

# ФИЗИКА

ПОШАГОВАЯ  
ПОДГОТОВКА

# ЕГЭ



**ЭФФЕКТИВНАЯ  
МЕТОДИКА  
САМОПОДГОТОВКИ**



НЕОБХОДИМЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ



ЗАДАНИЯ ПО ТЕМЕ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ



ТИПОВЫЕ ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ВАРИАНТЫ

**НЕДЕЛЯ ЗА НЕДЕЛЕЙ**



О.П. БАЛЬВА, Л.С. КРЕМИНСКАЯ

# ФИЗИКА

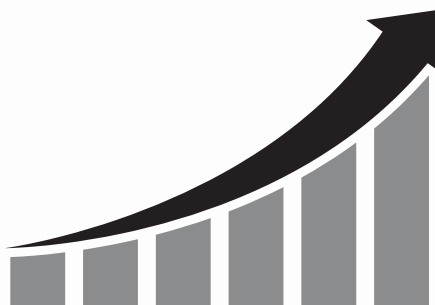
ПОШАГОВАЯ  
ПОДГОТОВКА

# ЕГЭ



ЭФФЕКТИВНАЯ  
МЕТОДИКА  
САМОПОДГОТОВКИ

НЕДЕЛЯ ЗА НЕДЕЛЕЙ



МОСКВА 2019



УДК 323:53  
ББК 22.3я721  
Б21

**Бальва, Ольга Павловна.**  
Б21 ЕГЭ. Физика: пошаговая подготовка / О.П. Бальва, Л.С. Кремнинская. — Москва : Эксмо, 2019. — 304 с. — (ЕГЭ. Неделя за неделей).

Издание содержит все темы школьного курса физики, необходимые для сдачи ЕГЭ.

Весь материал четко структурирован и разделен на 36 логических блоков (недель), включающих необходимые теоретические сведения, задания для самоконтроля в виде схем и таблиц, а также в форме ЕГЭ. Изучение каждого блока рассчитано на 2—3 самостоятельных занятия в неделю в течение учебного года. Кроме того, в пособии приводятся тренировочные варианты, цель которых — оценить уровень знаний.

Пособие поможет организовать пошаговую подготовку учащихся старших классов к ЕГЭ по физике.

УДК 323:53  
ББК 22.3я721

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Справочное издание  
анықтамалық баспа

ЕГЭ. НЕДЕЛЯ ЗА НЕДЕЛЕЙ

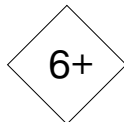
**Бальва Ольга Павловна**  
**Кремнинская Лариса Сергеевна**

**ЕГЭ**  
**ФИЗИКА**  
**ПОШАГОВАЯ ПОДГОТОВКА**  
(орыс тілінде)

Ответственный редактор **А. Жилинская**  
Ведущий редактор **Т. Судакова**  
Художественный редактор **Е. Брынчик**

ООО «Издательство «Эксмо»  
123308, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел.: 8 (495) 411-68-86.  
Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)  
Өндіруші: «ЭКСМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Ресей, Зорге көшесі, 1 үй.  
Тел.: 8 (495) 411-68-86.  
Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)  
Таяуар белгісі: «Эксмо»  
Интернет-магазин: [www.book24.ru](http://www.book24.ru)  
Интернет-магазин: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)  
Интернет-дүкен: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)  
Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы»,  
Қазақстан Республикасында импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.  
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию,  
в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»  
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды  
қабылдаушының өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС,  
Алматы қ., Домбровский көш., 3-а, литер Б, офис 1.  
Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92; E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)  
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.  
Сертификация туралы ақпарат: сайтта: [www.eksmo.ru/certification](http://www.eksmo.ru/certification)  
Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ  
о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»  
[www.eksmo.ru/certification](http://www.eksmo.ru/certification)  
Өндірген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылған

Дата изготовления / Подписано в печать 20.05.2019. Формат 84x108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 31,92. Тираж экз. Заказ



ISBN 978-5-04-103915-8



9 785041 039158 >

ISBN 978-5-04-103915-8



ЕКСМО.РУ  
новинки издательства



© Бальва О.П., Кремнинская Л.С., 2019  
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

	ПРЕДИСЛОВИЕ .....	6
	ТРЕНИРОВОЧНЫЙ ТЕСТ №1 .....	10
	<b>МЕХАНИКА</b>	
<b>Неделя 1</b>	Кинематика .....	22
<b>Неделя 2</b>	Кинематика .....	30
<b>Неделя 3</b>	Динамика .....	38
<b>Неделя 4</b>	Динамика .....	48
<b>Неделя 5</b>	Динамика .....	54
<b>Неделя 6</b>	Статика .....	60
<b>Неделя 7</b>	Статика .....	64
<b>Неделя 8</b>	Законы сохранения в механике .....	72
<b>Неделя 9</b>	Законы сохранения в механике .....	76
<b>Неделя 10</b>	Законы сохранения в механике .....	82
<b>Неделя 11</b>	Механические колебания и волны .....	84
<b>Неделя 12</b>	Механические колебания и волны .....	94
	Тестовые задания к разделу «Механика» .....	102



**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА**

<b>Неделя 13</b>	Молекулярная физика .....	112
<b>Неделя 14</b>	Молекулярная физика .....	120
<b>Неделя 15</b>	Молекулярная физика .....	126
<b>Неделя 16</b>	Молекулярная физика .....	134
<b>Неделя 17</b>	Термодинамика .....	140
<b>Неделя 18</b>	Термодинамика .....	146
	Тестовые задания к разделу «Молекулярная физика. Термодинамика».....	152

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

<b>Неделя 19</b>	Электрическое поле .....	156
<b>Неделя 20</b>	Электрическое поле .....	162
<b>Неделя 21</b>	Электрическое поле .....	168
<b>Неделя 22</b>	Законы постоянного тока .....	172
<b>Неделя 23</b>	Законы постоянного тока .....	176
<b>Неделя 24</b>	Законы постоянного тока .....	180
<b>Неделя 25</b>	Магнитное поле .....	188
<b>Неделя 26</b>	Магнитное поле .....	198
<b>Неделя 27</b>	Магнитное поле .....	202
<b>Неделя 28</b>	Электромагнитные колебания и волны .....	206
<b>Неделя 29</b>	Электромагнитные колебания и волны .....	210
<b>Неделя 30</b>	Оптика .....	222
<b>Неделя 31</b>	Оптика .....	232

<b>Неделя 32</b>	Оптика .....	238
	Тестовые задания к разделу «Электродинамика».....	246
	<b>ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ</b>	
<b>Неделя 33</b>	Основы специальной теории относительности .....	258
	<b>КВАНТОВАЯ ФИЗИКА</b>	
<b>Неделя 34</b>	Корпускулярно-волновой дуализм .....	262
<b>Неделя 35</b>	Физика атома .....	268
<b>Неделя 36</b>	Физика атомного ядра .....	274
	Тестовые задания к разделам «Основы специальной теории относительности», «Квантовая физика» .....	285
	ТРЕНИРОВОЧНЫЙ ТЕСТ №2 .....	291
	ОТВЕТЫ К ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ .....	301

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Результаты единого государственного экзамена исключительно важны для выпускника и будущего абитуриента — они учитываются в школьном аттестате и при поступлении в вузы. Получить максимальный балл на ЕГЭ непросто, но с каждым годом увеличивается число выпускников, которые блестяще с этим справляются.

Перед вами уникальное учебное пособие, разработанное педагогами-репетиторами для выпускников, их родителей и коллег-учителей. Издание содержит весь материал школьного курса по физике, необходимый для сдачи ЕГЭ, в соответствии с кодификатором элементов содержания и требований к уровню подготовки выпускников общеобразовательных учреждений для проведения ЕГЭ. Пособие состоит из 3 частей:

*Часть 1* — пробный тест в формате ЕГЭ, который позволит учащемуся оценить свой уровень знаний в начале подготовки.

*Часть 2* — материал для повторения, проверки и закрепления знаний школьного курса по физике с тестовыми заданиями в формате ЕГЭ. Программа самоподготовки разделена на 36 недель, что позволит учащемуся систематизировать самостоятельную работу в течение года. Объём теоретического материала и заданий каждой недели отбирался авторами таким образом, чтобы проработка его занимала у учащегося не более 2 часов в неделю.

*Часть 3* — контрольный тест в формате ЕГЭ, который продемонстрирует уровень подготовки перед сдачей самого экзамена.

## Уважаемые выпускники!

Чтобы успешно сдать ЕГЭ, необходимы глубокие знания по физике и умение организовывать свою работу.

Итак...

- 1. Что вы знаете?** Выполните пробный тест. Для выполнения экзаменационной работы по физике отводится 3 часа 55 минут (235 минут). Работа состоит из двух частей, включающих в себя 31 задание. Часть 1 включает 23 задания. Часть 2 включает 8 заданий. В заданиях 1—4, 8—10, 14, 15, 20, 24—26 ответом является целое число или конечная десятичная дробь. Ответом к заданиям 5—7, 11, 12, 16—18, 21 и 23 является последовательность двух цифр. Ответом к заданию 13 является слово. Ответом к заданиям 19 и 22 являются два числа. Ответ к заданиям 27—31 включает в себя подробное описание всего хода выполнения задания. При вычислениях разрешается использовать непрограммируемый калькулятор.

Бланк для ответов в конце теста поможет потренироваться в заполнении аналогичного бланка на самом экзамене, ведь от правильности и аккуратности заполнения его во многом зависит ваша будущая оценка. Постарайтесь выполнить как можно больше заданий и набрать наибольшее количество баллов. Будьте честны с собой! Как вы усвоили материал школьной программы? Если вы не набрали максимального количества баллов, то...

- 2. Что делать?** Весь материал пособия разделен на 36 недель. Ответьте на тестовые задания, расположенные на полях. Внимательно прочитайте формулировку заданий и постарайтесь понять смысл вопроса. После этого прочитайте варианты ответов. Если вы поняли вопрос, то, скорее всего, вы знаете и ответ на него. Если вы испытываете затруднения при выполнении этих заданий текущей недели, то повторите теоретический материал. Затем попробуйте ответить на эти задания с опорой на теоретический

материал, расположенный рядом с заданиями. В завершение недели выполните задания из раздела «Контроль знаний», которые позволят закрепить и систематизировать учебный материал недели. В конце раздела проверьте свои знания, выполнив задания повышенной сложности.

3. **Как провести репетицию ЕГЭ?** Повторив весь школьный курс, представьте себя на экзамене. Пройдите последний тест, подобный тому, который вы будете проходить во время ЕГЭ, в условиях, максимально приближенных к условиям экзамена. Сидя дома за рабочим столом, представьте себя на экзамене — тогда на ЕГЭ вы будете чувствовать себя как дома.

*Верьте в свои силы! Желаем удачи!*

#### **Уважаемые родители!**

**Чем вы можете помочь своему ребёнку?**

1. **Организовать систематическую и последовательную подготовку к ЕГЭ.** Большинство подростков ещё не могут правильно планировать своё время, всё откладывают «на потом». От правильного планирования занятий во многом зависит результат подготовки. Выделить 2 часа в неделю в плотном графике современного школьника легче, чем повторить весь материал школьного курса за несколько дней до экзамена.
2. **Создать благоприятную психологическую обстановку дома.** Даже для самого ответственного ученика экзамен — это испытание, стресс. «Домашняя психотерапия» — это помощь любящих и заботливых близких людей, родителей, которые проверят, напомнят, убедят, уберегут от бессонных ночей накануне экзамена, успокоят и поддержат.
3. **Быть рядом.** Мы не призываем родителей учить вместе с ребёнком темы и ответы на вопросы. Это первое «взрослое» испытание для учащегося, а не для его родителей! Принимайте участие в делах вашего ребёнка, интересуйтесь его душевным состоянием, настроением. Стараясь помочь, вы дадите своим детям уроки любви, сочувствия, взаимопомощи, научите спокойно и уверенно преодолевать трудности.

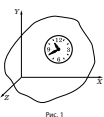
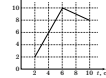
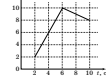
*Желаем вам удачи и терпения!*

#### **Уважаемые коллеги-учителя!**

В начале каждой недели приведены темы для повторения из кодификатора элементов содержания и требований к уровню подготовки выпускников общеобразовательных учреждений для проведения ЕГЭ. Каждому разделу и элементу содержания, проверяемым на ЕГЭ, соответствует несколько типов заданий. Задания базового уровня сложности расположены рядом с соответствующим теоретическим материалом. Задания повышенного и высокого уровней сложности расположены в конце каждого раздела. Два тренировочных теста помогут каждому учащемуся определить свой уровень подготовки.

Конечно, ЕГЭ требует специальной подготовки по предмету, но готовиться нужно и к самой форме проведения экзамена. При этом необходимы обобщение и систематизация изученного материала. Следует обратить особое внимание на пробелы в знаниях учащегося, допущенные при изучении школьной программы, и устранить их. Надеемся, что наше пособие будет полезно вам в вашей ежедневной работе.

*Желаем творческих успехов!*

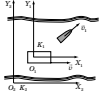
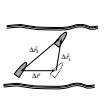
Номер недели	Элементы содержания кодификатора ЕГЭ	Задания базового уровня сложности
<b>НЕДЕЛЯ 1</b>	<p><b>Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:</b></p> <p>1.1. Кинематика 1.1.1. Механическое движение и его виды 1.1.2. Относительность механического движения 1.1.3. Скорость</p> <p><b>МЕХАНИКА</b></p> <p><b>КИНЕМАТИКА</b></p> <p>Механика — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.</p> <p>В механике рассматривают взаимодействия тел, результатом которых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации. Например, притяжение тел по закону всемирного тяготения, взаимное давление соприкасающихся тел, воздействие частиц излучения или газа друг на друга и на движущиеся или покоящиеся в них тела и т. д.</p> <p>Под <b>механическим движением</b> понимают изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей в пространстве: например, движение небесных тел, колебания земной коры, водотечения и морские течения, движение летательных аппаратов и транспортных средств, машина и механизма, деформация элементов конструкций и сооружений, движение жидкостей и газов и др.</p> <p>Механика состоит из следующих разделов:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) механика материальных точек;</li> <li>2) механика абсолютно твердого тела;</li> <li>3) механика сплошной среды, в которую, в свою очередь, входят:             <ol style="list-style-type: none"> <li>а) теория упругости;</li> <li>б) теория пластичности;</li> <li>в) гидродинамика;</li> </ol> </li> </ol> <p>Каждый из перечисленных разделов механики на статике, динамике и кинематике.</p> <p><b>Кинематика</b> (от греч. <i>kinein</i> — двигаться) — раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил. Основные задачи кинематики таковы:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Описание движений, совершаемых точками по отношению к выбранной системе отсчета, с помощью уравнений, таблиц или графиков. Определить движение точки значит определить положение точки в любой момент времени (или определить так называемые законы движения).</li> <li>2. Определение кинематических характеристик движения. Кинематические характеристики движения точки являются ее скоростью и ускорением.</li> <li>3. Изучение сложных (составных) движений и определение зависимости между характеристиками этих движений. Под сложным движением понимают движение тела относительно системы координат, которая сама движется (относительно другой, неподвижной системы координат).</li> </ol>	<p><b>Система отсчета</b></p> <p>Система координат <math>X, Y, Z</math> тела отсчета, с которым она связана, и прибор для измерения времени (часы) образуют систему отсчета, относительно которой рассматривается движение тела (рис. 1).</p>  <p>Рис. 1</p> <p><b>Телом отсчета</b> называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.</p> <p>Систему отсчета можно выбрать произвольно. При кинематических исследованиях все системы отсчета равноправны. В задачах динамики также можно использовать любые произвольно движущиеся системы отсчета, но удобнее всего использовать системы отсчета, так как в них характеристики движения имеют более простой вид.</p> <p><b>Поступательное движение</b></p> <p><b>Поступательное движение</b> — это движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается параллельно своему начальному направлению.</p> <p>При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые (при наложении совпадающие) траектории и имеют в каждый момент времени одинаковые по модулю и направлению скорости и ускорения.</p> <p>Поступательное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным. Например, поступательно движется колесо колеса оборота. Человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора, также движется поступательно. Для описания его движения (т. е. определения зависимости скорости от времени, пути) достаточно рассмотреть движение только одной его точки.</p>  <p>Рис. 2</p> <p><b>ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ</b></p> <p><b>1</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. В каком из приведенных ниже случаев движение тела можно считать за материальную точку?             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) вычисляет время полета самолета из одного города в другой</li> <li>2) измеряет высоту ракеты</li> <li>3) вычисляет давление автомобиля на грунт</li> <li>4) определяет объем стального кубика, пользуясь измерительными цилиндрами (мензурой)</li> </ol> </li> <li>2. Найдите путь и модуль перемещения лодки, который ушел с высоты 8 км, отплыл от берега и был пойман на высоте 2 км.             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 10 км и 8 км</li> <li>2) 10 км и 6 км</li> <li>3) 6 км и 10 км</li> <li>4) 8 км и 6 км</li> </ol> </li> <li>3. На рисунке показана траектория движения материальной точки. Найдите модуль перемещения материальной точки.              </li> <li>4. Тренинги прыжков и парашютизм на высоте 4 км, а затем в свободном падении еще 3 км. Найдите модуль перемещения.             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 4 км</li> <li>2) 4 км</li> <li>3) 8 км</li> <li>4) 7 км</li> </ol> </li> <li>5. Тренинги прыжков и парашютизм на высоте 4 км, а затем в свободном падении еще 3 км. Найдите модуль перемещения.             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 4 км</li> <li>2) 4 км</li> <li>3) 8 км</li> <li>4) 7 км</li> </ol> </li> </ol>

Повторяемый раздел

Теоретический материал для повторения

Задания для закрепления и систематизации знаний

Номер текущей недели

<b>НЕДЕЛЯ 1. Механика</b>	<p>Основание относительности механического движения (т. е. того, что движение тела можно рассматривать в разных системах отсчета) привело к переформулировке галилеевской системы мира (Галилеи) и галилеевской системы Коперника. Галилеем, следуя наблюдению излучения Солнца и звезд на небосводе, в центре Вселенной расположил неподвижную Землю с вращающимися вокруг нее остальными небесными телами. Коперник же считал, что Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца и одновременно вокруг своих осей.</p> <p>Таким образом, изменение системы отсчета (Земля — в галилеевской системе мира и Солнце — в галилеевской системе) привело к гораздо более прогрессивной галилеевской системе, позволяющей решить многие научные и прикладные задачи астрономии и изменить взгляды человечества на Вселенную.</p> <p><b>Относительная скорость</b></p> <p>Если два тела движутся в одной и той же системе отсчета со скоростями <math>\vec{v}_1</math> и <math>\vec{v}_2</math>, то скорость первого тела относительно второго <math>\vec{v}_{12}</math> равна разности скоростей этих тел:</p> $\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2.$ <p>Так, при движении тел в одном направлении (оба) модуль относительной скорости равен разности скоростей, а при встречном движении — сумме скоростей.</p> <p><b>Закон сложения скоростей</b></p> <p>Закономерности скоростей устанавливают связь между значениями скорости материальной точки относительно различных систем отсчета, движущихся друг относительно друга. В нерелятивистской (классической) физике, когда рассматриваемые скорости малы по сравнению со скоростью света, справедлив закон сложения скоростей Галилея, который выражается формулой:</p> $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{v}, \quad (1.3)$ <p>где <math>\vec{v}_1</math> и <math>\vec{v}_2</math> — скорости тела (точка) относительно двух инерциальных систем отсчета — неподвижной системы отсчета <math>K_0</math> и системы отсчета <math>K</math>, движущейся со скоростью <math>\vec{v}</math> относительно <math>K_0</math>.</p> <p>Формула (1.3) может быть получена путем сложения векторов перемещений.</p> <p>Для наглядности рассмотрим движение лодки со скоростью <math>\vec{v}</math> относительно берега (система отсчета <math>K_0</math>) (рис. 9). Векторы перемещений лодки относительно воды <math>\Delta \vec{r}_L</math>, реки относительно берега <math>\Delta \vec{r}_R</math> и суммарный вектор перемещения лодки относительно берега <math>\Delta \vec{r}_B</math> изображены на рис. 10. Математически:</p> $\Delta \vec{r}_B = \Delta \vec{r}_L + \Delta \vec{r}_R. \quad (1.4)$ <p>Поделив обе части уравнения (1.4) на интервал времени <math>\Delta t</math>, получим:</p> $\frac{\Delta \vec{r}_B}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{r}_L}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{r}_R}{\Delta t}.$ <p>что равносильно уравнению (1.3). В проекциях вектора скорости на оси координат уравнение (1.3) имеет вид:</p> $v_{1x} = v_{2x} + v_x,$ $v_{1y} = v_{2y} + v_y.$	<p><b>Проекция скоростей складываются алгебраически.</b></p>  <p>Рис. 9</p>  <p>Рис. 10</p> <p><b>КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Законим предложения.</li> <li>1. Наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними называется _____.</li> <li>2. Раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил, называется _____.</li> <li>• Запиши математическое выражение для скорости.</li> <li>• Запиши закон сложения скоростей в векторном виде.</li> </ul> <p>Ответы на тестовые задания (неделя 1) 1—1, 2—3, 3—2, 4—4.</p>
---------------------------	--	---

Ответы к заданиям базового уровня сложности текущей недели



# ТРЕНИРОВОЧНЫЙ ТЕСТ № 1

## Часть 1

Ответами к заданиям 1—23 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишите в отдельной клеточке в соответствии с приведёнными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

1. Движущийся бильярдный шар сталкивается с таким же неподвижным шаром. После соударения шары разлетелись так, что направления их скоростей составили угол  $90^\circ$ , при этом импульс одного шара стал равен  $0,3 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ , а другого  $0,4 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . Определите импульс двигавшегося шара до соударения.

Ответ: \_\_\_\_\_  $\text{кг} \cdot \text{м/с}$ .

2. Тело равномерно движется по плоскости. Сила давления тела на плоскость равна  $40 \text{ Н}$ , сила трения  $8 \text{ Н}$ . Определите коэффициент трения скольжения.

