (4n), \quad (11.12)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны;  $n$  – абсолютный показатель преломления пленки.

**Дифракция света** – огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени. Дифракция света на-

блюдается лишь в том случае, если размеры препятствий сравнимы с длиной световой волны.

В соответствии с теорией Френеля при дифракции монохроматического света на дифракционной решетке положение главных максимумов определяется формулой

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (11.13)$$

где  $d = a + b$  – период решетки ( $a$  – ширина щели,  $b$  – ширина непрозрачного промежутка);  $\varphi$  – угол дифракции;  $k = 1, 2, 3 \dots$  – порядок главных максимумов;  $\lambda$  – длина волны.

Если на дифракционную решетку падает белый свет, то в результате дифракции на решетке каждый главный максимум разлагается в спектр. Следовательно, дифракционная решетка является спектральным прибором (аналогично трехгранной стеклянной призме).

**Дисперсия света** – явление, обусловленное зависимостью скорости  $v$  распространения световых волн в веществе от длины волны (частоты). Так как  $n = c/v$ , то дисперсию света можно определить как зависимость показателя преломления вещества  $n$  от длины волны  $\lambda$  световых волн ( $n = n(\lambda)$ ). В частности, дисперсией света можно объяснить разложение луча белого света в спектр при прохождении его сквозь призму (призматический спектр света).

В вакууме электромагнитные волны распространяются с постоянной скоростью  $c = 300\,000$  км/с независимо от длины волны. Поэтому дисперсия электромагнитных волн в вакууме отсутствует.

## Тема 12. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### Программа по теме

Постулаты теории относительности.

Основные следствия, вытекающие из постулатов теории относительности.

Закон взаимосвязи массы и энергии.

### Основные теоретические положения и рекомендации

В основе *теории относительности* (релятивистской механики) лежат два постулата, т. е. два основных положения, являющиеся результатом обобщения опытных фактов.

**Первый постулат**, называемый принципом относительности Эйнштейна, утверждает: *все процессы природы протекают одинаково в любой инерциальной системе отсчета*. Это означает, что во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одинаковую форму (описываются одинаковыми уравнениями).

**Второй постулат**, называемый принципом постоянства скорости света, гласит: *скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета*. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

Из постулатов теории относительности вытекает, что пространство и время не могут рассматриваться обособленно и независимо друг от друга, как это считается в ньютоновской механике, а являются взаимосвязанными, образуя единое четырехмерное пространство, включающее три пространственных измерения (координаты) и время. В связи с этим ряд величин и понятий, которые в ньютоновской механике считались абсолютными, в теории относительности оказались *относительными* (например, одновременность событий, промежуток времени, расстояние, масса тела и др.). Так, в теории относительности утверждается, что длина  $l$  тела, движущегося относительно инерциальной системы со скоростью  $v$ , определяется по формуле

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \text{ — релятивистский эффект сокращения длины,} \quad (12.1)$$

где  $l_0$  — длина тела в той инерциальной системе, относительно которой тело покоится (*собственная длина* в собственной системе отсчета),  $l < l_0$ .

Интервалы времени  $\tau$  и  $\tau_0$  между двумя событиями в разных инерциальных системах связаны:

$$\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \text{ — эффект замедления течения времени,} \quad (12.2)$$

где  $\tau_0$  — интервал времени между двумя событиями, которые произошли с объектом (телом), находящимся в собственной системе отсчета, т. е. в системе, относительно которой он покоится;  $\tau$  — интервал времени между этими же событиями в системе, относительно которой объект движется со скоростью  $v$  ( $\tau > \tau_0$ ).

Скорости релятивистской частицы в разных инерциальных системах связаны соотношением

$$v = \frac{v_0 + v'}{1 + v_0 v' / c^2} \text{ — релятивистский закон сложения скоростей,} \quad (12.3)$$

где  $v$  — скорость частицы относительно неподвижной системы отсчета;  $v_0$  — скорость движения системы отсчета  $x' y' z'$  относительно неподвижной оси  $x y z$ ;  $v'$  — скорость частицы относительно системы  $x' y' z'$ , которая движется с постоянной скоростью  $v_0$  относительно инерциальной системы  $x y z$ .

Масса  $m$  движущегося со скоростью  $v$  тела связана с его массой покоя  $m_0$ , которую тело имеет в собственной системе координат, относительно которой оно покоится, соотношением:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (12.4)$$

Очень важным выводом теории относительности является вывод о том, что масса и энергия  $E$  тела (частицы) взаимосвязаны следующим соотношением:

$$E = mc^2 \text{ — полная энергия тела,} \quad (12.5)$$

т. е. энергия тела или системы тел равна массе, умноженной на квадрат скорости света. В соответствии с (12.7) величину

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (12.6)$$

называют *энергией покоя*. Следовательно, кинетическая энергия  $E_k$  тела в теории относительности определяется формулой

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2. \quad (12.7)$$

## Тема 13. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

### Программа по теме

Фотоэффект и его законы. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Применение фотоэффекта.