Ответ: \_\_\_\_\_.

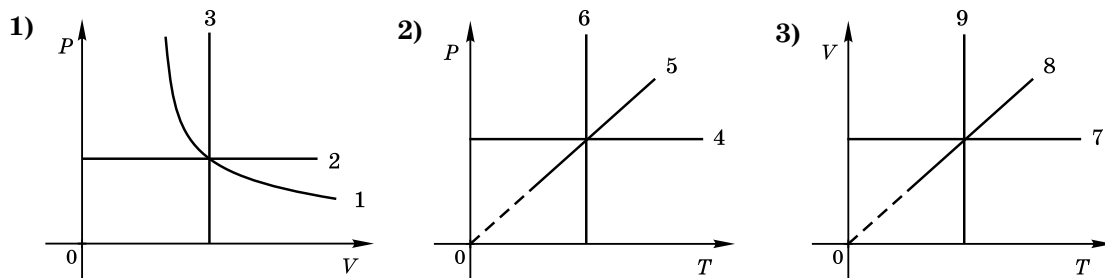
3. В вершинах квадрата расположены четыре электрически заряженные шарика. Величины и знаки зарядов шариков одинаковы. Каждый из шариков создаёт в точке пересечения диагоналей квадрата электрическое поле, напряжённость которого равна  $E$ . Чему равна результирующая напряжённость поля в точке пересечения диагоналей квадрата, создаваемая всеми четырьмя шариками?

Ответ: \_\_\_\_\_.

4. При изменении силы тока в катушке от  $0$  до  $5 \text{ А}$  в течение  $2 \text{ с}$  в ней возникла ЭДС, равная  $1 \text{ В}$ . Чему равна индуктивность катушки?

Ответ: \_\_\_\_\_  $\text{Гн}$ .

5. На рисунках представлены графики (кривые 1–9) изопроцессов в координатах  $p(V)$ ,  $p(T)$ ,  $V(T)$ . Проанализируйте рисунки и выберите два верных утверждения о процессах, представленных графиками 1–9.



- 1) Графики 3, 5, 7 описывают изохорический процесс.
- 2) Изохорический процесс представлен графиками 2, 5, 7.
- 3) Изобару представляют кривые 8, 1, 9.
- 4) Изотермический процесс представлен графиками 4, 1, 9.
- 5) Изобары описаны графиками 2, 4, 5; изотермы — 1, 3, 7; изохоры — 6, 9, 2.
- 6) Изобары описаны графиками 2, 4, 8; изотермы — 1, 6, 9.

Ответ: ☐ ☐

6. Маятниковые часы отстают. Чтобы часы шли точно, необходимо уменьшить период колебаний маятника. Для этого необходимо длину маятника и его массу изменить так:
- 1) увеличить
  - 2) уменьшить
  - 3) не менять, т. к. этот параметр не влияет на период

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Длина маятника	Масса маятника

7. Установите соответствие между названием закона, принципа и т. д. и его математическим выражением. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

#### ЗАКОН, ПРИНЦИП

А) закон всемирного тяготения

Б) принцип относительности Галилея

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ

1)  $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, t = t'$

2)  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

3)  $\vec{F}_A = -\vec{F}_B$

4)  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

5)  $p = mv$

Ответ:

А	Б

8. Температура нагревателя идеальной тепловой машины равна 550 К, а температура холодильника составляет 440 К. Двигатель получил от нагревателя количество теплоты 50 кДж. Определите работу, которую совершило рабочее тело.

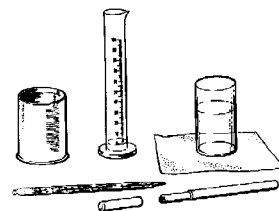
Ответ: \_\_\_\_\_ к Дж.

9. Фотоэффект наблюдают, освещая поверхность металла светом фиксированной частоты. При этом задерживающая разность потенциалов равна  $U$ . После изменения частоты света задерживающая разность потенциалов увеличилась на  $\Delta U = 1,2$  В. На сколько изменилась частота падающего света?

Ответ: \_\_\_\_\_ ТГц.

10. В результате наблюдения за теплообменом между горячей и холодной водой, налитой в калориметр (см. рисунок), ученик составил таблицу.

Масса холодной воды, г	100
Масса горячей воды, г	142
Температура холодной воды, °С	25
Температура горячей воды, °С	80
Температура смеси, °С	56



Какое количество теплоты отдала горячая вода? (Теплообменом с окружающей средой пренебречь.)

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.



11. Электромагнитная волна переходит из среды с показателем преломления  $n_1 = 1,3$  в среду с показателем преломления  $n_2 = 1,5$ . Как при этом изменяются частота, скорость распространения и длина волны? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения. Выберите два верных ответа:  
 1) частота и длина волны увеличились  
 2) длина волны и скорость уменьшились  
 3) частота и скорость не изменилась  
 4) частота не изменилась

Ответ:

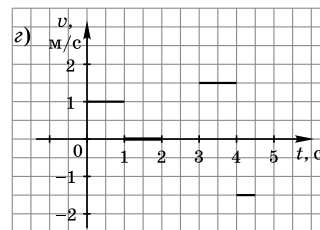
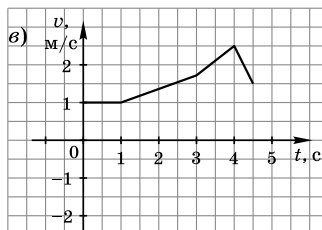
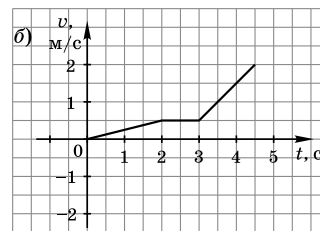
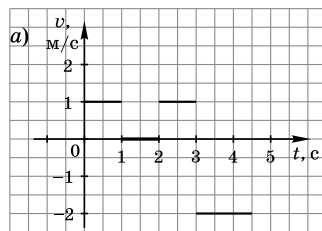
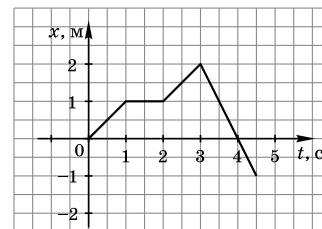
12. Космическая ракета стартует с космодрома. Как изменяются в процессе старта ракеты ее масса, скорость и давление воздуха в ракете? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличивается                      2) уменьшается                      3) изменяется несущественно

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Масса ракеты	Скорость ракеты

13. На рисунке приведен график движения тела  $x(t)$ . Под ним приведены четыре графика зависимостей скорости от времени  $v(t)$ . Какой из этих четырех графиков  $v(t)$  (левый верхний, правый верхний, левый нижний, правый нижний) соответствует графику движения тела  $x(t)$ ? Ответ запишите словами.



Ответ: \_\_\_\_\_.

14. Скорость звука в воде 1450 м/с. На каком расстоянии находятся ближайшие точки, совершающие колебания в противоположных фазах, если частота колебаний 725 Гц?

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

15. Электрон, пройдя разность потенциалов 4,9 В, сталкивается с атомом ртути и переводит его в первое возбуждённое состояние. Чему равна длина волны фотона, соответствующая переходу атома ртути в нормальное состояние?

Ответ: \_\_\_\_\_ нм.

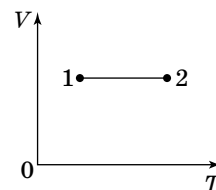
16. В процессе распространения электромагнитной волны в вакууме

- 1) происходит только перенос энергии
- 2) происходит только перенос импульса
- 3) происходит перенос и энергии, и импульса
- 4) происходит перенос импульса
- 5) не происходит переноса ни энергии, ни импульса

Выберите два верных ответа из приведённого выше перечня.

Ответ: ☐ ☐

17. Некий идеальный газ при постоянном давлении был переведён из состояния 1 в состояние 2, как изображено на графике. Как изменится при этом объём, температура и масса газа? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:



- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Объём газа	Масса газа

18. Установите соответствие между проводником и типом свободных носителей в нём. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОВОДНИК

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ

- А) металл  
Б) полупроводник

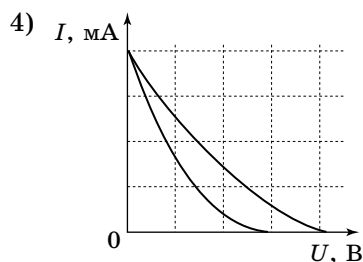
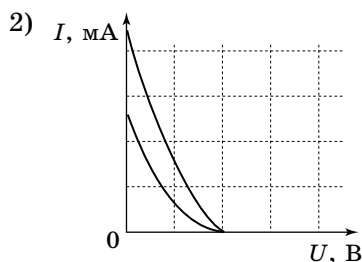
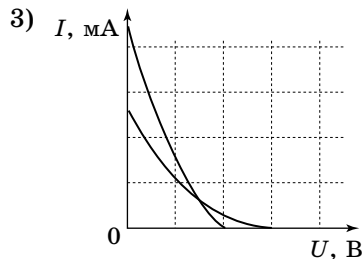
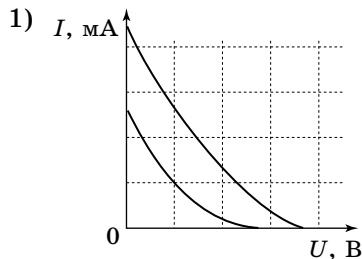
- 1) положительно заряженные ионы
- 2) отрицательно заряженные ионы
- 3) и положительно, и отрицательно заряженные ионы
- 4) электроны и ионы
- 5) дырки
- 6) электроны

Ответ: 

А	Б

19. Во время проведения эксперимента металлическую пластинку фотокатода дважды освещали монохроматическим светом одной и той же частоты, но разной интенсивности. При этом исследовали зависимость фототока от приложенного напряжения между фотокатодом и анодом. Определите рисунок, на котором правильно изображены графики, отражающие результаты этих экспериментов, и, считая цену деления

шкалы абсцисс на этом рисунке равной 1В, определите величину задерживающего напряжения при первом и втором освещениях.



Величина задерживающего напряжения при первом освещении	Величина задерживающего напряжения при втором освещении

20. Определите показатель преломления, если известно, что преломленный луч составляет с отражённым угол  $90^\circ$ , а синус угла падения равен 0,8.

Ответ: \_\_\_\_\_.

21. Конденсатор, входящий в состав колебательного контура, зарядили и отсоединили от источника напряжения. После этого площадь пластин конденсатора увеличили. Как это повлияло на ёмкость конденсатора и частоту электромагнитных колебаний в контуре? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Ёмкость конденсатора	Частота колебаний

22. Для определения времени протекания некоторого процесса его длительность была измерена 5 раз. Получены следующие результаты:

№ измерения	1	2	3	4	5
Длительность процесса, с	5,8	4,9	5,3	4,7	5,1

Запишите время этого процесса с учётом погрешности измерения.

Ответ: ( \_\_\_\_\_  $\pm$  \_\_\_\_\_ ) с.

23. Система, состоящая из нескольких свободных протонов и нейтронов, соединяется в атомное ядро. Выберите два верных утверждения, касающиеся этого процесса.

- 1) Масса образовавшегося ядра будет больше массы системы.
- 2) Масса образовавшегося ядра будет меньше массы системы.
- 3) Процесс происходит с выделением энергии.
- 4) Процесс происходит с поглощением энергии.
- 5) Масса образовавшегося ядра будет равна массе системы.

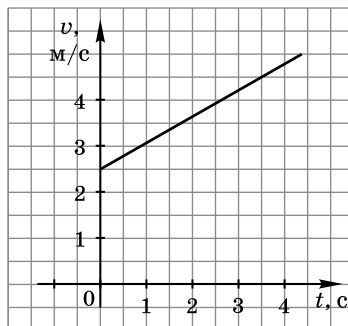
Ответ: 

--	--

## Часть 2

Ответом к заданиям 24—26 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишете в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

24. Пользуясь графиком зависимости скорости от времени, изображённым на рисунке, определите путь, пройденный телом за первые 3 минуты.



Ответ: \_\_\_\_\_ м.

25. Луч лазера направлен перпендикулярно плоскости дифракционной решётки. На удалённом экране (расстояние до экрана  $L \gg 10$  см) образуется дифракционная картина. Расстояние между нулевым и первым дифракционными максимумами на экране равно 10 см. Чему примерно равно расстояние между нулевым и вторым дифракционными максимумами?

Ответ: \_\_\_\_\_ см.

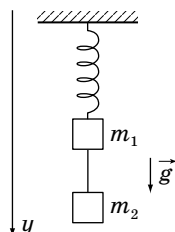
26. Период полураспада ядер радиоактивного изотопа некоего химического элемента равен 25 мин. Через какой период времени распадется  $\frac{3}{4}$  ядер этого элемента?

Ответ: \_\_\_\_\_ мин.

Не забудьте перенести все ответы в бланк ответов № 1 в соответствии с инструкцией по выполнению работы.

Для записи ответов на задания 27—31 используйте БЛАНК ОТВЕТОВ № 2. Запишите сначала номер задания (27, 28 и т. д.), а затем решение соответствующей задачи. Ответы записывайте чётко и разборчиво.

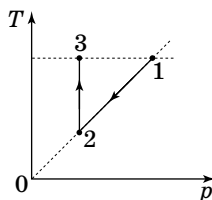
27. К нижнему концу лёгкой пружины подвешены связанные невесомой нитью грузы: верхний массой  $m_1 = 0,4$  кг и нижний массой  $m_2 = 0,1$  кг (см. рис.). Нить, соединяющую грузы, пережигают. Найдите модуль ускорения, с которым начнёт двигаться верхний груз.



Полное правильное решение каждой из задач 28–31 должно содержать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчёты с численным ответом и при необходимости рисунок, поясняющий решение.

28. Шар массой 1 кг, подвешенный на нити длиной 90 см, отводят от положения равновесия на угол  $60^\circ$  и отпускают. В момент прохождения шаром положения равновесия в него попадает пуля массой 10 г, летящая навстречу шару. Она пробивает его и продолжает двигаться горизонтально. Определите изменение скорости пули в результате попадания в шар, если он, продолжая движение в прежнем направлении, отклоняется на угол  $39^\circ$ . (Массу шара считать неизменной, диаметр шара — пренебрежимо малым по сравнению с длиной нити,  $\cos 39^\circ = \frac{7}{9}$ .)

29. 3 моль идеального одноатомного газа охладили, уменьшив давление в 3 раза. Затем газ нагрели до первоначальной температуры 300 К (см. рисунок). Какое количество теплоты сообщено газу на участке 2–3?

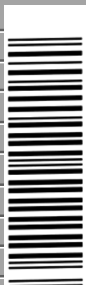


30. Плоская горизонтальная фигура площадью  $S = 0,05$  м<sup>2</sup>, ограниченная проводящим контуром, находится в однородном магнитном поле. Пока проекция магнитной индукции на вертикаль  $z$  равномерно меняется от  $B_{1z} = 3$  Тл до  $B_{2z} = -5$  Тл, по контуру протекает заряд  $\Delta q = 0,04$  Кл. Найдите сопротивление контура.
31. Какова длина волны  $\lambda_k$ , соответствующая красной границе фотоэффекта, если при облучении металлической пластинки светом с длиной волны  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м максимальная скорость выбитых электронов составляет 851 км/с? Ответ округлите до сотен нанометров.



→ Единый государственный экзамен

→ *Бланк ответов №2*



Регион

Код  
предмета

Название предмета

Резерв - 8

Дополнительный  
бланк ответов №2

Лист №

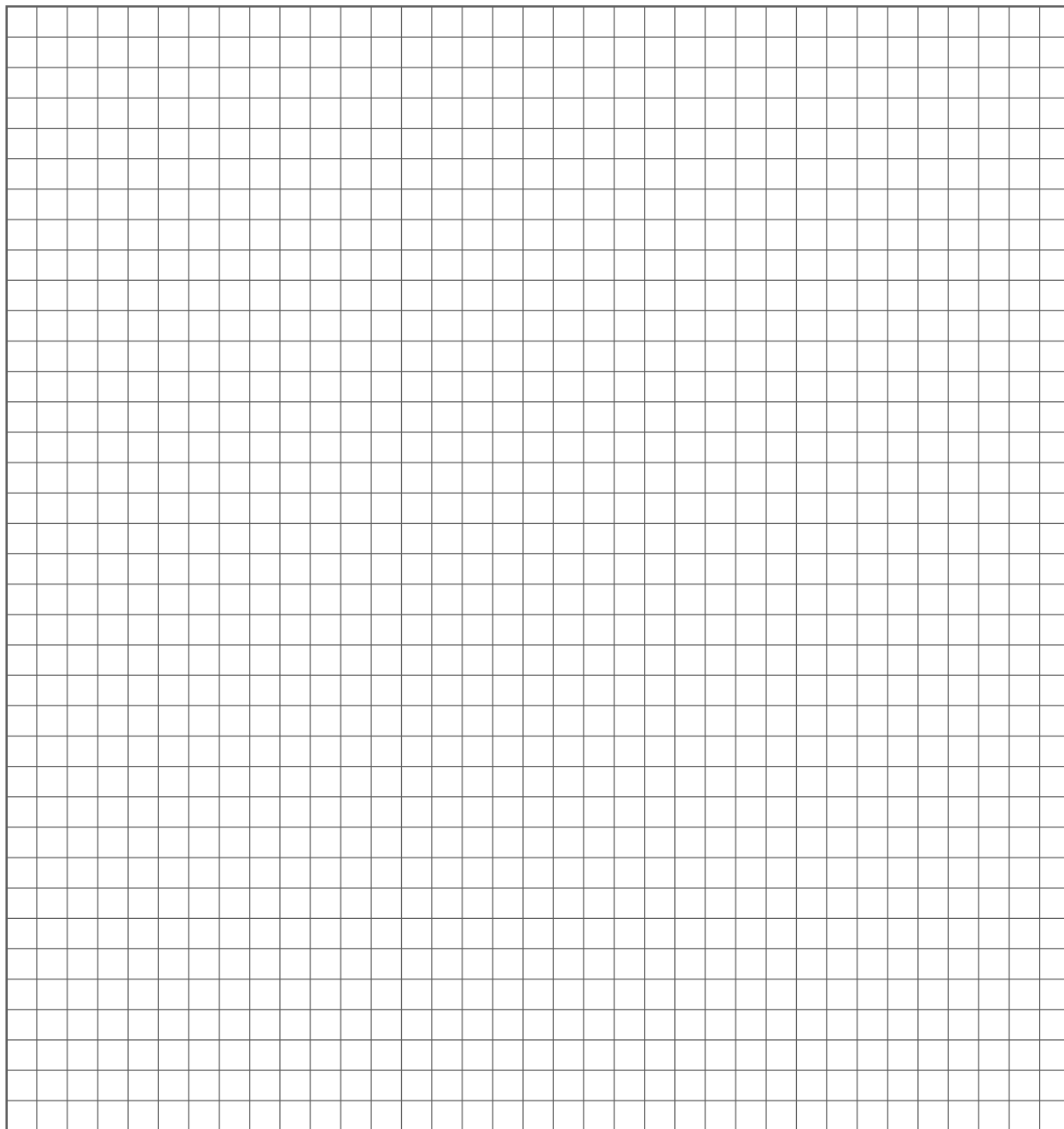
Перепишите значение полей «регион», «код предмета», «название предмета» из БЛАНКА РЕГИСТРАЦИИ.

Отвечая на задание типа С, пишите аккуратно и разборчиво, соблюдая разметку страницы.

Не забудьте указать номер задания, на которое Вы отвечаете, например **С1**.

Условия задания переписывать не нужно.

**ВНИМАНИЕ!** Все бланки и листы с контрольными измерительными материалами рассматриваются в комплекте.



# ОТВЕТЫ К ТРЕНИРОВОЧНОМУ ТЕСТУ № 1

## Часть 1

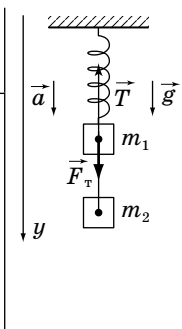
№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
1	0,5	7	31	13	левый верхний	19	22
2	0,2	8	10	14	1	20	1,33
3	0	9	180	15	254	21	12
4	0,4	10	14300	16	34	22	$5,2 \pm 0,3$
5	1,6	11	24	17	32	23	23
6	23	12	21	18	65		

## Часть 2

24. 10,1. 25. 20. 26. 50.

27. Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 0,4 \text{ кг} \\ m_2 &= 01, \text{ кг} \\ a_1 &= ? \end{aligned}$$



Решение:

Согласно II закону Ньютона:  $\vec{F} = m\vec{a}$ ;  $\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{N}$   
или  $\vec{a}_1 m_1 = m_1 \vec{g} + (m_1 + m_2) \vec{g}$  (1)

Проецируем на ось  $y$ :  $a_1 m_1 = m_1 g - (m_1 + m_2)g$  (2)

Отсюда, ускорение направлено вниз и равно по

величине  $a_1 = g \frac{m_2}{m_1}$ ,  $[a_1] = \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \frac{\text{кг}}{\text{кг}} = \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .

$$a_1 = \frac{9,8 \cdot 0,1}{0,4} = 2,5 \left( \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \right).$$

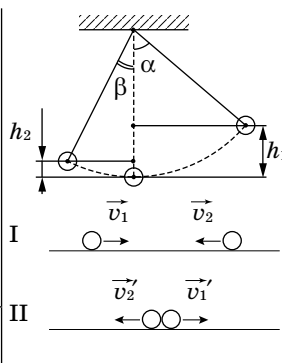
Ответ:  $2,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .

28. Дано:

$$\begin{aligned} M &= 1 \text{ кг} \\ l &= 90 \text{ см} = 0,9 \text{ м} \\ \alpha &= 60^\circ, \cos \alpha = \frac{1}{2} \\ m &= 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг} \\ \beta &= 36^\circ, \\ \cos \beta &= \frac{7}{9} \approx 0,78 \end{aligned}$$

$\Delta v = ?$

Решение:



Согласно закону сохранения импульса:

$$M\vec{u} + m\vec{v}_1 = M\vec{u}' + m\vec{v}_2.$$

$$Mu - mv_1 = Mu' - mv_2;$$

$$M(u - u') = m(v_1 - v_2).$$

Отсюда:  $\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{M}{m}(u' - u).$

$E_{\Pi} = E_{\text{к}}$  — закон сохранения энергии.



$$Mgh_1 = \frac{Mu^2}{2}; \quad h_1 = l(1 - \cos \alpha); \quad u^2 = 2gl(1 - \cos \alpha).$$

Отсюда, скорость шара до столкновения с пулей:  $u = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}$ .

Согласно закону сохранения энергии после столкновения:

$$Mgh_2 = \frac{Mu'^2}{2}. \quad h_2 = l(1 - \cos \beta).$$

Отсюда, скорость шара после столкновения с пулей:  $u' = \sqrt{2gl(1 - \cos \beta)}$ .

$$|\Delta v| = \left| \frac{m}{M} \left\{ \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)} - \sqrt{2gl(1 - \cos \beta)} \right\} \right|.$$

$$|\Delta v| = \left| \frac{1}{0,01} \left\{ \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,9 \left(1 - \frac{1}{2}\right)} - \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,9(1 - 0,78)} \right\} \right| = 100 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Ответ:  $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

29. Дано:

Решение:

$$\nu = 3 \text{ моль}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = 3$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$k = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$Q = ?$$

Первый закон термодинамики:

$$Q = \Delta U + A'.$$

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}; \quad Q_{23} = \frac{3}{2} \nu k \Delta T_{23} + \nu k \Delta T_{23}; \quad A_{23} = \nu k \Delta T_{23}.$$

$$Q_{23} = \frac{3}{2} \nu k \Delta T_{23} + \nu k \Delta T_{23}; \quad Q_{23} = \frac{5}{2} \nu k \Delta T_{23}.$$

$$\text{Так как } T_3 = T_1, \text{ то закон Шарля: } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Отсюда, согласно условию задачи:  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = 3$ . Следовательно:  $T_2 = \frac{T_1}{3}$ .

Подставляем в формулу, получаем:  $Q = \frac{5}{2} \nu k \left( T_1 - \frac{T_1}{3} \right); \quad Q = \frac{5}{2} \nu k T_1$ .

$$[Q] = \frac{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = \text{Дж}. \quad Q = \frac{5}{2} \cdot 3 \cdot 8,31 \cdot 300 = 12\,465 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: 12 465 Дж.

30. Дано:

Решение:

$$S = 0,05 \text{ м}^2$$

$$B_{1z} = 3 \text{ Тл}$$

$$B_{2z} = -5 \text{ Тл}$$

$$\Delta q = 0,04 \text{ Кл}$$

$$R = ?$$

Закон электромагнитной индукции:  $\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|.$

$$\Delta \Phi = \Delta B_z S. \text{ Отсюда: } \varepsilon_i = S \left| \frac{\Delta B_z}{\Delta t} \right|.$$

$$\varepsilon_I = I_i R; \quad I_i = \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad I_i = \frac{S}{R} \left| \frac{\Delta B_z}{\Delta t} \right|; \quad |\Delta q| = I \Delta t = \frac{S}{\Delta q} |B_{2z} - B_{1z}|.$$

$$\text{Отсюда: } R = \frac{S}{\Delta q} |B_{2z} - B_{1z}| \cdot [R] = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{Тл}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

$$R = \frac{0,05(3+5)}{0,04} = 10 \text{ (Ом)}.$$

Ответ: 10 Ом.

31. Дано:

Решение:

$$\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$v = 851 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 851 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda_{\text{кр}} = ?$$

$$\text{Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: } h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - h\nu_{\text{мин}}; \quad \lambda = \frac{c}{\nu}; \quad \nu_{\text{мин}} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}}; \quad A_{\text{вых}} = \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}};$$

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}}; \quad \frac{ch}{\lambda_{\text{кр}}} = h\nu - \frac{mv^2}{2}; \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{\frac{hc}{\lambda} - \frac{mv^2}{2}}.$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 851^2 \cdot 10^6}{2}} = 600 \text{ (нм)}.$$

Ответ: 600 нм.

- 1.1. Кинематика
  - 1.1.1. Механическое движение и его виды
  - 1.1.2. Относительность механического движения
  - 1.1.3. Скорость

## МЕХАНИКА

### КИНЕМАТИКА

**Механика** — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

В механике рассматривают взаимодействия тел, результатом которых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации. Например, притяжение тел по закону всемирного тяготения, взаимное давление соприкасающихся тел, воздействие частиц жидкости или газа друг на друга и на движущиеся или покоящиеся в них тела и т. п.

**Под механическим движением понимают изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей в пространстве:** например, движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движение летательных аппаратов и транспортных средств, машин и механизмов, деформации элементов конструкций и сооружений, движение жидкостей и газов и др.

Механика состоит из следующих разделов:

- 1) механика материальной точки;
- 2) механика абсолютно твёрдого тела;
- 3) механика сплошной среды, в которую, в свою очередь, входят:
  - а) теория упругости;
  - б) теория пластичности;
  - в) гидродинамика;

Каждый из перечисленных разделов состоит из **статики, динамики и кинематики**.

**Кинематика** (в переводе с греч. — «движение») — раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил.

Основные задачи кинематики точки:

1. Описание движений, совершаемых точками по отношению к выбранной *системе отсчёта*, с помощью уравнений, таблиц или графиков. Описать движение точки значит определить положение точки в любой момент времени (или определить так называемые законы движения).
2. Определение кинематических характеристик движения. Кинематическими характеристиками движения точки являются её скорость и ускорение.
3. Изучение сложных (составных) движений и определение зависимости между характеристиками этих движений. Под сложным движением понимают движение тела относительно системы координат, которая сама движется (относительно другой, неподвижной системы координат).

## Система отсчёта

Система координат  $X, Y, Z$ , тело отсчёта, с которым она связана, и прибор для измерения времени (часы) образуют **систему отсчёта**, относительно которой рассматривается движение тела (рис. 1).

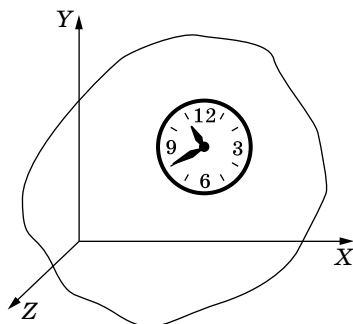


Рис. 1

**Телом отсчёта** называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.

Систему отсчёта можно выбрать произвольно. При кинематических исследованиях все системы отсчёта равноправны. В задачах динамики также можно использовать любые произвольно движущиеся системы отсчёта, но удобнее всего инерциальные системы отсчёта, так как в них характеристики движения имеют более простой вид.

## Поступательное движение

**Поступательное движение** — это движение твёрдого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается параллельно своему начальному направлению.

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые (при наложении совпадающие) траектории и имеют в каждый момент времени одинаковые по модулю и направлению скорости и ускорения.

Поступательное движение может быть как криволинейным, так и прямолинейным. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения. Человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора, также движется поступательно. Для описания его движения (т.е. определения изменения пути и скорости со временем, пути) достаточно рассмотреть движение только одной его точки.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1

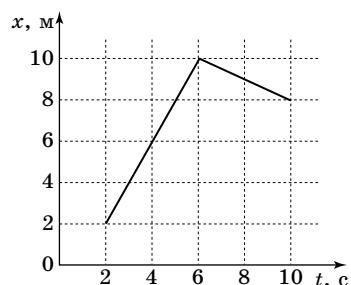
1. В каких из приведённых ниже случаев изучаемое тело можно принять за материальную точку?

- 1) вычисляют время перелёта самолёта из одного города в другой
- 2) измеряют высоту ракеты
- 3) вычисляют давление автомобиля на грунт
- 4) определяют объём стального кубика, пользуясь измерительным цилиндром (мензуркой)

2. Найти путь и модуль перемещения мяча, который упал с высоты 8 м, отскочил от пола и был пойман на высоте 2 м.

- 1) 10 м и 8 м
- 2) 6 м и 10 м
- 3) 10 м и 6 м
- 4) 8 м и 6 м

3. На рисунке показана траектория движения материальной точки. Найти модуль перемещения материальной точки.



- 1) 4 м
- 2) 6 м
- 3) 8 м
- 4) 2 м

4. Турист прошёл в восточном направлении на 4 км, а затем в северном направлении ещё 3 км. Найти модуль перемещения.

- 1) 7 км
- 2) 2 км
- 3) 1 км
- 4) 5 км

Другими словами, изучение поступательного движения твёрдого тела сводится к задаче кинематики точки.

**Материальная точка** — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу.

Понятие «материальная точка» вводится для описания (с помощью математических формул) механического движения тел.

Если реальное тело заменяют материальной точкой, то этой точке приписывают массу этого тела, но пренебрегают его размерами, а заодно пренебрегают различием характеристик движения его точек (скоростей, ускорений и т. д.), если таковое имеется.

## Траектория

**Траектория** — это линия (или, как принято говорить, кривая), которую описывает тело при движении относительно выбранного тела отсчёта.

Говорить о траектории имеет смысл лишь в том случае, когда тело можно представить в виде материальной точки.

Траектории могут иметь разную форму. О форме траектории иногда удаётся судить по видимому следу, который оставляет движущееся тело, например, летящий самолёт или проносящийся в ночном небе метеор.

Форма траектории зависит от выбора тела отсчёта. Например, относительно Земли траектория движения Луны представляет собой окружность, относительно Солнца — линию более сложной формы (рис. 2). При изучении механического движения в качестве тела отсчёта, как правило, рассматривается Земля.

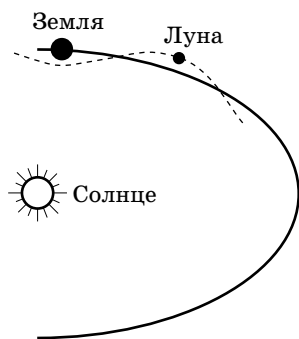


Рис. 2

## Способы задания положения точки и описание её движения

Положение точки в пространстве задаётся двумя способами: 1) с помощью координат; 2) с помощью радиус-вектора.

Положение точки с помощью координат задаётся тремя проекциями точки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  на оси декартовой системы координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , связанные с телом отсчёта (рис. 3). Для этого из точки  $A$  необходимо опустить перпендикуляры на плоскости  $YZ$  (координата  $x$ ),  $XZ$  (координата  $y$ ),  $XY$  (координата  $z$ ) соответственно. Записывается это так:  $A(x, y, z)$ . Для конкретного случая, изображённого на рис. 3 ( $x = 6$ ,  $y = 10$ ,  $z = 4$ ), точка  $A$  обозначается  $A(6; 10; 4,5)$ .

Если точка движется в пределах некоторой плоскости, то через выбранные на теле отсчёта точки достаточно провести две координатные оси:  $OX$  и  $OY$ . Тогда положение точки на плоскости определяют двумя координатами —  $x$  и  $y$  (рис. 4).

Если точка движется вдоль прямой, достаточно задать одну координатную ось  $OX$  и направить её вдоль линии движения.

Задание положения точки  $A$  с помощью радиус-вектора осуществляется соединением точки  $A$  с началом координат  $O$  (рис. 3). Направленный отрезок  $OA = \vec{r}$  называется **радиус-вектором**.

**Радиус-вектор** — это вектор, соединяющий начало отсчёта с положением точки в произвольный момент времени.

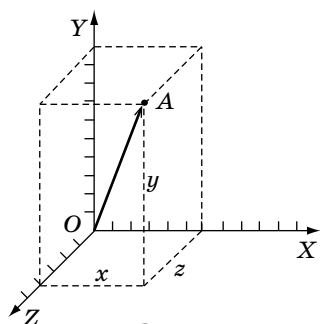


Рис. 3

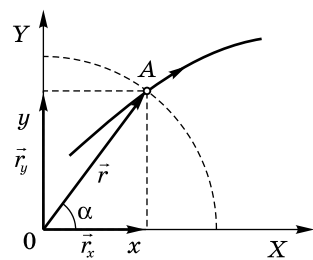


Рис. 4

Точка задана радиус-вектором, если известны его длина (модуль) и направление в пространстве, т. е. значения его проекций  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  на оси координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , либо углы между радиус-вектором и осями координат. Для случая движения на плоскости (рис. 4) имеем:

$$x = r_x = r \cos \alpha, \quad y = r_y = r \sin \alpha.$$

Здесь  $r = |\vec{r}|$  — модуль радиус-вектора  $\vec{r}$ ,  $r_x$  и  $r_y$  — его проекции на оси координат, все три величины — скаляры;  $x$  и  $y$  — координаты точки  $A$ .

Последние уравнения демонстрируют связь между координатным и векторным способами задания положения точки.

Вектор  $\vec{r}$  можно также разложить на составляющие по осям  $X$  и  $Y$ , т. е. представить в виде суммы двух векторов (рис. 4):

$$\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y.$$

Таким образом, положение точки в пространстве задаётся либо её координатами, либо радиус-вектором.

В соответствии со способами задания координат движение точки можно описать: 1) координатным способом; 2) векторным способом.

При координатном способе описания (или задания) движения изменение координат точки со временем записывается в виде функций всех трёх её координат от времени:

$$\begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \tag{1.1}$$

Уравнения (1.1) называют кинематическими уравнениями движения точки, записанными в координатной форме. Зная кинематические уравнения движения и начальные условия (т. е. положение точки в начальный момент времени), можно определить положение точки в любой момент времени.

При векторном способе описания движения точки изменение её положения со временем задаётся зависимостью радиус-вектора от времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \tag{1.2}$$

Уравнение (1.2) представляет собой уравнение движения точки, записанное в векторной форме. Если оно известно, то для любого момента времени можно рассчитать радиус-вектор точки, т. е. определить её положение (как и в случае с координатным способом). Таким образом, задание трёх скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

Для каждого случая движения вид уравнений (1.1) или (1.2) будет вполне определённым. Если траекторией движения точки является прямая линия, движение называется **прямолинейным**, а если кривая — **криволинейным**.

## Перемещение и путь

**Перемещение в механике** — это вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени.

Понятие вектора перемещения вводится для решения задачи кинематики — определить положение тела (точки) в пространстве в данный момент времени, если известно его начальное положение.

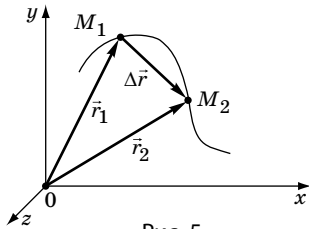


Рис. 5

На рис. 5 вектор  $\overline{M_1M_2}$  соединяет два положения движущейся точки —  $M_1$  и  $M_2$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно и, согласно определению, является вектором перемещения. Если точка  $M_1$  задана радиус-вектором  $\vec{r}_1$ , а точка  $M_2$  — радиус-вектором  $\vec{r}_2$ , то, как видно из рисунка, вектор перемещения равен разности этих двух векторов, т. е. изменению радиус-вектора за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Поскольку путь — это длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени, модуль вектора перемещения в общем случае не равен длине пути, пройденного точкой за время  $\Delta t$  (траектория может быть криволинейной и, кроме того, точка может менять направление движения).

**Модуль вектора перемещения равен пути только при прямолинейном движении в одном направлении.** Если направление прямолинейного движения меняется, модуль вектора перемещения меньше пути.

При криволинейном движении модуль вектора перемещения также меньше пути, т. к. хорда всегда меньше длины дуги, которую она стягивает (рис. 5).

## Скорость

Скорость характеризует быстроту, с которой происходят любые изменения в окружающем нас мире (движение материи в пространстве и времени). Движение пешехода по тротуару, полёт птицы, распространение звука, радиоволн или света в воздухе, вытекание воды из трубы, движение облаков, испарение воды, нагрев утюга — все эти явления характеризуются определённой скоростью.

При механическом движении тел скорость характеризует не только быстроту, но и направление движения, т. е. является векторной величиной.

**Скоростью**  $\vec{v}$  точки называется предел отношения перемещения  $\Delta \vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого это перемещение произошло, при стремлении  $\Delta t$  к нулю:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Определённое таким образом понятие скорости называют также **мгновенной скоростью**. Это определение скорости справедливо для любых видов движения — от криволинейного неравномерного до прямолинейного равномерного. Когда говорят о скорости при неравномерном движении, под ней понимают именно мгновенную скорость. Из этого определения непосредственно вытекает векторный характер скорости, поскольку перемещение — векторная величина. Вектор мгновенной скорости  $\vec{v}$  всегда направлен по касательной к траектории движения. Он указывает направление, по которому происходило бы движение тела, если бы с момента времени  $t$  на него прекратилось действие любых других тел (рис. 6).



Рис. 6

**Средняя скорость** точки вводится для характеристики неравномерного движения (т. е. движения с переменной скоростью) и определяется двояко.

1. Средняя скорость точки  $v_{\text{ср}}$  равна отношению всего пройденного телом пути  $\Delta s$  ко всему времени движения  $\Delta t$ :

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

При таком определении средняя скорость — скаляр, т. к. пройденный путь (расстояние) и время — величины скалярные.

Такой способ определения даёт представление о средней скорости движения на участке траектории (средней путевой скорости).

2. Средняя скорость точки равна отношению перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Средняя скорость перемещения — величина векторная.

Для неравномерного криволинейного движения такое определение средней скорости не всегда позволяет определить даже приблизительно реальные скорости на пути движения точки. Например, если точка двигалась по замкнутой траектории в течение некоторого времени (рис. 7), то перемещение её равно нулю (но скорость явно отличалась от нуля). В этом случае лучше пользоваться первым определением средней скорости.

В любом случае следует различать эти два определения средней скорости и знать, о какой из них идёт речь.

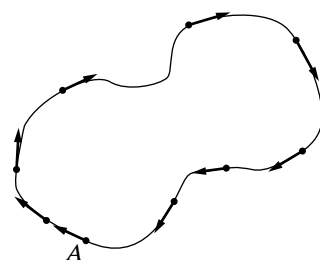


Рис. 7

## Относительность механического движения

**Относительность механического движения заключается в относительности скоростей перемещения тел:** скорости тел относительно разных систем отсчёта будут различны (скорость человека, перемещающегося в поезде, пароходе, самолёте, будет отличаться как по величине, так и по направлению, в зависимости от того, в какой системе отсчёта эти скорости определяются: в системе отсчёта, связанной с движущимся транспортным средством, или с неподвижной Землёй).

Различными будут и траектории движения тела в разных системах отсчёта. Так, например, вертикально падающие на землю капли дождя оставят след в виде косых струй на окне вагона мчащегося поезда. Точно так же любая точка на вращающемся пропеллере летящего самолёта или спускающегося на землю вертолётa описывает окружность относительно самолёта и гораздо более сложную кривую — винтовую линию относительно Земли (рис. 8). Таким образом, **при механическом движении относительной является также и траектория движения.**

Путь, пройденный телом, также зависит от системы отсчёта. Возвращаясь все к тому же пассажиру, сидящему в поезде, мы понимаем, что путь, проделанный им относительно поезда за время поездки, равен нулю (если он не передвигался по вагону) или, во всяком случае, намного меньше того пути, который он преодолел вместе с поездом относительно Земли. Таким образом, **при механическом движении относительным является также и путь.**

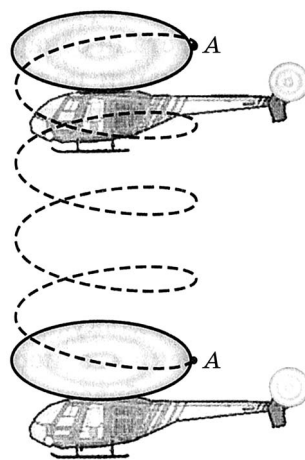


Рис. 8



Осознание относительности механического движения (т.е. того, что движение тела можно рассматривать в разных системах отсчёта) привело к переходу от геоцентрической системы мира Птолемея к гелиоцентрической системе Коперника. Птолемей, следуя наблюдаемому издревле движению Солнца и звезд на небосклоне, в центре Вселенной расположил неподвижную Землю с вращающимися вокруг неё остальными небесными телами. Коперник же считал, что Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца и одновременно вокруг своих осей.

Таким образом, изменение системы отсчёта (Земля — в геоцентрической системе мира и Солнце — в гелиоцентрической) привело к гораздо более прогрессивной гелиоцентрической системе, позволяющей решить многие научные и прикладные задачи астрономии и изменить взгляды человечества на Вселенную.

## Относительная скорость

Если два тела движутся в одной и той же системе отсчёта со скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , то скорость первого тела относительно второго  $\vec{v}_{12}$  равна разности скоростей этих тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2.$$

Так, при движении тел в одном направлении (обгон) модуль относительной скорости равен разности скоростей, а при встречном движении — сумме скоростей.

## Закон сложения скоростей

Закон сложения скоростей устанавливает связь между значениями скорости материальной точки относительно различных систем отсчёта, движущихся друг относительно друга. В нерелятивистской (классической) физике, когда рассматриваемые скорости малы по сравнению со скоростью света, справедлив закон сложения скоростей Галилея, который выражается формулой:

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}, \quad (1.3)$$

где  $\vec{v}_2$  и  $\vec{v}_1$  — скорости тела (точки) относительно двух инерциальных систем отсчёта — неподвижной системы отсчёта  $K_2$  и системы отсчёта  $K_1$ , движущейся со скоростью  $\vec{v}$  относительно  $K_2$ .

Формула (1.3) может быть получена путём сложения векторов перемещений.