#### Основные теоретические положения и рекомендации

Многочисленные попытки физиков мира объяснить механизм излучения нагретого тела с позиций классической физики не увенчались успехом. Эта задача была решена М. Планком путем отказа от определенных привычных представлений классической физики, а именно, он предположил, что *атомы излучают электромагнитные волны не непрерывно, а прерывисто, т. е. порциями – квантами, энергия  $\epsilon$  которых пропорциональна частоте  $\nu$  колебаний:*

$$\boxed{\epsilon = h\nu - \text{энергия кванта,}} \quad (13.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). Идея Планка в дальнейшем была развита Эйнштейном, который предположил, что *электромагнитное излучение не только испускается порциями (квантами), но распространяется и поглощается веществом в виде отдельных частиц электромагнитного поля – фотонов.*

Фотон обладает:

$$\boxed{\begin{array}{ll} \text{энергией} & \epsilon = h\nu, \\ \text{массой} & m = \epsilon/c^2 = h\nu/c^2, \\ \text{импульсом} & p = mc = h\nu/c. \end{array}} \quad (13.2)$$

Представление о фотонах как квантах электромагнитного поля нашло свое подтверждение и дальнейшее развитие в ряде других явлений: *фотоэлектрическом эффекте, химическом действии света, эффекте Комптона* и т. д. В частности, все законы внешнего фотоэффекта могут быть объяснены исходя из представления о фотонах и уравнения, которое удовлетворяет закону сохранения энергии для системы фотон – электрон:

$$\boxed{h\nu = A + m v_{\max}^2 / 2 - \text{уравнение Эйнштейна для фотоэффекта,}} \quad (13.3)$$

где  $A$  – работа выхода электрона из вещества;  $v_{\max}$  – максимальная скорость выбиваемых светом электронов (*фотоэлектронов*).

Внешний фотоэффект возможен только в том случае, когда энергия фотона  $h\nu$  больше или равна работе  $A$ . Следовательно, соот-

ветствующая *красной границе* фотоэффекта частота

$$\boxed{\nu_0 = A/h.} \quad (13.4)$$

Формулируя законы фотоэффекта и используя уравнение Эйнштейна, многие абитуриенты не четко представляют, что это уравнение есть не что иное, как закон сохранения энергии, описывающий процесс поглощения фотона электроном. Поэтому они часто вместо максимальной кинетической энергии электрона ( $m v_{\max}^2 / 2$ ) в уравнении Эйнштейна пишут просто  $mv^2 / 2$  и испытывают затруднения при объяснении смысла этой величины, т. е. обнаруживают непонимание сути этого важного явления. У абитуриентов также вызывают затруднения задания, в которых нужно установить связь основных экспериментальных законов внешнего фотоэффекта с уравнением Эйнштейна и представлений о квантах излучения – фотонах. Предлагаем читателю разрешить этот вопрос самостоятельно или воспользоваться учебником, но выполнить обязательно, так как это позволит глубже понять явление фотоэффекта и уверенно решать задачи по этой теме.

## Тема 14. АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

### Программа по теме

Опыт Резерфорда. Ядерная модель атома.  
Квантовые постулаты Бора. Испускание и поглощение света атомом.  
Лазеры. Принцип действия лазеров. Применение лазеров.  
Состав ядра атома. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции. Энергетический выход ядерной реакции.  
Радиоактивность. Альфа-, бета- и гамма-излучения. Закон радиоактивного распада. Методы регистрации ионизирующих излучений.  
Поглощенная доза излучения. Биологическое действие ионизирующих излучений. Защита от излучений.  
Деление ядер урана. Цепная реакция. Ядерный реактор. Экологические аспекты ядерной энергетики. Термоядерная реакция.  
Элементарные частицы и их свойства.

### Основные теоретические положения и рекомендации

Строение атома. Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц позволили построить *ядерную модель* атома, согласно которой атом представляет систему частиц, в центре которой находится положительно заряженное ядро с зарядом  $+Ze$ , а вокруг ядра движется  $Z$  электронов ( $Z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева,  $e$  – элементарный заряд). Линейные размеры ядра порядка  $10^{-15}$ – $10^{-14}$  м, а размеры атома –  $10^{-10}$  м. Ядерная модель атома оказалась в противоречии с классической физикой.

Чтобы выйти из этого затруднения Н. Бор сформулировал два постулата. **Первый постулат:** *атом может находиться только в особых стационарных (или квантовых состояниях), каждому из которых соответствует определенное значение энергии  $E_n$  ( $n$  – номер состояния); в стационарном состоянии атом не излучает электромагнитные волны.*

Согласно **второму постулату**, *излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:*

$$\boxed{h\nu_{kn} = E_k - E_n \Rightarrow \nu_{kn} = (E_k - E_n)/h.} \quad (14.1)$$

Состав ядра. Ядро атома состоит из протонов и нейтронов. Число протонов в ядре равно порядковому номеру  $Z$  элемента в таблице Менделеева. Сумма числа протонов  $Z$  и нейтронов  $N$  совпадает с мас-

совым числом, которое обозначают буквой  $A$ :

$$\boxed{A = Z + N \Rightarrow N = A - Z.} \quad (14.2)$$

Массовое число равно атомной массе элемента, выраженной в атомных единицах (а. е. м.) и округленной до ближайшего целого числа. Для обозначения ядер применяется символ  ${}^A_Z X$ , где под  $X$  подразумевается химический символ элемента. Вверху ставится его массовое число, внизу – число протонов (зарядовое число). Протоны и нейтроны удерживаются в ядре ядерными силами.

Энергия связи. Чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны (протоны и нейтроны), необходимо сообщить ядру некоторую энергию, которую называют энергией связи ядра. *Энергия связи  $E_{\text{св}}$  ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.*

$$\boxed{E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) c^2,} \quad (14.3)$$

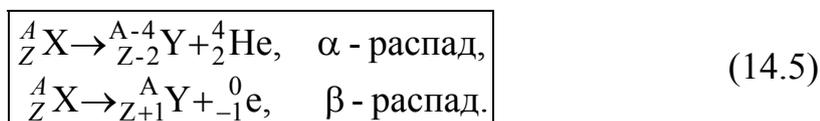
здесь  $\Delta M$  – дефект массы ядра;  $m_p$ ,  $m_n$  и  $M_{\text{я}}$  – массы протона, нейтрона и ядра соответственно.

*Энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра, называется удельной энергией связи:*

$$\boxed{E_{\text{уд}} = E_{\text{св}}/A.} \quad (14.4)$$

Явление радиоактивности. Из известных в настоящее время около 1500 ядер, отличающихся либо  $Z$ , либо  $N$ , либо тем и другим, только примерно 1/5 часть из них устойчива, остальные *радиоактивны.*

*Радиоактивность представляет собой процесс самопроизвольного превращения одних ядер в другие, сопровождаемый испусканием отдельных частиц.* Радиоактивное превращение ядер происходит в соответствии с *правилами смещения*, которые для  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада записываются следующим образом:



Радиоактивный распад происходит по вероятностным законам, т. е. это явление принципиально статистическое. Закон уменьшения числа радиоактивных ядер описывается показательной функцией (или

экспонентой):

$$N=N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \text{ или } N=N_0 \cdot e^{-\lambda t} - \text{закон радиоактивного распада.} \quad (14.6)$$

В этих формулах  $N$  – число ядер, которые еще не распались к моменту времени  $t$ ;  $N_0$  – начальное число ядер в момент времени  $t = 0$ ;  $T_{1/2}$  – период полураспада (время, в течение которого распадается половина имеющегося числа радиоактивных ядер);  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада ( $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ );  $e$  – основание натуральных логарифмов ( $e = 2,7183$ ).

Активность радиоактивного препарата. **Активностью радиоактивного препарата** называется число распадов, происходящих в препарате за единицу времени. Если за время  $dt$  распадется  $dN$  ядер, то активность  $A = dN/dt$ . Исходя из закона радиоактивного распада (14.6), можно показать, что

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (14.7)$$

В СИ единицей активности является *беккерель* (Бк), равный одному распаду в секунду. Внесистемной единицей активности является *кюри* (Ки). Единица активности, называемая кюри, определяется как активность такого препарата, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  актов распада в секунду ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Ядерные реакции. **Ядерной реакцией** называется процесс взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или другим ядром, приводящий к преобразованию ядра или ядер. Ядерные реакции протекают в точном соответствии с законами сохранения электрического заряда, энергии, импульса и числа нуклонов (массового числа  $A$ ). *Энергетический выход реакции* рассчитывается по формуле

$$\Delta E = \Delta m c^2, \quad (14.8)$$

где  $\Delta m$  – разность суммарных масс всех частиц до реакции и после нее.