Для наглядности рассмотрим движение лодки со скоростью  $\vec{v}_1$  относительно реки (система отсчёта  $K_1$ ), воды которой движутся со скоростью  $\vec{v}$  относительно берега (система отсчёта  $K_2$ ) (рис. 9). Векторы перемещений лодки относительно воды  $\Delta \vec{r}_1$ , реки относительно берега  $\Delta \vec{r}$  и суммарный вектор перемещения лодки относительно берега  $\Delta \vec{r}_2$  изображены на рис. 10. Математически:

$$\Delta \vec{r}_2 = \Delta \vec{r}_1 + \Delta \vec{r}. \quad (1.4)$$

Поделив обе части уравнения (1.4) на интервал времени  $\Delta t$ , получим:

$$\frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t},$$

что равносильно уравнению (1.3). В проекциях вектора скорости на оси координат уравнение (1.3) имеет вид:

$$\begin{aligned} v_{2x} &= v_{1x} + v_x, \\ v_{2y} &= v_{1y} + v_y. \end{aligned}$$



# НЕДЕЛЯ 2

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 1.1. Кинематика
- 1.1.4. Ускорение
- 1.1.5. Равномерное движение
- 1.1.6. Прямолинейное равноускоренное движение
- 1.1.7. Свободное падение (ускорение свободного падения)
- 1.1.8. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.
- Центростремительное ускорение

## Равномерное движение

Движение точки называется **равномерным**, если за любые равные промежутки времени она проходит равные пути. Например, если автомобиль за каждую четверть часа (15 мин) проходит 20 км, за каждые полчаса (30 мин) — 40 км, за каждый час (60 мин) — 80 км и т. д., то такое движение считается равномерным.

При равномерном движении численная величина (модуль) скорости точки  $v$  — величина постоянная:

$$v = |\vec{v}| = \text{const}.$$

Равномерное движение может происходить как по криволинейной, так и по прямолинейной траектории. Закон равномерного движения точки описывается уравнением:

$$s = s_0 + vt, \quad (1.5)$$

где  $s$  — расстояние, измеренное вдоль дуги траектории, от некоторой точки на траектории, принятой за начало отсчёта;  $t$  — время точки в пути;  $s_0$  — значение  $s$  в начальный момент времени  $t = 0$ .

Путь, пройденный точкой за время  $t$ , в (1.5) определяется слагаемым  $vt$ .

**Равномерное прямолинейное движение** — это движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью:

$$\vec{v} = \text{const}.$$

Скорость равномерного прямолинейного движения — величина постоянная и может быть определена как отношение перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Модуль этой скорости

$$v = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$$

по смыслу есть расстояние  $s = |\Delta \vec{r}|$ , пройденное точкой за время  $\Delta t$ .

**Скорость** тела при равномерном прямолинейном движении — это величина, равная отношению пути  $s$  ко времени, за которое этот путь пройден:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Перемещение при прямолинейном равномерном движении (по оси  $X$ ) можно рассчитать по формуле:

$$\Delta x = v_x t,$$

где  $v_x$  — проекция скорости на ось  $X$ . Отсюда закон прямолинейного равномерного движения имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t.$$

Если в начальный момент времени  $x_0 = 0$ , то

$$x = v_x t.$$

**График зависимости скорости от времени** — прямая, параллельная оси абсцисс, а пройденный путь — это площадь под этой прямой (рис. 11). График зависимости пути от времени — прямая линия, угол наклона которой к оси времени  $Ot$  тем больше, чем больше скорость равномерного движения. Тангенс этого угла равен скорости (рис. 12).

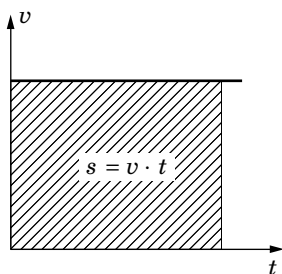


Рис. 11

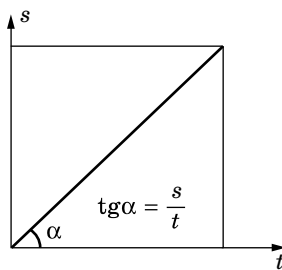


Рис. 12

## Ускорение

**Ускорение** — величина, характеризующая быстроту изменения скорости. Как правило, движение является неравномерным, т. е. происходит с переменной скоростью. На одних участках траектории тела могут иметь большую скорость, на других — меньшую. Например, поезд, отходящий от станции, со временем двигается всё быстрее и быстрее. Подъезжая к станции, он, наоборот, замедляет своё движение.

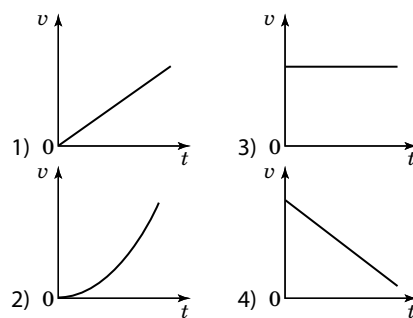
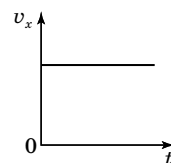
**Ускорение (или мгновенное ускорение)** — векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Ускорение, как и изменение скорости, направлено в сторону вогнутости траектории и может быть разложено на две составляющие — **тангенциальную** —

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Материальная точка движется вдоль оси  $Ox$ . На рисунке представлен график зависимости проекции скорости этой материальной точки на ось  $Ox$  от времени. Какой из приведённых ниже графиков соответствует зависимости координаты материальной точки от времени?



2. За какое время поезд, отправляясь от станции с ускорением  $0,4 \text{ м/с}^2$ , пройдёт путь  $0,5 \text{ км}$ ?
- 1) 20 с                      3) 40 с  
2) 30 с                      4) 50 с
3. Какую скорость развивает поезд за 20 с после начала движения, если его ускорение  $a = 5 \text{ м/с}^2$ ?
- 1) 150 м/с                  3) 50 м/с  
2) 10 м/с                  4) 100 м/с
4. Тело свободно падает без начальной скорости. Какое расстояние оно пролетит за 4 с?
- 1) 40 м                      3) 20 м  
2) 80 м                      4) 100 м
5. С какой скоростью движется автомобиль по выпуклому мосту радиусом 40 м, если центростремительное ускорение равняется ускорению свободного падения?
- 1) 20 м/с                      3) 30 м/с  
2) 10 м/с                      4) 40 м/с

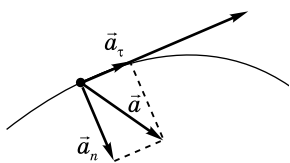


Рис. 13

по касательной к траектории движения — и **нормальную** — перпендикулярно траектории (рис. 13). В соответствии с этим проекцию ускорения  $a_t$  на касательную к траектории называют **касательным**, или **тангенциальным ускорением**, проекцию  $a_n$  на нормаль — **нормальным**, или **центростремительным ускорением**.

Касательное ускорение определяет величину изменения численного значения скорости:

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Нормальное, или центростремительное, ускорение характеризует изменение направления скорости и определяется по формуле:

$$a_n = \frac{v^2}{R},$$

где  $R$  — радиус кривизны траектории в соответствующей её точке. Вывод этой формулы приведён в 1.4.

Модуль ускорения определяется по формуле:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}.$$

При прямолинейном движении полное ускорение  $a$  равно тангенциальному  $a = a_t$ , т. к. центростремительное  $a_n = 0$ .

Единицей ускорения в СИ является такое ускорение, при котором за каждую секунду скорость тела изменяется на 1 м/с. Эту единицу обозначают 1 м/с<sup>2</sup> и называют «метр на секунду в квадрате».

## Прямолинейное равноускоренное движение

**Равнопеременное движение точки** — это движение с постоянным ускорением.

Под словом «равнопеременное» понимают:

- 1) равноускоренное движение — если модуль скорости увеличивается, т. е. ускорение параллельно скорости:

$$\vec{a} \uparrow \vec{v};$$

- 2) равнозамедленное движение — когда модуль скорости уменьшается, т. е. ускорение антипараллельно скорости:  $\vec{a} \downarrow \vec{v}$ .

Поскольку ускорение равнопеременного движения постоянно, оно равно изменению скорости за любой конечный интервал времени:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}.$$

Если спроектировать ускорение и скорость на направление движения, это уравнение будет выглядеть так:

$$a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v - v_0}{t}, \quad (1.6)$$

где  $v_0$  — скорость в начальный момент времени, принятый за нуль;  $v$  — текущее значение скорости (в момент времени  $t$ ). Формула для определения ускорения из состояния покоя (равноускоренное движение, начальная скорость равна нулю:  $v_0 = 0$ ) имеет вид:

$$a = \frac{v}{t}.$$

Если же нулю равна не начальная, а конечная скорость ( $v = 0$ , равнозамедленное движение), то формула ускорения принимает вид:

$$a = -\frac{v_0}{t}.$$

Из формулы (1.6) находим выражение для скорости:

$$v = v_0 + at.$$

**Графики скорости при равноускоренном движении** имеют вид прямых линий, наклон которых показывает, как быстро меняется скорость с течением времени. На рис. 14 приведены графики для модуля скорости с ненулевой начальной скоростью для равноускоренного (II) и равнозамедленного (I) движений.

Путь при прямолинейном равнопеременном движении определяют через выражение для средней скорости, которая равна полусумме начальной и конечной скоростей. После соответствующих преобразований получим:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Путь при прямолинейном равноускоренном движении совпадает с проекцией вектора перемещения на направление движения, поэтому координаты тела определяются по формуле:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.7)$$

В формуле (1.7) начало координат не совпадает с началом пути ( $x_0 \neq 0$ ). В векторной форме:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

График зависимости координаты от времени прямолинейного равноускоренного движения представлен на рис. 15.

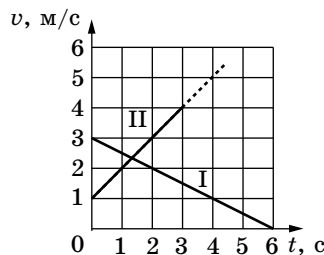


Рис. 14

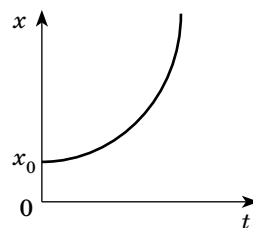


Рис. 15

## Свободное падение

**Свободным падением** называется движение тела, обусловленное притяжением Земли, при отсутствии начальной скорости и сопротивления среды.

Свободно падающее тело движется поступательно, прямолинейно и равноускоренно. Ускорение, с которым движется тело, называется **ускорением свободного падения** и обозначается буквой  $g$ . Формулы, описывающие движение свободно падающего тела, не содержат коэффициентов, зависящих от его формы и массы.

Другими словами, тела разной массы, которые мы уронили с одной высоты, достигнут поверхности земли за одно и то же время. Кажущееся несовпадение последнего утверждения с нашим каждодневным опытом (например, все знают, что пушинка будет падать гораздо дольше, чем стальной

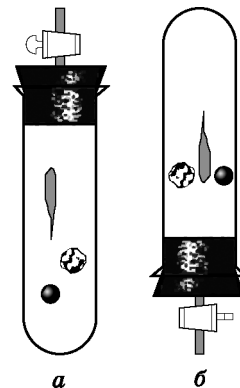


Рис. 16

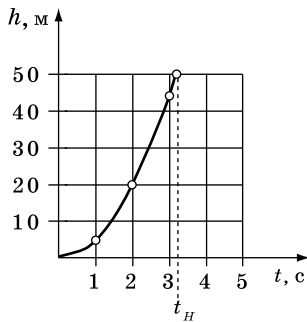


Рис. 17

шарик) связано с сопротивлением воздуха, т. е. с дополнительной силой, направленной вверх, следовательно, такое падение не является свободным. В этом можно убедиться на следующем опыте, впервые проведённом Ньютоном. Если взять пробирку длиной 1 м и опустить в неё одновременно свинцовый шарик, птичье перо и пробку, то все три предмета упадут на дно трубки в разное время: сначала шарик, затем пробка, последним — перо (рис. 16, а). Если теперь из пробирки откачать воздух и перевернуть её вверх дном, можно увидеть, что все три предмета достигнут дна одновременно (рис. 16, б).

Впервые независимость ускорения свободного падения от массы тела опытным путём установил Галилей в конце XVI в. Для этого он одновременно ронял шары одинакового размера, но разные по весу (чугунный и деревянный), с Пизанской башни. Оба шара достигали земли практически одновременно.

Свободное падение тел является примером прямолинейного равноускоренного движения. Для определения высоты тела над землей  $h$  при свободном падении можно воспользоваться уравнением (1.7) при следующих начальных условиях:  $h_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ ,  $a = g$ , что означает следующее: ось  $h$  направлена вниз, начало её помещено в точку, в которой тело выронили (рис. 17):

$$h = \frac{gt^2}{2}. \quad (1.8)$$

График зависимости высоты от времени является параболой. Используя формулу (1.8) и выражение для скорости:  $v = v_0 + at$  (при  $v_0 = 0$ ,  $a = g$ ), легко показать, что скорость связана с высотой соотношением:

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (1.9)$$

Формулы (1.8) и (1.9) справедливы для любого прямолинейного движения с постоянным ускорением и нулевой начальной скоростью, а не только для свободного падения.

### Тело, брошенное под углом к горизонту

Тело, брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , будет двигаться по криволинейной траектории, в любой точке которой вектор скорости может быть разложен на две составляющие — горизонтальную и вертикальную (рис. 18).

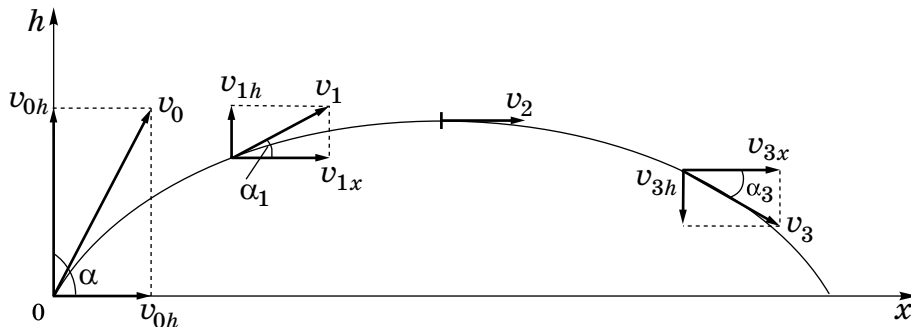


Рис. 18

Проекции этих векторов на оси координат, начало которых выбрано в точке бросания, равны:

$$\begin{aligned}v_x &= v_0 \cos \alpha, \\v_h &= v_0 \sin \alpha.\end{aligned}\tag{1.10}$$

При этом горизонтальная составляющая скорости не будет меняться с течением времени, т. к. ускорение свободного падения не имеет горизонтальной составляющей, а направлено вертикально вниз. Вертикальная составляющая скорости будет меняться по закону равнопеременного движения с ускорением  $a = g$ . Изменение координат тела согласно уравнению (1.7) имеет вид:

$$x = v_0 t \cos \alpha,\tag{1.11}$$

$$h = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.\tag{1.12}$$

В уравнении (1.12) учтено, что ускорение силы тяжести направлено вниз (знак «-» перед вторым членом). Последняя пара уравнений позволяет найти уравнение траектории движения точки, которое представляет собой зависимость одной координаты от другой. Для этого из уравнений (1.11) и (1.12) исключим время и после простых преобразований получим:

$$h = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x^2.$$

Если ввести обозначения  $\operatorname{tg} \alpha = c$  и  $\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = b$ , последнее уравнение примет вид:

$$y = bx^2 + cx,$$

что является уравнением параболы с осью, параллельной вертикальной оси.

Таким образом, **траектория тела, брошенного под углом к горизонту, представляет собой параболу**. В вершине этой параболы вертикальная составляющая скорости равна нулю. В точке падения скорость тела равна по абсолютной величине скорости тела в точке бросания, а направление её составляет тот же угол, что и в точке бросания (взятый с противоположным знаком). Это следует из симметрии параболы и имеет место в отсутствие сопротивления воздуха.

Траектория тела, брошенного горизонтально, также представляет собой параболу: тело будет двигаться по одной из ветвей параболы с вершиной в точке бросания (рис. 18).

## Равномерное движение точки по окружности

Наряду с равномерным прямолинейным движением очень часто приходится встречаться с равномерным движением по окружности. Такое движение могут совершать точки вращающихся колес, валов и роторов турбин, искусственные спутники, обращающиеся по круговым орбитам, и т. д. При равномерном движении по окружности численное значение скорости остаётся постоянным. Однако направление скорости при таком движении непрерывно изменяется.

**В каждой точке круговой траектории скорость точки направлена по касательной к траектории в этой точке.** В этом нетрудно убедиться, коснувшись вращающегося точильного камня, имеющего форму диска, стальным резцом: раскалённые частицы камня, имеющие в момент отрыва от него определённую скорость, будут отлетать от диска по касательной к нему. Эта скорость называется **линейной скоростью вращения**.

Равномерное движение по окружности характеризуют периодом и частотой обращения.

**Период обращения** — это время, за которое совершается один оборот.



Известно, что при равномерном движении время определяется делением пройденного пути, т. е. длины окружности —  $l_{\text{окр}}$ , на скорость движения. Таким образом,

$$T = \frac{l_{\text{окр}}}{v} = \frac{2\pi r}{v}. \quad (1.13)$$

Величина, обратная периоду, называется частотой обращения и обозначается буквой  $\nu$ :

$$\nu = 1/T. \quad (1.14)$$

## Центростремительное ускорение

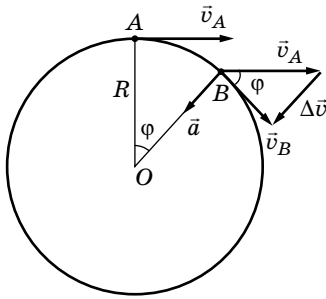


Рис. 19

Из-за непрерывного изменения направления скорости тело, движущееся по окружности, обладает ускорением. Это ускорение характеризует не быстроту изменения численного значения скорости (которое в данном случае не меняется), а быстроту изменения её направления.

При равномерном движении по окружности ускорение тела всё время направлено к её центру и называется **центростремительным ускорением**. Чтобы найти его значение, рассмотрим отношение изменения вектора скорости  $\Delta v$  к малому интервалу времени  $\Delta t$ , за который это изменение произошло (рис. 19).

В силу малости угла  $\phi$  имеем:

$$\Delta v = v\phi. \quad (1.15)$$

Так как угол  $\phi$  между векторами скорости в точках A и B равен углу AOB между радиусами, который, в свою очередь, равен отношению длины дуги AB к радиусу R, получим:

$$\phi = \frac{v\Delta t}{R}. \quad (1.16)$$

Из (1.15) и (1.16) получим выражение для модуля вектора ускорения  $a$ :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.17)$$

Из формул (1.13), (1.14) и (1.17) следует, что  $a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$  и  $a = 4\pi^2 R\nu^2$ .

## Вращательное движение твёрдого тела. Угловая скорость

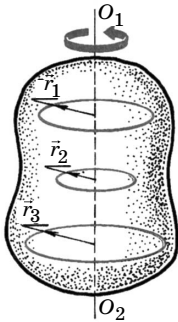


Рис. 20

Вращательное движение абсолютно твёрдого тела вокруг неподвижной оси — один из самых простых (после поступательного) видов движения. Оно характеризуется углом поворота точек тела вокруг оси  $O_1O_2$ , жёстко связанной с телом (рис. 20). Угол поворота  $\phi$  отсчитывается между двумя лучами, выходящими из одной точки на оси  $O_1O_2$  и перпендикулярными ей: один из лучей (OX) неподвижен, другой (OA) жёстко связан с телом (рис. 21).

При вращении тела вокруг неподвижной оси все его точки поворачиваются на одинаковый угол, но описывают окружности разных радиусов в зависимости от степени удалённости точки тела от оси вращения.

Равномерное вращение твёрдого тела или точки его окружности характеризуется постоянной угловой скоростью.

Угловой скоростью тела  $\omega$  называется отношение угла поворота к интервалу времени, в течение которого этот поворот совершён:

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t}.$$

Угловая скорость выражается в радианах в секунду (рад/с).

Угловая скорость связана с периодом  $T$  и частотой  $\nu$  вращения следующим соотношением:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

При равномерном вращении, если известна угловая скорость в начальный момент времени  $t_0 = 0$ , можно определить угол поворота тела за время  $t$  и тем самым положение точки тела:

$$\varphi = \omega t.$$

При ненулевом значении угла поворота  $\varphi_0$  в начальный момент времени ( $t = 0$ ) закон вращательного движения описывается уравнением:

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

Связь между линейной  $v$  и угловой  $\omega$  скоростями и центростремительным ускорением  $a$  определяется соотношениями:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu; \quad v = \omega R; \quad a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

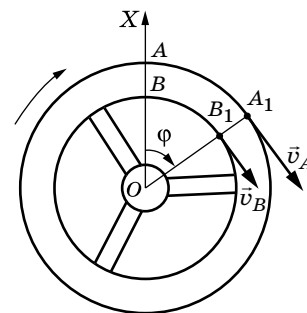


Рис. 21

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните пропуски в формулах для равномерного движения.

$$x = x_0 + \underline{\hspace{1cm}} t; \quad v = \underline{\hspace{1cm}} + at.$$

♦ Заполните пропуски в формулах для равноускоренного движения.

$$s = \underline{\hspace{1cm}} t + \frac{at^2}{2}; \quad v = \underline{\hspace{1cm}} t.$$

♦ Запишите формулу для модуля вектора центростремительного ускорения при равномерном движении тела для окружности.

$$a = \underline{\hspace{1cm}}.$$

Ответы на тестовые задания (неделя 2)

1 — 1. 2 — 4. 3 — 4. 4 — 2. 5 — 1.

# НЕДЕЛЯ 3

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 1.2. Динамика
  - 1.2.1. Инерциальные системы отсчёта. Первый закон Ньютона
  - 1.2.2. Принцип относительности Галилея
  - 1.2.3. Масса тела. Плотность вещества
  - 1.2.4. Сила
  - 1.2.5. Принцип суперпозиции сил
  - 1.2.6. Второй закон Ньютона
  - 1.2.7. Третий закон Ньютона

## ДИНАМИКА

**Динамика** (в переводе с греч. — «сила») — раздел механики, посвящённый изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним сил.

Движения любых материальных тел (кроме микрочастиц), происходящие со скоростями, не близкими к скорости света, изучаются в так называемой классической динамике.