Важным видом ядерных реакций являются реакции с участием нейтронов, в частности реакции деления ядер урана. При бомбардировке ядер  ${}_{92}^{235}\text{U}$  нейтронами, особенно тепловых энергий ( $\cong 0,025 \text{ эВ}$ ), ядро урана распадается на 2 осколка с испусканием двух-трех нейтронов и  $\gamma$ -лучей. При этом выделяется большая энергия, порядка 200 МэВ на каждый акт деления. Испускание двух-трех нейтронов

при определенных условиях, в частности при массе куска урана, равной *критической*, может привести к *цепной ядерной реакции*. Для этого *коэффициент размножения нейтронов*  $k$  должен быть больше или равен единице. **Коэффициентом размножения нейтронов**  $k$  называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения». Для стационарного течения цепной реакции необходимо, чтобы условие  $k = 1$  выполнялось с большой точностью. Уже при  $k = 1,01$  почти мгновенно произойдет взрыв. Этот случай имеет место в ядерной бомбе.

Поддерживать значение  $k = 1$  и осуществлять таким образом *управляемую ядерную реакцию* позволяет то, что не все нейтроны, появляющиеся при делении, испускаются мгновенно. Часть из них ( $\cong 0,76\%$ ) испускаются с запаздыванием до 1 мин. Это позволяет управлять течением цепной реакции в ядерных реакторах путем введения в активную зону реактора поглотителей из кадмия или бора.

Выделение еще большей энергии происходит при ядерных реакциях синтеза легких ядер в более тяжелые. Простейшей *термоядерной реакцией* является реакция  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ , при которой выделяется энергия 17,6 МэВ ( $\cong 3,5$  МэВ на нуклон).

Основы дозиметрии. Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Характер этого воздействия зависит от поглощенной дозы излучения и от его вида.

**Поглощенной дозой излучения** называют величину, равную отношению энергии  $\Delta W$  излучения, поглощенной облучаемым телом, к его массе  $m$ :

$$\boxed{D = \Delta W / m.} \quad (14.9)$$

Единица поглощенной дозы излучения  $[D] = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр (грэй)}$ :

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ кг}.$$

**Экспозиционной дозой излучения** (ЭДИ) называют величину, равную отношению суммарного заряда  $q$  ионов, образованных излучением, к массе  $m$  тела:

$$\boxed{\text{ЭДИ} = q / m.} \quad (14.10)$$

За единицу ЭДИ принимают интенсивность такого излучения, которое производит в 1 кг сухого воздуха такое число ионов, суммар-

ный заряд которых составляет 1 Кл каждого знака 1 ЭДИ = 1 Кл/кг.

На практике часто используется внесистемная единица *рентген* (Р) и ее дольные единицы. Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и гамма-излучений. Доза излучения равна одному *рентгену*, если в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст. образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

В практической дозиметрии можно считать 1 Р приблизительно эквивалентным поглощенной дозе излучения 0,01 Гр.

*Эквивалентной дозой поглощенного излучения называют величину, равную произведению поглощенной дозы на коэффициент  $k$  качества излучения, который показывает, во сколько раз поражающее действие данного вида излучения выше, чем рентгеновского при одинаковой дозе поглощенного излучения:*

$$D_{\text{экв}} = k \cdot D. \quad (14.11)$$

В СИ за единицу эквивалентной дозы принят 1 *зиверт* (Зв). Эта единица соответствует поглощенной дозе 1 грэй при коэффициенте качества излучения, равном единице.

На практике для измерения эквивалентной дозы поглощенного излучения используют внесистемную единицу *бэр* (*биологический эквивалент рентгена*) 1 бэр = 0,01 Зв.

Доза облучения до 25 Р считается для человека безопасной, доза облучения в 500 Р и выше – смертельной.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Образец теста по физике .....	8
Тема 1. Основы кинематики .....	16
Тема 2. Основы динамики и статики .....	21
Тема 3. Законы сохранения в механике .....	30
Тема 4. Жидкости и газы .....	35
Тема 5. Молекулярная физика. Тепловые явления .....	38
Тема 6. Электростатика .....	44
Тема 7. Законы постоянного тока. Электрический ток в различных средах .....	49
Тема 8. Магнитное поле. Электромагнитная индукция .....	54
Тема 9. Механические колебания и волны .....	60
Тема 10. Электромагнитные колебания и волны .....	66
Тема 11. Оптика .....	72
Тема 12. Элементы теории относительности .....	80
Тема 13. Квантовые свойства света .....	82
Тема 14. Атом и атомное ядро .....	84

Учебное издание

# **ФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие

Авторы-составители:

**Гольман** Леонид Петрович

**Долгий** Валерий Казимирович

**Лобко** Сергей Ильич

**Наркевич** Иван Иванович

**Олехнович** Александр Михайлович

**Хартанович** Александр Захарович

Компьютерный набор и верстка

*Л.А. Кочегарова, О.В. Хвалец*

Редактор *Р.М. Рябая*

Подписано в печать 10.05.04. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,3. Уч.-изд. л. 5,4.

Тираж 500 экз. Заказ

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».  
220050. Минск, Свердлова, 13а. Лицензия ЛВ № 276 от 15.04.03

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220050. Минск, Свердлова, 13.