Классическая динамика базируется на трёх основных законах, называемых законами Ньютона. К основным законам относят ещё **закон независимости действия сил**, согласно которому при одновременном действии на материальную точку нескольких сил каждая из них сообщает точке такое же ускорение, какое она сообщила бы, если бы действовала одна.

Следствиями названных законов являются все уравнения и теоремы динамики.

### Первый закон Ньютона

**Любое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.**

Так был сформулирован Ньютоном в 1687 г. первый закон механики, или **закон инерции**.

Суть закона инерции впервые была изложена в одной из книг итальянского учёного Галилео Галилея, опубликованной в начале XVII в.

Ньютон обобщил выводы Галилея, сформулировав закон инерции, и включил его в качестве первого из трёх законов в основу механики. Поэтому данный закон называют первым законом Ньютона.

Однако со временем выяснилось, что первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчёта, а только в инерциальных. Поэтому с точки зрения современных представлений первый закон Ньютона формулируется так:

**Существуют системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых свободные тела движутся прямолинейно и равномерно.**

Под **свободным телом** здесь понимают тело, на которое не оказывают воздействие другие тела.

Следует помнить, что в первом законе Ньютона речь идёт о телах, которые могут рассматриваться как материальные точки.

## Инерциальные системы отсчёта

**Инерциальная система отсчёта** — это система отсчёта, в которой справедлив закон инерции: материальная точка, когда на неё не действуют никакие силы (или действуют силы, взаимно уравновешенные), находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

Любая система отсчёта, движущаяся по отношению к инерциальной системе отсчёта поступательно, равномерно и прямолинейно, также является инерциальной системой отсчёта, т. е. в ней выполняется первый закон Ньютона.

Следовательно, инерциальных систем отсчёта может быть сколь угодно много.

Система отсчёта, движущаяся с ускорением по отношению к инерциальной системе отсчёта, неинерциальна и закон инерции в ней не выполняется.

Сказанное подтверждается опытом, изображённым на рис. 22. Сначала тележка движется прямолинейно и равномерно относительно земли (рис. 22, а). На ней находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Силы, действующие на каждый шарик по вертикали, уравновешены, по горизонтали никакие силы на шарики не действуют (силой сопротивления воздуха в данном случае можно пренебречь).

Шарики будут находиться в покое относительно тележки при любой скорости её движения ( $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  и т. д.) относительно земли — главное, чтобы эта скорость была постоянна.

Но когда тележка попадает на песчаную насыпь (рис. 22, б), её скорость быстро уменьшается, в результате чего тележка останавливается. Во время торможения тележки оба шарика приходят в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

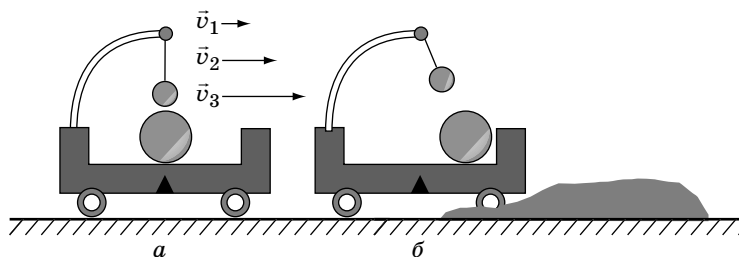


Рис. 22

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Мяч массой 2 кг толкнул находящийся в покое шарик. Во время взаимодействия ускорение шарика было по модулю в 4 раза больше ускорения мяча. Какова масса шарика?

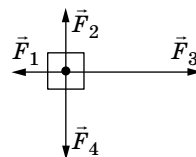
- 12 кг
- 8 кг
- 2 кг
- 0,5 кг

- Найти массу бруска размером  $4 \times 5 \times 6$  см, если его плотность  $7000 \text{ кг/м}^3$ .

- 8,4 г
- 84 г
- 840 г
- 8400 г

- Найти равнодействующую всех сил, если модули этих сил  $F_1 = 10 \text{ Н}$ ,  $F_2 = 14 \text{ Н}$ ,  $F_3 = 50 \text{ Н}$ ,  $F_4 = 44 \text{ Н}$ .

- 40 Н
- 50 Н
- 20 Н
- 10 Н



- Найти равнодействующую трёх сил по 100 Н каждая, если углы между первой и второй силами и между второй и третьей силами равны  $60^\circ$ .

- 200 Н
- 300 Н
- 400 Н
- 100 Н

- Тело массой 100 кг движется прямолинейно, и его координата изменяется по закону  $x = 20 - 10t + t^2$ . Найти силу, которая действует на тело.

- 300 Н
- 150 Н
- 200 Н
- 100 Н

- Какую скорость приобрел мяч массой 0,2 кг за время 0,2 с, если сила удара равна 100 Н?

- 100 м/с
- 200 м/с
- 400 м/с
- 300 м/с

Здесь первой (условно неподвижной) системой отсчёта является земля. Второй системой отсчёта, движущейся относительно первой, является тележка. Пока тележка двигалась прямолинейно и равномерно, шарики находились в состоянии покоя относительно тележки, т. е. закон инерции выполнялся. Как только тележка начала тормозить, т. е. начала двигаться с ускорением относительно первой инерциальной системы отсчёта (земли), закон инерции перестал выполняться.

Если относительно какой-нибудь системы отсчёта тело движется с ускорением, не вызванным действием на него других тел, то такую систему называют **неинерциальной**.

В неинерциальных системах отсчёта основное положение механики о том, что ускорение тела вызывается воздействием на него других тел, не выполняется.

Следует отметить, что невозможно найти строго инерциальную систему отсчёта. Реальная система отсчёта всегда связывается с каким-нибудь конкретным телом (землёй, корпусом корабля или самолёта и т. п.), по отношению к которому и изучается движение различных объектов. Поскольку все реальные тела движутся с тем или иным ускорением, любая реальная система отсчёта может рассматриваться как инерциальная лишь приближенно.

С очень высокой степенью точности инерциальной можно считать гелиоцентрическую систему, связанную с центром Солнца и с координатными осями, направленными на три далёкие звезды. Эта система используется в задачах небесной механики и космонавтики. Для решения большинства технических задач инерциальной системой отсчёта можно считать любую систему, жёстко связанную с землёй (или с любым телом, которое покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно поверхности земли).

## Принцип относительности Галилея

Принцип относительности Галилея гласит:

**Во всех инерциальных системах отсчёта законы механики имеют одинаковый вид.**

Это означает, что уравнения, выражающие законы механики, не меняются (инвариантны) при преобразованиях Галилея.

**Преобразования Галилея** заключаются в преобразовании координат  $\vec{r}(x, y, z)$  и времени  $t$  движущейся материальной точки при переходе от одной инерциальной системы отсчёта (ИСО) к другой:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, \quad t = t'. \quad (1.18)$$

Для координаты  $x$ , например, это означает:

$$x = x' + vt, \quad t = t',$$

где  $v$  — относительная скорость (постоянная) движения двух ИСО,  $\vec{r}$  и  $\vec{r}'$  — радиус-векторы, а  $x$  и  $x'$  — координаты точки в этих двух ИСО. Согласно преобразованию Галилея (1.18), время не изменяется при переходе из одной ИСО в другую: принцип относительности Галилея основан на представлениях об абсолютном времени и абсолютном пространстве, что означает одинаковость (одновременность) протекания событий во всех ИСО. Преобразования координат в (1.18) легко понять, если в некоторый момент времени  $t_0$ , принятый за начальный  $t_0 = 0$ , одну из систем координат  $K(XYZ)$  — неподвижную — совместить с другой —  $K'(X'Y'Z')$  — подвижной — и зафиксировать систему  $K$  (рис. 23). Тогда в любой последующий момент времени положение некоторой точки  $A$ , движущейся относительно обеих систем координат, определяется в системе  $K$  радиус-вектором

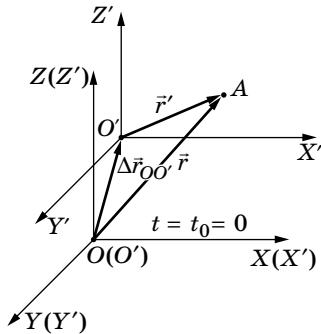


Рис. 23

$\vec{r}$ , а в системе  $K'$  — радиус-вектором  $\vec{r}'$ . Вектор, соединяющий начала координат  $O$  неподвижной и  $O'$  подвижной систем координат, равен вектору перемещения системы  $K'$  относительно  $K$ :  $\overrightarrow{OO'} = \Delta\vec{r}_{OO'}$ . Согласно правилу сложения векторов

$$\vec{r} = \vec{r}' + \Delta\vec{r}_{OO'}.$$

Однако вектор перемещения можно выразить через скорость движения системы  $K'$  относительно  $K$ :  $\Delta\vec{r}_{OO'} = \vec{v}t$ . Поэтому

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t,$$

что совпадает с (1.18).

Из уравнения (1.18) вытекает закон сложения скоростей:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v},$$

где  $u$  и  $u'$  — скорости точки относительно систем  $K$  и  $K'$  соответственно.

Принцип относительности Галилея означает, что никакими механическими опытами нельзя обнаружить движение одной инерциальной системы координат относительно другой. Именно поэтому, находясь в салоне сверхзвукового самолёта, пассажиры могут спокойно передвигаться, не чувствуя его скорости.

Не нужно, однако, думать, что выполнение принципа относительности означает полную тождественность движения одного и того же тела относительно разных инерциальных систем координат. Тождественны лишь законы движения. Характер же движения определяется начальными условиями (начальными скоростями и координатами тела), которые различны в разных системах отсчёта.

Так, камень, выпущенный из рук в движущемся вагоне поезда, будет падать вертикально лишь относительно стен вагона, а для наблюдателя, находящегося на платформе, он будет двигаться по параболе. Объясняется это тем, что начальные скорости разные: относительно стен вагона начальная скорость равна нулю, а относительно земли она равна скорости движения вагона.

## Взаимодействие

**Взаимодействие в физике** — это воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению их движения.

На сегодняшний день физике известны **четыре типа фундаментальных взаимодействий, существующих в природе** (в порядке возрастания интенсивности): **гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия**.

Фундаментальными называются взаимодействия, которые нельзя свести к другим типам взаимодействий (см. табл. 1). Под **радиусом действия** понимают максимальное расстояние между частицами, за пределами которого их взаимодействием можно пренебречь.

Таблица 1

Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Взаимодействующие частицы	Радиус действия, м	Относительная интенсивность
Гравитационное	Все	$\infty$	1
Слабое	Все, кроме фотона	$10^{-17}$	$10^{32}$
Электромагнитное	Заряженные частицы	$\infty$	$10^{36}$
Сильное	Адроны	$10^{-15}$	$10^{38}$

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуется **силой**. Более общей характеристикой взаимодействия является потенциальная энергия.

## Масса тела

**Масса тела** — это фундаментальная физическая величина, характеризующая его инерционные и гравитационные свойства.

Инерционные (или инертные) свойства массы в ньютоновой механике (т.е. при скоростях, существенно меньших скорости света) характеризуются соотношениями между массой  $m$ , импульсом  $p$  тела, силой  $F$ , действующей на тело, и его ускорением:

$$\begin{aligned} p &= mv, \\ \Delta p / \Delta t &= F, \\ F &= ma. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Чем больше масса тела, тем более оно инертно. Сравнивать массы тел можно по ускорениям, которые приобретают тела при взаимодействии друг с другом. При этом во сколько раз ускорение одного тела в результате взаимодействия с другим больше (меньше), во столько раз масса первого тела меньше (больше) массы второго.

Чем меньше меняется скорость тела при взаимодействии, тем оно более инертно и тем его масса больше. И наоборот, чем больше меняется скорость тела при взаимодействии, тем оно менее инертно и тем его масса меньше.

**Гравитационная масса.** Согласно теории гравитации Ньютона, масса является источником силы всемирного тяготения  $F_T$ :

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.20)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  — массы двух тел,  $r$  — расстояние между ними,  $G$  — гравитационная постоянная.

Из формул (1.19) и (1.20) следует, что ускорение, с которым одно тело падает на другое, — ускорение свободного падения — не зависит от массы падающего тела, а также от других его характеристик (объёма, плотности и т. д.). Это было проверено многократными экспериментами в поле тяжести Земли и Солнца и подтвердилось с точностью до  $10^{-8}$  и  $10^{-12}$  соответственно. Эта закономерность называется **равенством инертной и гравитационной масс**. Следует понимать, что речь идёт на самом деле об одной и той же массе — физической величине, являющейся источником двух физических явлений — инерции и гравитации.

**Масса** — мера количества вещества. В классической физике масса служит также мерой количества вещества, содержащегося в теле. Здесь справедливы закон сохранения массы (вещества) и закон аддитивности: масса изолированной системы тел не меняется со временем и равна сумме масс тел, её составляющих.

За единицу массы в СИ принят **килограмм** (1 кг).

## Плотность вещества

**Плотностью вещества** называют физическую величину, показывающую, чему равна масса в единице объёма этого вещества.

Масса любого тела зависит не только от его размеров, но и от того, из какого вещества это тело состоит. Тела, изготовленные из разных веществ, при одинаковых объёмах имеют разные массы. Например, железо объёмом  $1 \text{ м}^3$  имеет массу  $7800 \text{ кг}$ , а свинец того же объёма —  $13\,000 \text{ кг}$ .

Обозначим буквами:  $m$  — массу,  $V$  — объём тела,  $\rho$  — плотность тела.

Тогда формулу для вычисления плотности можно записать в следующем виде:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Единицей плотности в СИ является килограмм на кубический метр ( $\text{кг/м}^3$ ). На практике плотность вещества выражают также в граммах на кубический сантиметр ( $\text{г/см}^3$ ).

Плотность одного и того же вещества в твёрдом, жидком и газообразном состоянии различна. Например, плотность воды равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ , льда —  $900 \text{ кг/м}^3$ , а водяного пара (при  $0^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении) —  $0,59 \text{ кг/м}^3$ .

## Сила. Принцип суперпозиции сил

**Сила в механике** — это величина, являющаяся мерой взаимодействия тел.

При механическом движении проявляются следующие виды сил: **силы упругости, силы трения и гравитационные силы (всемирного тяготения).**

Проявлением действия силы является изменение ускорения тела.

Сила, как и скорость, — векторная величина, т. е. имеет не только численное значение, но и направление. Сила обычно обозначается буквой  $\vec{F}$ , модуль силы — буквой  $F$  (без стрелки). Прямая, вдоль которой направлена сила, называется **линией действия силы**. Когда говорят о силе, важно указать, к какой точке тела приложена действующая на него сила. Если речь идёт об абсолютно твёрдом (недеформируемом) теле, то можно считать, что сила приложена к любой точке на линии её действия.

Итак, результат действия силы на тело зависит от её модуля, направления и точки приложения.

Иначе говоря, сила — векторная величина, характеризующаяся численным значением, направлением в пространстве и точкой приложения.

Обычно на любое движущееся тело действует не одна, а сразу несколько сил. Так, например, на парашютиста, спускающегося на землю, действуют сила тяжести и сила сопротивления воздуха. На тело, висящее на пружине, действуют две силы: сила тяжести и сила упругости пружины.

В каждом подобном случае несколько сил, приложенных к телу, можно заменить одной суммарной силой  $\vec{F}$ , равноценной по своему действию этим силам. Сила, производящая на тело такое же действие, как несколько одновременно действующих сил, называется **равнодействующей этих сил**:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

В этом состоит **принцип суперпозиции (наложения) сил**.

Равнодействующая сила, действующая на частицу со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми каждое из этих тел действует на частицу.

Для нахождения равнодействующей силы пользуются правилами сложения векторов (поскольку сила — векторная величина), в частности, сложение двух сил производится по правилу параллелограмма.



О двух силах, равных по величине и направленных вдоль одной прямой в противоположные стороны, говорят, что они уравнивают, или компенсируют друг друга. Равнодействующая  $F$  таких сил всегда равна нулю и потому изменить скорость тела не может.

Для изменения скорости тела относительно земли необходимо, чтобы равнодействующая всех приложенных к телу сил была отлична от нуля. В том случае, когда тело движется в направлении равнодействующей силы, его скорость возрастает; при движении в противоположном направлении скорость тела убывает. Таким образом, направление скорости не всегда совпадает с направлением действующей силы  $F$ , а вот изменение направления скорости (а следовательно, и направление ускорения) всегда совпадает с направлением действующей силы.

## Второй закон Ньютона

Второй закон Ньютона формулируется так:

**Ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей всех сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе. Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей всех сил.**

Следует помнить, что во втором законе Ньютона, так же как и в первом, под телом подразумевается материальная точка, движение которой рассматривается в инерциальной системе отсчёта.

Математически второй закон Ньютона выражается формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

В скалярном виде второй закон можно записать:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F_x}{m}, \\ a &= \frac{F}{m}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Отсюда можно вывести два следствия:

1. Чем больше сила, приложенная к телу, тем больше его ускорение, и следовательно, тем быстрее изменяется скорость движения этого тела.
2. Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно получает в результате действия данной силы и потому тем медленнее изменяет свою скорость.

На основании второго закона Ньютона вводится единица силы в СИ — **ньютон (Н)**. Из формулы (1.21) следует:

$$F = am. \quad (1.22)$$

Один ньютон (1 Н) — это сила, с которой нужно действовать на тело массой в 1 кг, чтобы сообщить ему ускорение в 1 м/с<sup>2</sup>.

Эта единица названа в честь великого английского учёного Исаака Ньютона (1642–1727). На практике применяются также килоньютоны и миллиньютоны:

$$1 \text{ кН} = 1000 \text{ Н}, \quad 1 \text{ мН} = 0,001 \text{ Н}.$$

Подставив в формулу (1.22) значения ускорения и массы с их размерностями из приведённого определения, выразим размерность силы в 1 Н через основные единицы СИ:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

Второй закон Ньютона иногда называют **основным законом динамики**. После его открытия стало возможным решать такие задачи о движении тел, которые до Ньютона казались неразрешимыми. Многие казавшиеся ранее непонятными явления теперь были объяснены на основе открытых законов физики.

### Третий закон Ньютона

В своём первом законе Ньютон описал движение тела, не подверженного действию других тел. В этом случае тело либо сохраняет своё состояние покоя, либо движется равномерно и прямолинейно (относительно **инерциальной системы отсчёта**).

Во втором законе Ньютона речь идёт о прямо противоположной ситуации. Теперь на данное тело действуют внешние тела, причём их количество может быть произвольным. Под действием окружающих тел рассматриваемое тело начинает двигаться с ускорением, причём произведение массы данного тела на его ускорение оказывается равным действующей силе.

Сформулировав эти два закона, Ньютон обратился к анализу ситуации, когда во взаимодействии участвуют только два тела. Допустим, имеются два тела *A* и *B*, которые притягивают друг друга с силами  $F$  и  $F'$ . Может ли одна из этих сил быть больше другой? Размышление над этой проблемой привело Ньютона к выводу, что такого быть не может: силы взаимодействия двух тел всегда равны друг другу.

Следует помнить, что силы, о которых говорится в законе Ньютона, никогда не уравнивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам (рис. 24). Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравнивают друг друга в том случае, если они приложены к одному телу. Тогда их равнодействующая равна нулю, и тело при этом находится в равновесии, т. е. либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

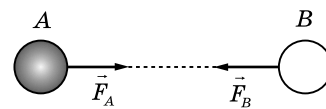


Рис. 24

Опыты подтверждают вывод Ньютона. Если, например, взять две тележки и на одной из них закрепить магнит, а на другой кусок железа, а затем соединить их с динамометрами, то мы увидим, что показания этих приборов совпадут (рис. 25). Это означает, что сила, с которой магнит притягивает к себе железо, равна по величине силе, с которой железо притягивает к себе магнит. Эти силы равны по абсолютной величине и противоположны по направлению: сила притяжения к магниту направлена влево, а сила притяжения к железу — вправо.

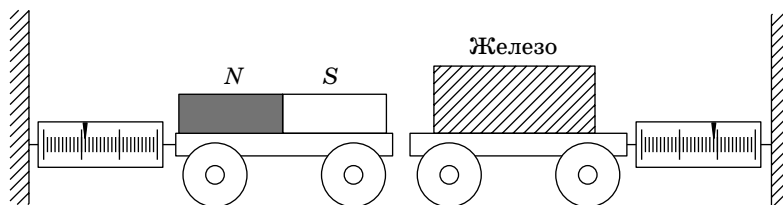


Рис. 25

Итак, третий закон Ньютона на более привычном для нас языке может быть сформулирован так:

**Силы, с которыми взаимодействуют любые два тела, всегда равны по величине и противоположны по направлению.**

Математически он записывается в следующем виде:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в противоположные стороны. Используя второй закон Ньютона, можно записать:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Таким образом, отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел определяется исключительно их массами (чем меньше масса тела, тем большее ускорение оно приобретает) и не зависит от природы сил взаимодействия.

Третий закон Ньютона обосновывает введение самого термина «взаимодействие»: если одно тело действует на другое, то второе также действует на первое. Другими словами, не может быть такого, чтобы одно тело на другое действовало, а второе на первое — нет.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

### ♦ Закончите предложения.

1. Физическая величина, характеризующая инерционные и гравитационные свойства тела, называется \_\_\_\_\_.

2. Физическая величина, равная массе вещества в единице данного объёма, называется \_\_\_\_\_.

### ♦ Запишите формулу для вычисления плотности.

$$\rho = \text{---}.$$

### ♦ Заполните схему.

Типы фундаментальных взаимодействий	

♦ Напишите математическое выражение второго закона Ньютона.

[illegible]

♦ Напишите математическое выражение третьего закона Ньютона.

[illegible]

♦ Напишите математическое выражение принципа суперпозиции сил.

### Ответы на тестовые задания (неделя 3)

**1 — 4. 2 — 3. 3 — 2. 4 — 1. 5 — 3. 6 — 1.**

- 1
- 2
- 3**
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36

# НЕДЕЛЯ 4

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 1.2. Динамика
- 1.2.8. Закон всемирного тяготения. Искусственные спутники Земли
- 1.2.9. Сила тяжести
- 1.2.10. Вес и невесомость

## Закон всемирного тяготения

**Закон всемирного тяготения (закон тяготения Ньютона)** был открыт великим английским учёным Исааком Ньютоном в конце 60-х годов XVII века и опубликован в 1687 г. Он гласит:

**Сила гравитационного притяжения двух тел с массами  $m_1$  и  $m_2$  прямо пропорциональна массе каждого из тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними.**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $G$  — гравитационная постоянная. Значение гравитационной постоянной было определено экспериментально в 1798 г. английским физиком Г. Кавендишем и составляет  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$ . **Гравитацией** (от лат. *gravitas* — тяжесть) называется притяжение всех тел во Вселенной друг к другу.

Закон всемирного тяготения имеет всеобъемлющий характер. Притяжение существует не только между Землёй и телами, находящимися на ней. Все тела притягиваются друг к другу. Притягиваются между собой Земля и Луна. Притяжение Земли к Луне вызывает приливы и отливы воды. Огромные массы воды поднимаются в океанах и морях дважды в сутки на много метров. Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, притягиваясь друг к другу.

Необходимо помнить, что закон тяготения как всеобщий закон справедлив для материальных точек, и силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль линии, соединяющей эти точки. Такие силы называются центральными.

При расчётах силы тяготения между двумя телами под расстоянием  $r$  между ними имеется в виду расстояние между центрами тяжести этих тел. Это особенно важно в том случае, когда размеры тел сопоставимы с расстоянием между ними (тогда форма тела имеет значение). Как показывают расчёты, точные значения силы тяжести можно определить в следующих случаях:

- 1) размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними;
- 2) имеются два однородных шара (произвольного размера);
- 3) форма одного из тел — шар, а его размеры и масса намного больше, чем у второго тела (произвольной формы), которое находится вблизи поверхности первого.

Благодаря последнему случаю можно рассчитать силу притяжения к Земле любого предмета, находящегося на ней.

## Сила тяжести

Сила, с которой Земля притягивает к себе тело, находящееся вблизи её поверхности, называется **силой тяжести**.

Сила тяжести всегда направлена вертикально вниз, к центру Земли. Обозначается она обычно латинской буквой  $F$  со значком «т» (тяжесть) внизу —  $F_t$ . Сила тяжести приложена к центру тяжести тела.

Центр тяжести тела произвольной формы находят так: подвешивают тело на нити за разные его точки. Точка пересечения всех направлений, отмеченных нитью, и будет центром тяжести тела. Для тел правильной формы центр тяжести находится в центре симметрии тела, и точка эта не обязательно принадлежит телу (например, центр симметрии кольца).

Сила тяжести для тела, находящегося вблизи поверхности Земли, равна:

$$F_t = G \frac{M_3 m}{R_3^2},$$

где  $M_3$  — масса Земли,  $m$  — масса тела,  $R_3$  — радиус Земли.

Согласно второму закону Ньютона, сила тяжести может быть определена как произведение массы тела на ускорение, которое в данном случае называется ускорением свободного падения  $g$ :

$$F_t = mg.$$

Сопоставляя две последние формулы, получим выражение для ускорения свободного падения:

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Таким образом, ускорение, с которым тело падает на землю, — ускорение свободного падения — не зависит от массы тела, а также от других его характеристик (объёма, плотности и т. д.).

Вблизи поверхности Земли оно составляет  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

Земной шар немного сплюснут у полюсов, поэтому тела, находящиеся около полюсов, расположены немного ближе к центру Земли. В связи с этим сила тяжести на полюсе немного больше, чем на экваторе и других широтах (на экваторе  $g = 9,78 \text{ м/с}^2$ , на Северном полюсе  $g = 9,832 \text{ м/с}^2$ ).

Вокруг Солнца движутся девять больших планет. Все они удерживаются около Солнца силами тяготения. Эти силы очень велики. Например, между Солнцем и Землёй действует сила тяготения, равная примерно  $3 \cdot 10^{22} \text{ Н}$ .

Вокруг многих планет движутся их спутники, которые также удерживаются вблизи планет силами тяготения. Спутник нашей Земли — Луна — самое близкое к нам небесное тело. Расстояние между Землёй и Лунной равно в среднем  $380\,000 \text{ км}$ . Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Телу необходимо сообщить первую космическую скорость, чтобы оно
  - стало спутником Солнца
  - двигалось вокруг Земли по круговой орбите
  - покинуло Солнечную систему
  - достигло других планет Солнечной системы
- Две материальные точки массой  $100 \text{ кг}$  каждая притягиваются с силой, равной  $0,01 \text{ Н}$ . Найти расстояние между ними.
  - $8,4 \text{ мм}$
  - $8,6 \text{ мм}$
  - $8,2 \text{ мм}$
  - $8,8 \text{ мм}$
- Вес тела меньше, чем сила тяжести, когда
  - ускорение тела направлено вниз
  - тело равномерно движется вниз
  - тело равномерно движется вверх
  - ускорение тела направлено вверх
- В кабине лифта стоит человек массой  $60 \text{ кг}$ . Каким будет его вес, если кабина лифта опускается вниз с ускорением  $0,3 \text{ м/с}^2$ ?
  - $550 \text{ Н}$
  - $570 \text{ Н}$
  - $600 \text{ Н}$
  - $620 \text{ Н}$
- С какой скоростью автобус должен проходить середину выпуклого моста радиусом  $10 \text{ м}$ , чтобы пассажиры на мгновение оказались в состоянии невесомости?
  - $0 \text{ м/с}$
  - $2 \text{ м/с}$
  - $5 \text{ м/с}$
  - $10 \text{ м/с}$

===== ДЛЯ ЗАМЕТОК =====

Чем меньше масса планеты, тем с меньшей силой она притягивает к себе тела. Сила тяжести на поверхности любой планеты рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{т}} = mg = GMm/R^2,$$

где  $m$  — масса тела,  $g$  — ускорение свободного падения на данной планете,  $M$  — масса планеты,  $R$  — радиус планеты,  $G$  — гравитационная постоянная.

## Вес

**Вес** — это сила, с которой любое тело вследствие притяжения Земли действует на опору или подвес.

Вес тела — векторная физическая величина, его обозначают буквой  $P$ . Вес покоящегося, а также равномерно и прямолинейно движущегося (относительно земли) тела по своему численному значению равен действующей на него силе тяжести:

$$P = F_{\text{т}} = mg,$$

где  $m$  — масса,  $g$  — ускорение свободного падения.

Вес и сила тяжести приложены к разным телам, а именно: вес приложен к опоре или подвесу, а сила тяжести — к телу (рис. 26).

Вес и сила тяжести имеют разную физическую природу. Сила тяжести возникает вследствие взаимодействия тела и Земли. Вес тела возникает в результате взаимодействия тела и опоры (подвеса). Опора (подвес) и тело при этом деформируются, что приводит к появлению силы упругости. Из третьего закона Ньютона следует, что вес тела, т. е. сила, с которой тело давит на опору (или растягивает подвес), совпадает по величине с силой, действующей со стороны опоры на данное тело. Сила, с которой опора давит на находящееся на ней тело, называется **силой реакции опоры**. Обозначив силу реакции опоры через  $N$ , мы можем записать (см. рис. 26):

$$P = N.$$

Полученная формула является более общей, чем  $P = mg$ , так как она остаётся справедливой и в том случае, когда тело вместе с опорой совершает ускоренное движение.

Вес тела не следует путать с его массой. Масса тела является скалярной величиной и измеряется в килограммах, а вес тела (как и любая другая сила) — векторная величина и измеряется в ньютонах.

Поскольку вес тела пропорционален ускорению свободного падения, которое различно на различных широтах, то вес тела зависит от географической широты и высоты местности (на полюсах вес несколько больше, чем на экваторе).

Вес можно измерять с помощью пружинных весов (динамометра).

## Невесомость и перегрузка

Состояние невесомости — это состояние, в котором находится материальное тело, свободно движущееся в поле тяготения Земли (или другого небесного тела) под действием только сил тяготения. Отличительной особенностью такого состояния является отсутствие давления как на всё тело в целом, так и на отдельные его части.

Рассмотрим условие достижения невесомости.

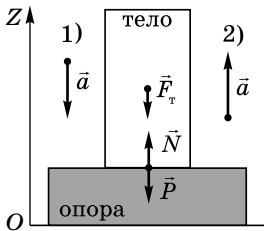


Рис. 26

Если опора движется вместе с телом с ускорением  $a$ , направление которого совпадает с направлением ускорения свободного падения (рис. 26, случай 1), то вес тела (определяемый из векторного уравнения  $\vec{N} + \vec{F}_T = m\vec{a}$ ) в проекции на вертикальную ось  $OZ$ , направленную вверх, равен:

$$P = N = m(g - a).$$

Когда  $g = a$ ,  $P = 0$ , наступает невесомость.

При движении тела и опоры в направлении, противоположном направлению свободного падения (рис. 26, случай 2), получим:

$$P = N = m(g + a).$$

В этом случае наступает перегрузка — вес тела увеличивается.

## Космические скорости

**Первая космическая скорость** — это скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, т. е. двигалось вокруг неё с постоянной скоростью по круговой орбите под действием силы тяжести.

Скорость эта определяется с учётом скорости равномерного движения по окружности и закона всемирного тяготения.

Центростремительное ускорение  $a$  тела, равномерно движущегося по окружности, равно:

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (1.23)$$

где  $v$  — скорость вращения,  $r$  — радиус окружности.

Поскольку в данном случае  $a$  равно  $g$  — ускорению свободного падения (т.к. тело движется в поле тяжести Земли), то, подставляя в (1.23) вместо  $a$  выражение для  $g = GM/r^2$ , получим:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{r}} = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}.$$

Здесь  $G$  — гравитационная постоянная,  $M_3$  — масса Земли,  $R_3$  — радиус Земли,  $h$  — высота тела над поверхностью Земли. Это и есть формула **круговой скорости спутника Земли**. С такой скоростью движется спутник Земли по круговой орбите на высоте  $h$  от поверхности Земли.

Пренебрегая  $h$  по сравнению с  $R$ , получим:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}.$$

Это формула для расчёта первой космической скорости при запуске спутника, т. е. той горизонтальной скорости, которую необходимо сообщить телу вблизи поверхности Земли, чтобы оно стало её спутником. Запуск искусственного спутника осуществляется с помощью ракеты-носителя, которая поднимает тело спутника на высоту порядка 300 км (это та высота, на которой уже почти не сказывается сопротивление атмосферы) и придаёт

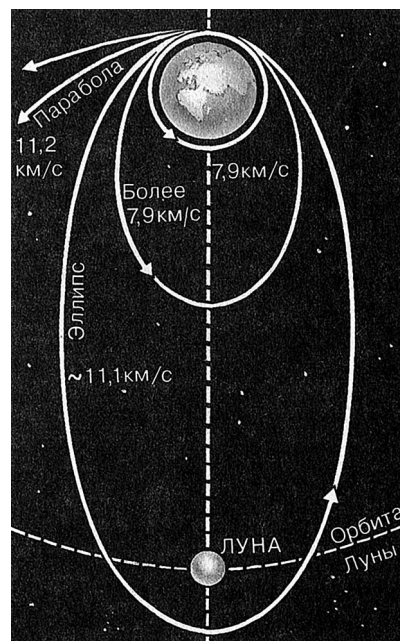


Рис. 27



**Вторая космическая (параболическая) скорость** — это скорость, которую надо придать телу у поверхности Земли, чтобы оно её покинуло, двигаясь по параболической траектории. Эта скорость в  $\sqrt{2}$  раза больше первой космической:  $v_{II} = \sqrt{2} \cdot v_I = 11,2$  км/с. При второй космической скорости тело покидает Землю, но остаётся в пределах Солнечной системы. Оно становится спутником Солнца.

**Третья космическая скорость** — это та наименьшая скорость, при которой тело, начиная движение вблизи поверхности Земли, покидает сначала Землю, а затем преодолевает притяжение Солнца, покидая Солнечную систему. Она равна  $v_{III} = 16,7$  км/с.

◆ Закончите предложения.

1. Закон всемирного тяготения гласит: \_\_\_\_\_

2. Сила, с которой любое тело действует на опору или подвес вследствие притяжения Земли, называется

3. Скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называется

4. Скорость, которую надо придать телу у поверхности Земли, чтобы оно её покинуло, двигаясь по параболической траектории, называется

5. Скорость, при которой тело, начиная движение вблизи поверхности Земли, покидает сначала Землю, а затем преодолевает притяжение Солнца, покидая Солнечную систему, называется

♦ Запишите математическую формулу расчёта силы тяжести на поверхности планеты.

A large grid of graph paper, consisting of 20 columns and 10 rows of squares, intended for drawing a picture.

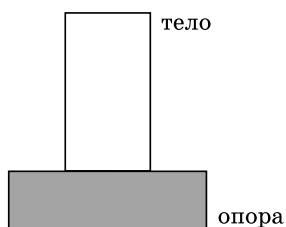
- ♦ Заполните пропуски в формуле для силы притяжения двух тел.

$$F = G \frac{M_3}{r^2}$$

- ♦ Запишите выражение для силы тяжести согласно второму закону Ньютона.

[illegible]

- ♦ Нарисуйте действие силы тяжести.



## Ответы на тестовые задания (неделя 4)

**1 — 2. 2 — 3. 3 — 1. 4 — 2. 5 — 4.**

- 1
- 2
- 3
- 4**
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36

## Сила упругости

Упругость — свойство тел изменять форму и размеры (деформироваться) под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать первоначальные форму и размеры при прекращении внешних воздействий.

**Деформацией** (от лат. *deformatio* — искажение) называют любое изменение размеров и формы тела.

В твёрдых телах бывают деформации **растяжения, сжатия, сдвига, изгиба, кручения**. В жидкостях и газах возможны только деформации **объёмного сжатия и растяжения**, т. к. эти среды не обладают упругостью формы, а только объёма.

Деформация называется **упругой**, если она возникает и исчезает одновременно с внешним воздействием.

Деформация, которая не исчезает после прекращения внешнего воздействия, называется **пластической**.

Сила, возникающая в теле в результате его деформации и стремящаяся вернуть тело в исходное положение, называется **силой упругости**.

Сила упругости возникает и при растяжении (например, если подвесить гирю на нить), и при изгибе, и при других видах деформации.

Возникновение силы упругости можно понять из следующего опыта. На рис. 28, *а* изображена ненагруженная пружина. Если на неё сверху поместить гирю, то под действием силы тяжести гиря начнёт двигаться вниз, сжимая пружину, т. е. деформируя её, но через некоторое время остановится (рис. 28, *б*). Так как тело (гиря) неподвижно, значит, силы, действующие на него, уравновешены, т. е. сила тяжести уравновешена силой, действующей на гирю со стороны сжатой пружины. Это и есть сила упругости.

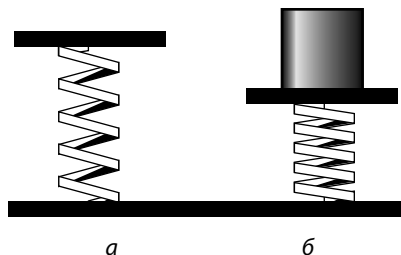


Рис. 28

Если на опору поместить достаточно легкий предмет, то её деформация может оказаться столь незначительной, что изменение формы опоры будет незаметным. Но деформация всё равно будет иметь место, а вместе с ней будет действовать и сила упругости, препятствующая падению тел, находящихся на данной опоре. В случае, когда деформация тела

незаметна и изменением размеров опоры можно пренебречь, силу упругости называют **силой реакции опоры**.

Силы упругости возникают всегда при попытке изменить форму или объём твёрдого тела, при изменении объёма жидкости или газа.

В отличие от сил тяготения, которые действуют между телами всегда, силы упругости возникают в теле лишь при определённом условии: тело должно быть деформировано.

## Закон Гука

Закон Гука — основной закон теории упругости. Он был открыт английским учёным Робертом Гуком в 1660 г., когда ему было 25 лет. Закон Гука гласит:

**Сила упругости, возникающая при упругой деформации растяжения или сжатия тела, пропорциональна абсолютному значению изменения длины тела.**

Если удлинение тела обозначить через  $x$ , а силу упругости через  $F_{\text{упр}}$ , то закон Гука можно записать в виде следующей математической формулы:

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, называемый **жёсткостью** тела. Знак минус перед правой частью уравнения указывает на противоположные направления силы упругости и удлинения  $x$ . Единицей жёсткости в СИ является ньютон на метр (1 Н/м).

У каждого тела своя жёсткость. Чем больше жёсткость тела (пружины, проволоки, стержня и т. д.), тем меньше оно изменяет свою длину под действием данной силы.

Следует помнить, что закон Гука справедлив только для упругой деформации. Закон Гука хорошо выполняется только при малых деформациях. При больших деформациях изменение длины перестаёт быть прямо пропорциональным приложенной силе, а при очень больших деформациях тело разрушается.

## Сила трения

Взаимодействие, возникающее в месте соприкосновения тел и препятствующее их относительному движению, называют трением, а характеризующую это взаимодействие силу — **силой трения**.

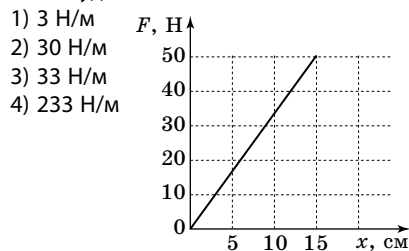
Силы трения, как и силы упругости, имеют электромагнитную природу. Трение между двумя твёрдыми телами называют **сухим трением**.

Различают три вида трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Длина нерастянутой пружины равна 20 см. Чтобы увеличить длину пружины до 26 см, необходимо приложить силу 3 Н. Найти жёсткость пружины.  
1) 5 Н/м                      3) 50 Н/м  
2) 10 Н/м                    4) 0,5 Н/м

- Определите жёсткость пружины по графику зависимости силы упругости от удлинения.



- Когда тело скользит по наклонной плоскости, сила трения, которая действует на него, направлена  
1) вертикально вверх  
2) перпендикулярно к наклонной плоскости  
3) в направлении движения тела  
4) противоположно скорости движения

- Какова масса санок, если для равномерного движения по горизонтальной дороге к ним нужно прикладывать горизонтальную силу 40 Н? Коэффициент трения между санками и дорогой равен 0,5.  
1) 4 кг                      3) 2 кг  
2) 8 кг                      4) 0,8 кг

- Рассчитать давление, оказываемое бруском на стол, если масса бруска равна 4 кг, а площадь соприкосновения равна 200 см<sup>2</sup>.  
1) 4 кПа                      3) 400 Па  
2) 2 кПа                      4) 200 Па

- Какое давление оказывает лыжник массой 80 кг на снег, если длина каждой лыжи 2 м, а ширина 10 см?  
1) 200 Па  
2) 400 Па  
3) 2 кПа  
4) 4 кПа

**1. Трение покоя** — трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

Трение покоя удерживает грузы, находящиеся на движущейся ленте транспортёра, от соскальзывания, препятствует развязыванию шнурков, удерживает гвозди, вбитые в доску, и т. д.

Сила трения покоя — это сила, препятствующая возникновению движения одного тела относительно другого. Направлена сила трения покоя всегда против силы, приложенной извне параллельно поверхности соприкосновения и стремящейся сдвинуть с места предмет, т. е. против предполагаемого движения (рис. 29). Измерить силу трения покоя можно с помощью груза, перекинутого через блок и связанного с телом через динамометр.

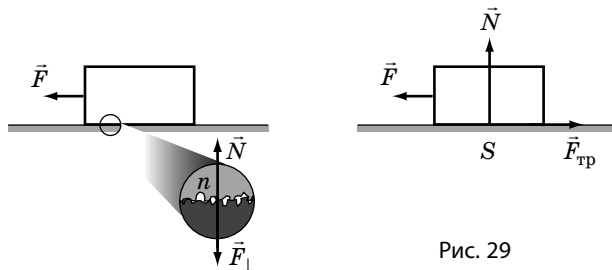


Рис. 29

Сила трения покоя растёт вместе с силой, стремящейся сдвинуть тело с места. Но для любых двух соприкасающихся тел она имеет некоторое максимальное значение  $(F_{\text{тр.п}})_{\text{max}}$ , больше которого она быть не может. Например, для деревянного бруска, находящегося на деревянной доске, максимальная сила трения покоя составляет 0,6 от его веса. Максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления, равного по модулю силе реакции опоры  $N$ :

$$(F_{\text{тр.п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N,$$

где  $\mu_{\text{п}}$  — коэффициент трения покоя.

Максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения поверхностей. Она зависит от качества обработки соприкасающихся поверхностей и от материалов тел.

**2. Трение скольжения.** Приложив к телу силу, превышающую максимальную силу трения покоя, мы сдвинем тело с места, и оно начнёт двигаться. Трение покоя при этом сменится трением скольжения.

**Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости соприкасающихся тел.**

Как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления и, следовательно, силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения (при небольших скоростях  $\mu < \mu_{\text{п}}$ ), зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Сила трения скольжения зависит также довольно сложным образом от относительной скорости соприкасающихся тел. При небольших относительных скоростях сила трения скольжения меньше силы трения покоя, и лишь при увеличении скорости  $F_{\text{тр}} > (F_{\text{тр.п}})_{\text{max}}$  (рис. 30). При небольших скоростях приближенно их можно считать равными:

$$F_{\text{тр}} = (F_{\text{тр.п}})_{\text{max}} = \mu N.$$

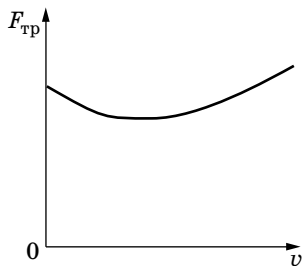


Рис. 30

Причинами возникновения силы трения являются шероховатость поверхностей соприкасающихся тел и межмолекулярное притяжение, действующее в местах контакта трущихся тел.

Даже те поверхности, которые выглядят гладкими, на самом деле всегда имеют микроскопические неровности (выступы, впадины). При скольжении одного тела по поверхности другого эти неровности зацепляются друг за друга и всегда мешают движению.

Межмолекулярное притяжение проявляется в тех случаях, когда поверхности соприкасающихся тел хорошо отполированы. Так, например, при относительном скольжении двух металлов с очень чистыми и ровными поверхностями, обработанными в вакууме с помощью специальной технологии, сила трения оказывается намного больше, чем при перемещении неровного бруска дерева по земле. В некоторых случаях эти металлы даже «схватываются» друг с другом, и дальнейшее скольжение невозможно.

**3. Трение качения.** Если тело не скользит по поверхности другого тела, а, подобно колесу или цилиндру, катится, то возникающее в месте их контакта трение называют трением качения. Катящееся колесо всё время вдавливаются в полотно дороги, и потому перед ним всё время оказывается небольшой бугорок, который необходимо преодолеть. Именно этим и обусловлено трение качения. При этом чем дорога тверже, тем трение качения меньше.

Как и в предыдущих случаях, **сила трения качения пропорциональна силе реакции опоры:**

$$F_{\text{тр. кач}} = \mu_{\text{кач}} N,$$

где  $\mu_{\text{кач}}$  — коэффициент трения качения.

Благодаря тому, что  $\mu_{\text{кач}} \ll \mu$ , при одинаковых нагрузках сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения. Это было замечено ещё в древности. Поэтому для перемещения тяжёлых грузов наши предки подкладывали под них катки или брёвна. По этой же причине люди стали использовать в транспорте колёса.

Разница в силах трения скольжения и качения объясняется тем, что при скольжении участки тела смещаются вдоль поверхности соприкосновения, и вместо разорванных межмолекулярных связей постоянно образуются новые. Когда колесо катится без проскальзывания по поверхности, молекулярные связи разрываются при подъёме участков колеса быстрее, чем при скольжении, и поэтому сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения.

На твёрдое тело, движущееся в жидкости или газе, действует **сила сопротивления среды**. Эта сила направлена против скорости тела относительно среды и тормозит движение.

В отличие от силы трения сила сопротивления среды появляется только во время движения тела в этой среде. Ничего подобного силе трения покоя здесь нет. Наоборот, всем известно, насколько легче сдвинуть с места предмет в воде, чем на твёрдой поверхности.

Модуль силы сопротивления среды  $F_c$  зависит от размеров, формы и состояния поверхности тела, свойств жидкости или газа, в котором тело движется, и от относительной скорости движения тела и среды. Примерный характер зависимости  $F_c$  от скорости  $v$  приведён на рис. 31. Как следует из рис. 31, при малых скоростях движения тела относительно среды можно считать

$$F_c = k_1 v,$$

где  $k_1$  — коэффициент, зависящий от размеров, формы, состояния поверхности тела и вязкости среды.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 v^2,$$

где  $k_2$  — коэффициент сопротивления, отличный от  $k_1$ .

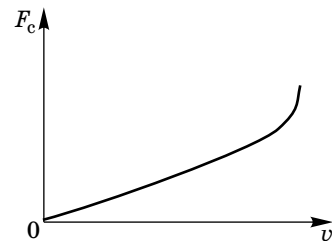


Рис. 31

## Давление

**Давление** — это физическая величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности.

Сила, прикладываемая перпендикулярно поверхности, называется **силой давления на эту поверхность**. Чтобы определить давление, надо силу давления, приложенную к данной поверхности, разделить на площадь этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.24)$$

где  $p$  — давление,  $F$  — сила давления,  $S$  — площадь.

**Чем меньше площадь поверхности при одной и той же силе давления, тем больше давление.**

Если силой давления является вес тела ( $F = P = mg$ ), находящегося на данной поверхности, давление, оказываемое телом, можно найти по формуле:

$$p = \frac{mg}{S},$$

где  $m$  — масса тела,  $g$  — ускорение свободного падения.

Наоборот, если давление  $p$  и площадь  $S$  известны, из формулы (1.24) можно найти силу давления  $F$ :

$$F = pS.$$

Единицей измерения давления в СИ является **паскаль (Па)**. Данная единица названа так в честь французского учёного Блеза Паскаля.

Паскаль — это такое давление, которое производит сила давления в 1 Н, приложенная к поверхности площадью в 1 м<sup>2</sup>:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Из сказанного выше ясно, что одна и та же сила давления приводит к разным результатам, будучи приложенной к разным площадям. Так, человек, способный легко скользить по рыхлому снегу на лыжах, сразу же проваливается в него, как только их снимет; шляпки гвоздей под весом гири только чуть-чуть погружаются в песок, тогда как острия гвоздей под весом той же гири погружаются намного глубже (рис. 32). В обеих ситуациях при одних и тех же силах давления площади опор в случаях *а* больше, чем в *б*.

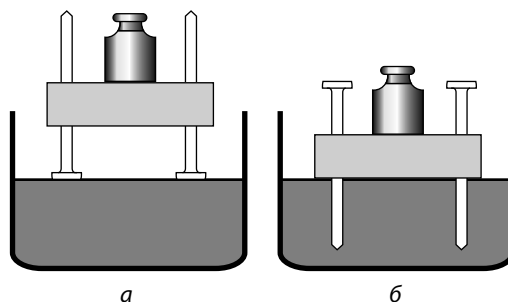
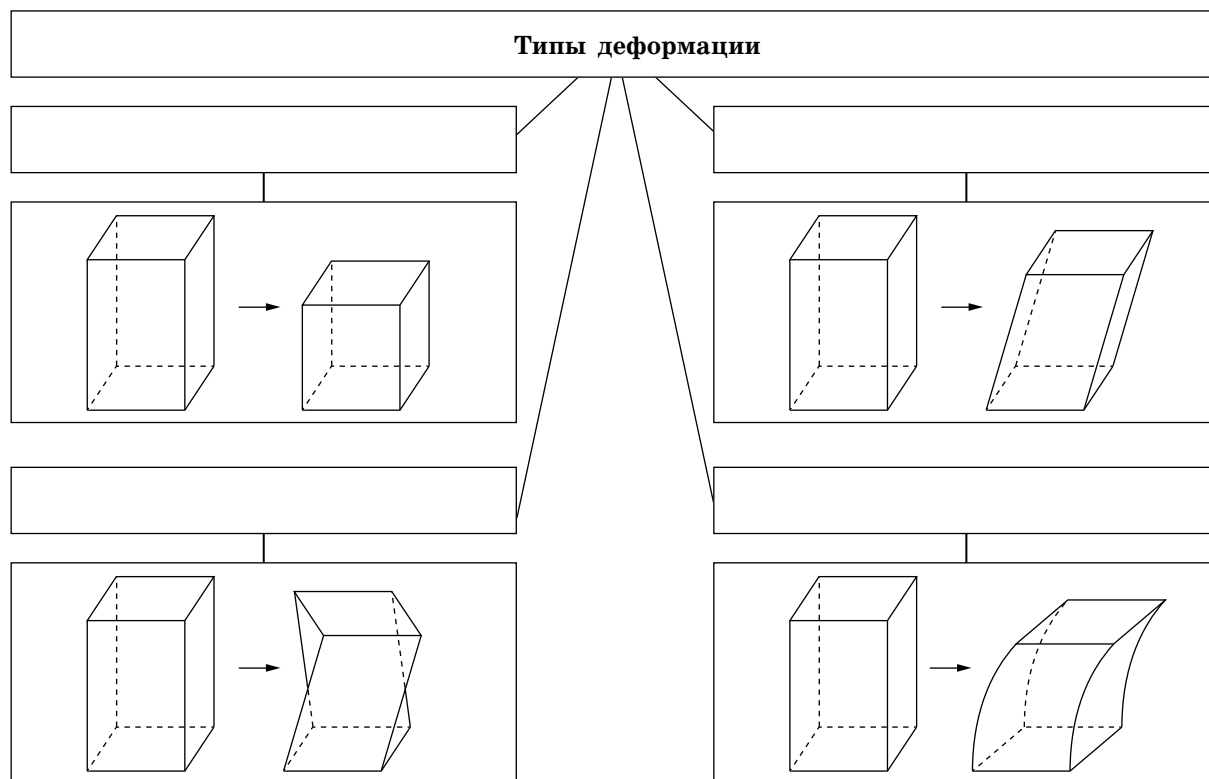
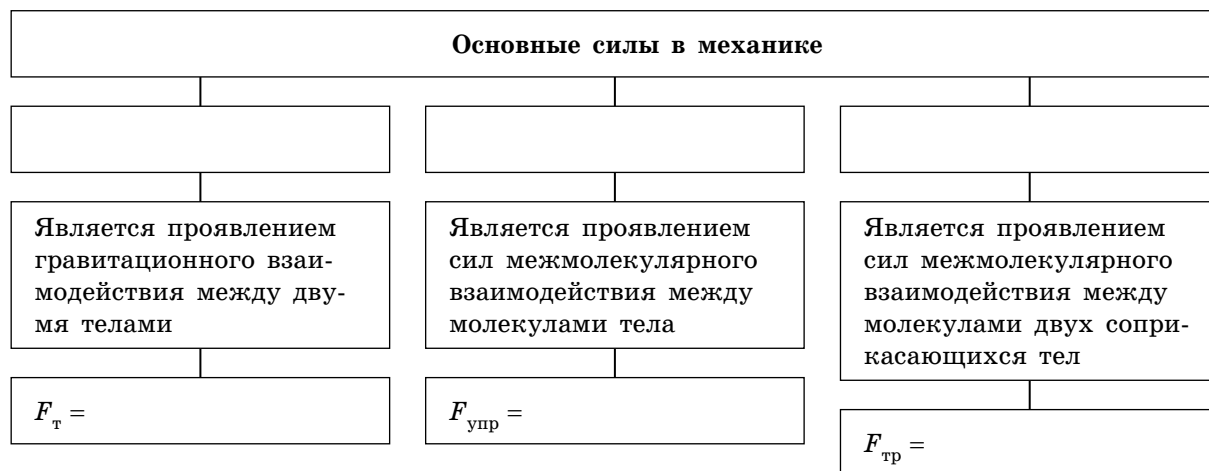


Рис. 32

Зависимостью давления от площади опоры пользуются в технике, чтобы увеличить или, наоборот, уменьшить давление. Так, сравнительно небольшая сила давления (около 50 Н), которую прикладывает человек, вдавливая кнопку в доску, приводит к давлению в тысячу раз большему, чем давление, производимое гусеничным трактором.

# КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните схемы.



Ответы на тестовые задания (неделя 5)

1 — 3. 2 — 4. 3 — 4. 4 — 2. 5 — 2. 6 — 3.



## СТАТИКА

**Статика** (в переводе с греч. — «стоящий») — это раздел механики, в котором изучаются условия равновесия материальных тел под воздействием сил.

Статику разделяют на аналитическую и геометрическую.

**Аналитическая статика** описывает общие условия равновесия любой механической системы.

**Геометрическая статика** имеет дело с материальными частицами (материальными точками) и абсолютно твёрдым телом. Под абсолютно твёрдым телом понимают тело, расстояние между точками которого всегда остаётся неизменным.

**Основные аксиомы геометрической статики:**

1. Равнодействующая двух сил, действующих на материальную точку, определяется по правилу параллелограмма.
2. Две силы, действующие на материальную точку (или абсолютно твёрдое тело), считаются уравновешенными, если они равны по величине (модулю) и направлены вдоль одной прямой в противоположных направлениях.
3. Сложение или вычитание уравновешенных сил не меняет действия данной системы сил на твёрдое тело. При этом уравновешенными называются силы, под действием которых свободное твёрдое тело может находиться в покое в инерциальной системе отсчёта.

При изучении статики абсолютно твёрдого тела решаются следующие задачи:

- 1) приведение всех сил, действующих на тело, к простейшему виду;
- 2) определение условий равновесия сил, действующих на твёрдое тело.

Геометрическая статика вытекает непосредственно из законов Ньютона и общих законов динамики.

Условия равновесия упруго деформируемых тел, жидкостей и газов рассматриваются в теории упругости, гидростатике и аэростатике.

## Момент силы

**Моментом силы** относительно оси вращения называется физическая величина, равная произведению силы на её плечо.

Момент силы определяют по формуле:

$$M = Fl, \quad (1.25)$$

где  $F$  — сила,  $l$  — плечо силы.

**Плечом силы** называется кратчайшее расстояние от линии действия силы до оси вращения тела.

На рис. 33, *a* изображено твёрдое тело, способное вращаться вокруг оси. Ось вращения этого тела перпендикулярна плоскости рисунка и проходит через точку, обозначенную буквой *O*. Плечом силы  $F_1$  здесь является расстояние  $l_1$  от оси вращения до линии действия силы. Находят его следующим образом. Сначала проводят линию действия силы. Затем из точки *O*, через которую проходит ось вращения тела, опускают на линию действия силы перпендикуляр. Длина этого перпендикуляра является плечом данной силы.

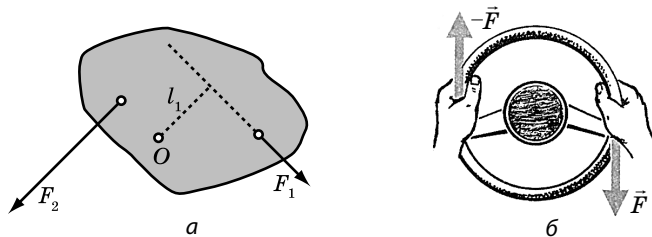


Рис. 33

Момент силы характеризует вращающее действие силы. Это действие зависит как от силы, так и от плеча. Чем больше плечо, тем меньшую силу надо приложить, чтобы получить желаемый результат, т. е. один и тот же момент силы. Именно поэтому открыть дверь, толкая её возле петель, гораздо труднее, чем берясь за ручку, а гайку отвернуть гораздо проще длинным, чем коротким гаечным ключом.

За единицу момента силы в СИ принимается момент силы в 1 Н, плечо которой равно 1 м — ньютон-метр (Н · м).

Правило моментов гласит: **Твёрдое тело, способное вращаться вокруг неподвижной оси, находится в равновесии, если момент силы  $M_1$ , вращающей его по часовой стрелке, равен моменту силы  $M_2$ , вращающей его против часовой стрелки, т. е.**

$$M_1 = -M_2 \text{ или } F_1 l_1 = -F_2 l_2.$$

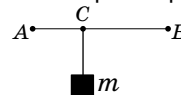
Момент силы принято считать положительным, если тело вращается по часовой стрелке, и отрицательным, если — против.

Правило моментов является следствием одной из теорем механики, сформулированной французским учёным П. Вариньоном в 1687 г.

Если на тело действуют две равные и противоположно направленные силы, не лежащие на одной прямой, то такое тело не находится в равновесии, поскольку результирующий момент этих сил относительно любой оси не равен нулю, т. к. обе силы имеют моменты, направленные в одну сторону. Две такие силы, одновременно

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- К горизонтальному стержню подвешен груз массой 2 кг. Найти силу давления стержня на опору в т. А, если сила давления на опору в т. В равна 4 Н. (Массой стержня пренебречь.)



- 6 Н
- 4 Н
- 8 Н
- 16 Н

- К одному плечу рычага длиной 30 см приложена сила  $F_1 = 3$  Н. Какую силу нужно приложить к плечу длиной 10 см, чтобы рычаг находился в положении равновесия?

- 3 Н
- 6 Н
- 9 Н
- 12 Н

- Цилиндрический стержень, уравновешенный на опоре, состоит из двух частей. Левая часть из алюминия, а правая — из стали. Найти длину левой части стержня, если длина правой части стержня равна 30 см.

- 0,18 м
- 0,51 м
- 0,24 м
- 0,22 м

ДЛЯ ЗАМЕТОК

действующие на тело, называют **парой сил**. Если тело закреплено на оси, то под действием пары сил оно будет вращаться. Если пара сил приложена к свободному телу, то оно будет вращаться вокруг оси, проходящей через центр тяжести тела (рис. 33, б).

Момент пары сил одинаков относительно любой оси, перпендикулярной к плоскости пары. Суммарный момент  $M$  пары всегда равен произведению одной из сил  $F$  на расстояние  $l$  между силами, которое называется *плечом пары*, независимо от того, на какие отрезки  $l_1$  и  $l_2$  разделяет положение оси плечо пары:

$$M = Fl_1 + Fl_2 = F(l_1 + l_2) = Fl.$$

Момент нескольких сил, равнодействующая которых равна нулю, будет одинаковым относительно всех осей, параллельных друг другу, поэтому действие всех этих сил на тело можно заменить действием одной пары сил с тем же моментом.

## Равновесие механической системы (абсолютно твёрдого тела)

**Равновесие механической системы** — это состояние, при котором все точки механической системы находятся в покое по отношению к рассматриваемой системе отсчёта. Если система отсчёта инерциальна, равновесие называется абсолютным, если неинерциальна — относительным.

Для нахождения условий равновесия абсолютно твёрдого тела необходимо мысленно разбить его на большое число достаточно малых элементов, каждый из которых можно представить материальной точкой. Все эти элементы взаимодействуют между собой — эти силы взаимодействия называются внутренними. Помимо этого на ряд точек тела могут действовать внешние силы.

Согласно второму закону Ньютона, чтобы ускорение точки равнялось нулю (а ускорение покоящейся точки равно нулю), геометрическая сумма сил, действующих на эту точку, должна быть равна нулю. Если тело находится в покое, значит, все его точки (элементы) также находятся в покое. Следовательно, для любой точки тела можно записать:

$$\vec{F}_i + \vec{F}'_i = 0, \quad (1.26)$$

где  $\vec{F}_i + \vec{F}'_i$  — геометрическая сумма всех внешних и внутренних сил, действующих на  $i$ -й элемент тела.

Уравнение (1.26) означает, что для **равновесия тела необходимо и достаточно, чтобы геометрическая сумма всех сил, действующих на любой элемент этого тела, была равна нулю**.

Из (1.26) легко получить первое условие равновесия тела (системы тел). Для этого достаточно просуммировать уравнение (1.26) по всем элементам тела:

$$\sum \vec{F}_i + \sum \vec{F}'_i = 0.$$

Вторая сумма равна нулю согласно третьему закону Ньютона: векторная сумма всех внутренних сил системы равна нулю, т. к. любой внутренней силе соответствует сила, равная по модулю и противоположная по направлению.

Следовательно,

$$\sum \vec{F}_i = 0.$$

**Первым условием равновесия твёрдого тела (системы тел)** является равенство нулю геометрической суммы всех внешних сил, приложенных к телу.

Это условие является необходимым, но не достаточным. В этом легко убедиться, вспомнив о вращающем действии пары сил, геометрическая сумма которых тоже равна нулю.



- 1.3. Статика
- 1.3.3. Давление жидкости
- 1.3.4. Закон Паскаля
- 1.3.5. Закон Архимеда
- 1.3.6. Условия плавания тел

## Закон Паскаля

**Гидростатика** — один из подразделов механики, изучающий равновесие жидкости, а также равновесие твёрдых тел, частично или полностью погружённых в жидкость.

**Закон Паскаля** — основной закон гидростатики — гласит: **Давление на поверхность жидкости, произведённое внешними силами, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях.** Этот закон был открыт французским учёным Б. Паскалем в 1653 г. и опубликован в 1663 г.

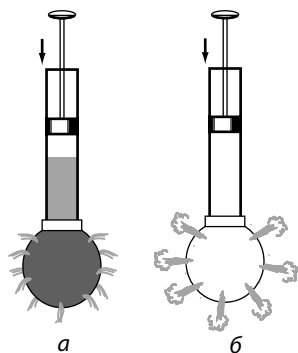


Рис. 34

Чтобы убедиться в справедливости закона Паскаля, достаточно сделать простой опыт. Присоединим к трубке с поршнем полый шар со множеством маленьких отверстий. Наполнив шар водой, нажмём на поршень, чтобы увеличить в нём давление. Вода начнёт выливаться, но не только через то отверстие, которое находится на линии действия прикладываемой нами силы, а и через все остальные тоже (рис. 34, а). Причём напор воды, обусловленный внешним давлением, во всех появившихся струйках будет одинаковым.

Аналогичный результат мы получим в том случае, если вместо воды будем использовать дым (рис. 34, б). Таким образом, закон Паскаля справедлив не только для жидкостей, но и для газов.

**Жидкости и газы передают оказываемое на них давление по всем направлениям одинаково.**

Передача давления жидкостями и газами во всех направлениях одновременно объясняется достаточно высокой подвижностью частиц, из которых они состоят.

## Давление покоящейся жидкости на дно и стенки сосуда (гидростатическое давление)

Жидкости (и газы) передают по всем направлениям не только внешнее давление, но и то давление, которое существует внутри них благодаря весу их собственных частей.

**Давление**, оказываемое покоящейся жидкостью, называется **гидростатическим**.

Получим формулу для расчёта гидростатического давления жидкости на произвольной глубине  $h$  (в окрестности точки А на рис. 35).

Сила давления, действующая со стороны вышележащего узкого столба жидкости, может быть выражена двумя способами:

- 1) как произведение давления  $p$  в основании этого столба на площадь его сечения  $S$ :

$$F = pS; \quad (1.27)$$

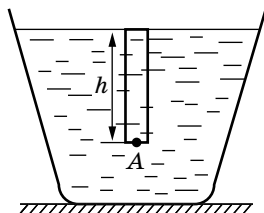


Рис. 35

- 2) как вес того же столба жидкости, т. е. произведение массы  $m$  жидкости на ускорение свободного падения:

$$F = mg. \quad (1.28)$$

Масса жидкости может быть выражена через её плотность  $\rho$  и объём  $V$ :

$$m = \rho V, \quad (1.29)$$

а объём — через высоту столба и площадь его поперечного сечения:

$$V = Sh. \quad (1.30)$$

Подставляя в формулу (1.28) значение массы из (1.29) и объёма из (1.30), получим:

$$F = \rho Vg = \rho Shg. \quad (1.31)$$

Приравнявая выражения (1.27) и (1.31) для силы давления, получим:

$$pS = \rho Shg.$$

Разделив обе части последнего равенства на площадь  $S$ , найдём давление жидкости на глубине  $h$ :

$$p = \rho hg.$$

Это и есть формула гидростатического давления.

**Гидростатическое давление на любой глубине внутри жидкости не зависит от формы сосуда, в котором находится жидкость, и равно произведению плотности жидкости, ускорения свободного падения и глубины, на которой определяется давление.**

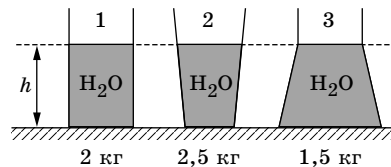
Важно ещё раз подчеркнуть, что по формуле гидростатического давления можно рассчитывать давление жидкости, налитой в сосуд любой формы, в том числе

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Найти давление бензина на дно цистерны, если его уровень равен 60 см (плотность бензина — 710 кг/м<sup>3</sup>). Атмосферным давлением пренебречь.
- 1) 42,6 кПа                      3) 4,26 кПа  
2) 426 кПа                      4) 4,26 Па

2. Определить силу давления воды на пробку площадью 30 см<sup>2</sup> на дне цистерны, если высота столба воды равна 10 м. Атмосферным давлением пренебречь.
- 1) 300 Н                      3) 400 Н  
2) 3 кН                      4) 5 кН

3. В трёх сосудах находится вода. В каком сосуде давление воды на дно максимально?



- 1) 1  
2) 2  
3) 3  
4) одинаково во всех трёх сосудах

4. Определить выталкивающую силу, действующую на тело объёмом 2 м<sup>3</sup> в воде.
- 1) 200 Н                      3) 20 кН  
2) 2 кН                      4) 200 кН

5. На шарик весом 26 Н, полностью погружённый в воду, действует выталкивающая сила 10 Н. Найти плотность шарика.
- 1) 1000 кг/м<sup>3</sup>                      3) 7800 кг/м<sup>3</sup>  
2) 7000 кг/м<sup>3</sup>                      4) 2600 кг/м<sup>3</sup>

6. Алюминиевый кубик массой 2,7 кг наполовину погружён в воду. Найти силу Архимеда.
- 1) 5 Н                      3) 2 Н  
2) 1 Н                      4) 4 Н

7. Какая часть объёма льда, который плавает в воде, находится над водой?
- 1) 0,2                      3) 0,25  
2) 0,1                      4) 0,15

давление на стенки сосуда, а также давление в любой точке жидкости, направленное снизу вверх, поскольку давление на одной и той же глубине одинаково по всем направлениям.

**Гидростатический парадокс** — явление, заключающееся в том, что вес жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы давления жидкости на дно сосуда.

Под словом «парадокс» понимают неожиданное явление, не соответствующее обычным представлениям. Так, в расширяющихся кверху сосудах сила давления на дно меньше веса жидкости, а в сужающихся — больше. В цилиндрическом сосуде обе силы одинаковы. Если одна и та же жидкость налита до одной и той же высоты в сосуды разной формы, но с одинаковой площадью дна, то, несмотря на разный вес налитой жидкости, сила давления на дно одинакова для всех сосудов и равна весу жидкости в цилиндрическом сосуде (рис. 36).

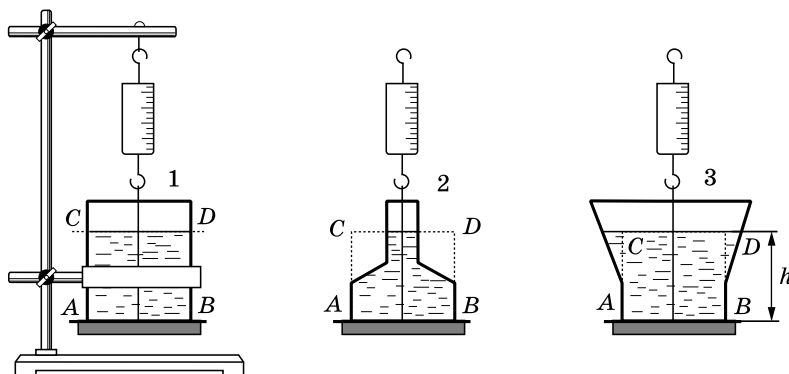


Рис. 36

Это следует из того, что давление покоящейся жидкости зависит только от глубины под свободной поверхностью и от плотности жидкости:  $p = \rho gh$  (формула гидростатического давления). А так как площадь дна у всех сосудов одинакова, то и сила, с которой жидкость давит на дно этих сосудов, одна и та же. Она равна весу вертикального столба  $ABCD$  жидкости:  $P = \rho ghS$ , здесь  $S$  — площадь дна (хотя масса, а следовательно, и вес в этих сосудах различны).

Гидростатический парадокс объясняется законом Паскаля — способностью жидкости передавать давление одинаково во всех направлениях.

Из формулы гидростатического давления следует, что одно и то же количество воды, находясь в разных сосудах, может оказывать разное давление на дно. Поскольку это давление зависит от высоты столба жидкости, то в узких сосудах оно будет больше, чем в широких. Благодаря этому даже небольшим количеством воды можно создавать очень большое давление.

## Закон Архимеда

Этот закон был открыт древнегреческим учёным Архимедом в III в. до н.э. Свои исследования Архимед описал в трактате «О плавающих телах».

Если погрузить в воду мячик, наполненный воздухом, и отпустить его, то он всплывёт. То же самое произойдёт и со многими другими телами. Какая же сила заставляет их всплывать?

На тело, погружённое в воду, со всех сторон действуют силы давления воды (рис. 37, а). В каждой точке тела эти силы направлены перпендикулярно его поверхности. Если бы все эти силы были одинаковы, тело испытывало бы лишь всестороннее сжатие. Но на разных

глубинах гидростатическое давление различно: оно возрастает с увеличением глубины. Поэтому силы давления, приложенные к нижним участкам тела, оказываются больше сил давления, действующих на тело сверху.

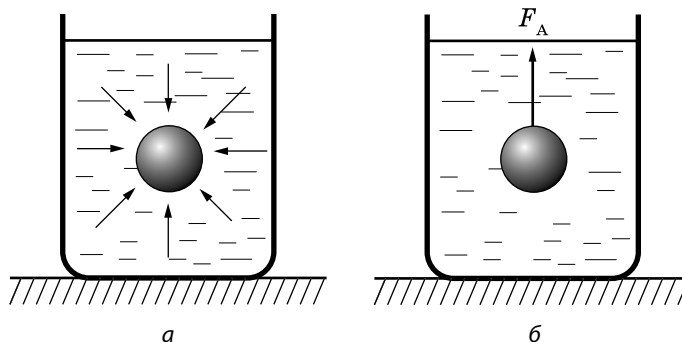


Рис. 37

В итоге результирующая сила направлена вверх. Это и заставляет тело всплывать. Эта сила называется **выталкивающей силой**, или **архимедовой силой**. На рис. 37, б она обозначена как  $F_A$ .

Архимедова (выталкивающая) сила действует на тело не только в воде, но и в любой другой жидкости, т. к. в любой жидкости существует гидростатическое давление, разное на разных глубинах. Эта сила действует и в газах, благодаря чему летают воздушные шары и дирижабли.

Благодаря выталкивающей силе вес любого тела, находящегося в воде (или в любой другой жидкости), оказывается меньше, чем в воздухе. В этом легко убедиться, взвесив гирю с помощью учебного пружинного динамометра сначала в воздухе, а затем в сосуде с водой.

Уменьшение веса происходит и при переносе тела из вакуума в воздух (или какой-либо другой газ).

Если вес тела в вакууме равен  $P_0$ , то его вес в воздухе равен:

$$P_{\text{возд}} = P_0 - F'_A,$$

где  $F'_A$  — архимедова сила, действующая на данное тело в воздухе. Для большинства тел эта сила ничтожно мала и ею можно пренебречь, т. е. можно считать, что  $P_{\text{возд}} = P_0 = mg$ .

Вес тела в жидкости уменьшается значительно сильнее. Если в воздухе  $P_{\text{возд}} = P_0$ , то в жидкости  $P_{\text{ж}} = P_0 - F_A$ . Здесь  $F_A$  — архимедова сила, действующая в жидкости. Отсюда следует, что

$$F_A = P_0 - P_{\text{ж}}. \quad (1.32)$$

Поэтому чтобы найти архимедову силу, действующую на тело в какой-либо жидкости, нужно это тело взвесить в воздухе и в жидкости. Разность полученных значений и будет архимедовой (выталкивающей) силой. Другими словами, учитывая формулу (1.32), можно сказать:

**Выталкивающая сила, действующая на погружённое в жидкость тело, равна весу жидкости, вытесненной этим телом.**

Определить архимедову силу можно также теоретически. Для этого предположим, что тело, погружённое в жидкость, состоит из той же жидкости, в которую оно погружено. Мы имеем право это предположить, так как силы давления, действующие на тело, погружённое в жидкость, не зависят от вещества, из которого оно сделано. Тогда приложенная к такому телу архимедова сила  $F_A$  будет уравновешена действующей вниз силой тяжести  $m_{\text{ж}}g$  (где  $m_{\text{ж}}$  — масса жидкости в объёме данного тела):



$$F_A = m_{\text{ж}}g. \quad (1.33)$$

Но сила тяжести  $m_{\text{ж}}g$  равна весу вытесненной жидкости  $P_{\text{ж}}$ . Таким образом,

$$F_A = P_{\text{ж}}.$$

Учитывая, что масса жидкости равна произведению её плотности  $\rho_{\text{ж}}$  на объём, формулу (1.33) можно записать в виде:

$$F_A = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}g,$$

где  $V_{\text{ж}}$  — объём вытесненной жидкости. Этот объём равен объёму той части тела, которая погружена в жидкость. Если тело погружено в жидкость целиком, то  $V_{\text{ж}}$  совпадает с объёмом  $V$  всего тела; если же тело погружено в жидкость частично, то объём  $V_{\text{ж}}$  вытесненной жидкости меньше объёма  $V$  тела (рис. 38).

Формула (1.33) справедлива и для архимедовой силы, действующей в газе. Только в этом случае в неё следует подставлять плотность газа и объём вытесненного газа, а не жидкости.

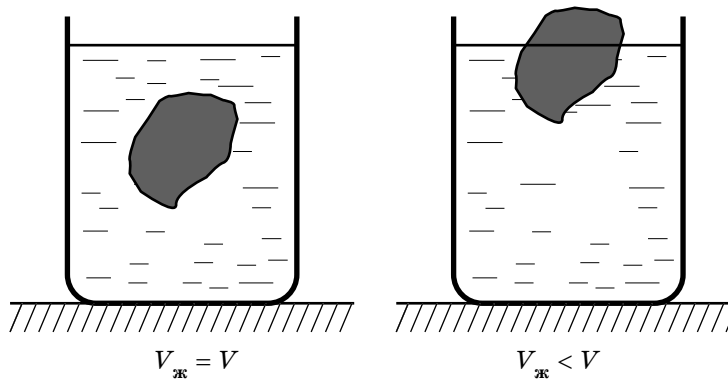


Рис. 38

С учётом вышеизложенного закон Архимеда можно сформулировать так:

**На всякое тело, погружённое в покоящуюся жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная произведению плотности жидкости (или газа), ускорения свободного падения и объёма той части тела, которая погружена в жидкость (или газ).**

## Условия плавания тел

**Плавание тел** — состояние равновесия твёрдого тела, частично или полностью погружённого в жидкость (или газ).

Основная задача теории плавания тел — определение равновесия тела, погружённого в жидкость, выяснение условий устойчивости равновесия.

Как известно, на все тела, погружённые в жидкость, действует сила Архимеда  $F_A$ , направленная вертикально вверх, однако всплывают далеко не все. Чтобы понять, почему одни тела всплывают, а другие тонут, необходимо учесть ещё одну силу, действующую на все тела, — силу тяжести  $F_T$ , которая направлена вертикально вниз, противоположно  $F_A$ . Если тело оставить внутри жидкости в состоянии покоя, то оно начнёт двигаться в сторону, в которую направлена большая из сил. При этом возможны следующие случаи:

- 1) если архимедова сила меньше силы тяжести ( $F_A < F_T$ ), то тело утонет (рис. 39, а);
- 2) если архимедова сила больше силы тяжести ( $F_A > F_T$ ), то тело всплывёт (рис. 39, б);

3) если архимедова сила равна силе тяжести ( $F_A = F_T$ ), то тело останется в покое. Последнее условие является условием равновесия тела в жидкости:

$$F_A = F_T. \quad (1.34)$$

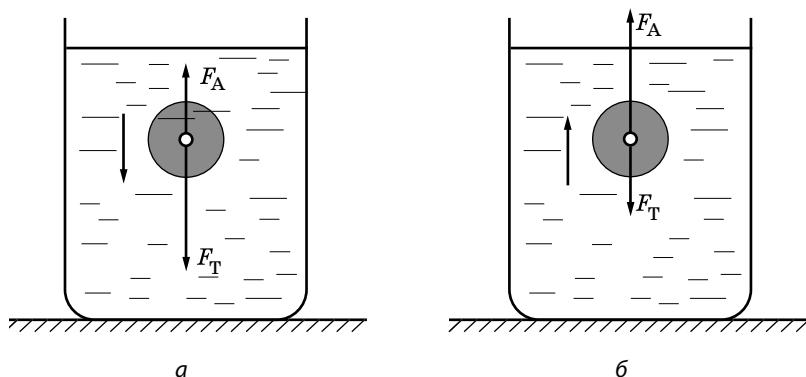


Рис. 39

Равенство (1.34) выражает условие плавания тел: **Для того чтобы тело плавало, необходимо, чтобы действующая на него сила тяжести уравнивалась архимедовой силой.**

Условию плавания тел можно придать другую форму. Представим архимедову силу в виде

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g. \quad (1.35)$$

Силу тяжести, действующую на тело, тоже можно выразить через объём  $V$  и плотность тела  $\rho$ :

$$F_T = mg = \rho V g, \quad (1.36)$$

где  $m$  — масса тела. Подставим выражения (1.35) и (1.36) в равенство (1.34):

$$\rho V g = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} g.$$

Разделив обе части этого равенства на  $g$ , получим условие плавания тел в новой форме:

$$\rho V = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}.$$

Из полученного соотношения можно вывести два важных следствия.

1. Для того чтобы тело плавало, будучи полностью погружённым в жидкость, необходимо, чтобы плотность тела была равна плотности жидкости.

2. Для того чтобы тело плавало, частично выступая над поверхностью жидкости, необходимо, чтобы плотность тела была меньше плотности жидкости.

При  $\rho > \rho_{\text{ж}}$  плавание тел невозможно, так как в этом случае сила тяжести превышает архимедову силу, и тело тонет.

Что будет происходить с телом, у которого  $\rho < \rho_{\text{ж}}$ , если его полностью погрузить в жидкость? В этом случае архимедова сила будет преобладать над силой тяжести, и потому тело начнёт подниматься вверх. Пока тело будет двигаться, оставаясь полностью погружённым в жидкость, архимедова сила будет оставаться неизменной. Но как только тело достигнет поверхности жидкости и появится над ней, эта сила (по мере уменьшения объёма части тела, погружённого в жидкость) будет становиться всё меньше и меньше. Всплытие прекратится тогда, когда архимедова (выталкивающая) сила станет равной силе тяжести. При этом чем меньшей плотностью (по сравнению с плотностью жидкости) обладает тело, тем меньшая его часть останется внутри жидкости (рис. 40).

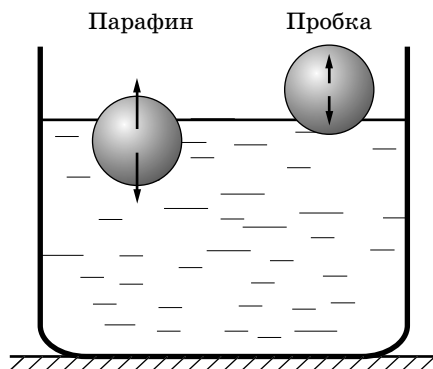


Рис. 40

Масса современных судов достигает нескольких десятков тысяч тонн. Почему же они не тонут? Дело в том, что, несмотря на огромную массу, их средняя плотность по-прежнему меньше плотности воды (благодаря тому, что в кораблях много пустых помещений).

Глубина, на которую плавающее судно погружается в воду, называется **осадкой судна**. При полной загрузке судна оно не должно погружаться в воду ниже так называемой грузовой **ватерлинии**. Вес воды, вытесняемый судном при погружении до ватерлинии, равный силе тяжести, действующей на судно с грузом, называется **водоизмещением судна**. Если из водоизмещения вычесть вес самого судна, получим **грузоподъёмность** — вес груза, перевозимого судном.

На все тела в воздухе также действует выталкивающая сила:

$$F_A = \rho_{\text{возд}} V g,$$

где  $\rho_{\text{возд}}$  — плотность воздуха.

Если эта сила окажется больше силы тяжести, то тело взлетит. На этом основано воздухоплавание.

Летательные аппараты, применяемые в воздухоплавании, называют аэростатами (в переводе с греч. — «воздух» и «стоящий»). Неуправляемые аэростаты с оболочкой, имеющей форму шара, называют воздушными шарами. Управляемые аэростаты (имеющие двигатель и воздушные винты) называют дирижаблями.

Чтобы определить, какой груз способен поднять воздушный шар, следует знать его подъёмную силу. Она равна разности между архимедовой силой и действующей на шар силой тяжести:

$$F = F_A - F_T.$$

Чем меньше плотность газа, наполняющего воздушный шар, тем меньше действующая на него сила тяжести и тем больше возникающая подъёмная сила. Воздушные шары можно наполнять гелием, водородом или нагретым воздухом. Хотя у водорода меньшая плотность, в целях безопасности чаще применяют гелий (водород — горючий газ).

Проще всего осуществить подъём и спуск шара, наполненного горячим воздухом. Для этого под отверстием в нижней части шара располагают горелку. Она позволяет регулировать температуру воздуха, а значит, и его плотность и подъёмную силу.

Можно подобрать такую температуру шара, при которой вес шара и кабины будет равен выталкивающей силе. Тогда шар повиснет в воздухе, и с него будет легко проводить наблюдения.

# КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

## ♦ Закончите предложения.

1. Закон Паскаля гласит: \_\_\_\_\_

2. Закон Архимеда гласит: \_\_\_\_\_

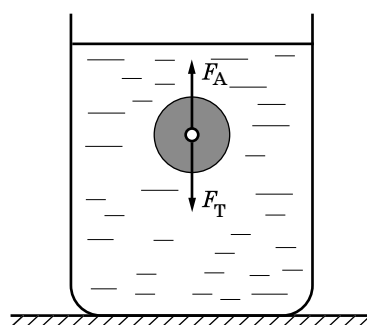
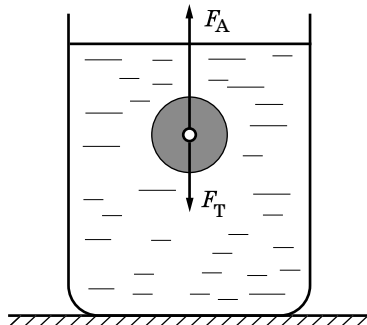
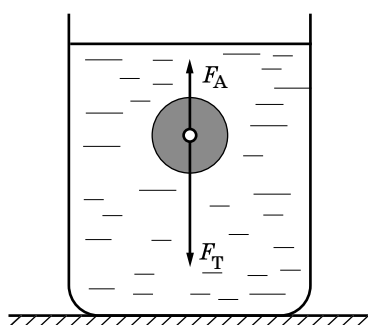
## ♦ Заполните пропуски в формуле для гидростатического давления.

$$P = \rho g \underline{\hspace{1cm}}.$$

## ♦ Заполните пропуски в формуле для архимедовой силы.

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g \underline{\hspace{1cm}}.$$

## ♦ Подпишите рисунки: в каком случае тело утонет, всплывёт или останется в покое.



Ответы на тестовые задания (неделя 7)

1 — 3. 2 — 1. 3 — 4. 4 — 3. 5 — 4. 6 — 1. 7 — 2.

## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

### Импульс тела

**Импульсом тела** называется величина, равная произведению массы тела на его скорость. Следует помнить, что речь идёт о теле, которое можно представить как материальную точку. Импульс тела ( $p$ ) является векторной величиной (как и скорость) и выражается формулой:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.37)$$

Направление вектора импульса всегда совпадает с направлением скорости.

За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, следовательно, единицей импульса является 1 кг·м/с.

### Импульс силы

Если на тело (материальную точку) действует постоянная сила в течение промежутка времени  $\Delta t$ , то постоянным будет и ускорение:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t},$$

где  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  — начальная и конечная скорости тела. Подставив это значение в выражение второго закона Ньютона, получим:

$$\frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (1.38)$$

Раскрыв скобки и воспользовавшись выражением (1.37) для импульса тела, имеем:

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{F}\Delta t.$$

Здесь  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$  — изменение импульса за время  $\Delta t$ . Тогда предыдущее уравнение примет вид:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t. \quad (1.39)$$

Выражение (1.39) представляет собой математическую запись формулировки второго закона механики, данной самим Ньютоном:

**Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.**

Произведение силы на время её действия называют импульсом силы. Поэтому изменение импульса точки равно изменению импульса силы, действующей на неё.

Выражение (1.39) называется **уравнением движения тела**. Следует заметить, что одно и то же действие — изменение импульса точки — может быть получено малой силой за большой промежуток времени и большой силой за малый промежуток времени.

## Импульс системы тел. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

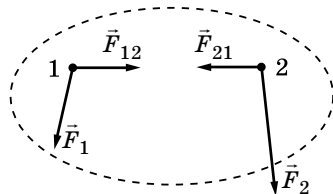


Рис. 41

Рассмотрим систему, состоящую из двух тел (рис. 41). Силы ( $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$  на рис. 41), с которыми тела системы взаимодействуют между собой, называются внутренними. Пусть кроме внутренних сил на систему действуют внешние силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Для каждого тела можно записать уравнение (1.39). Сложив левые и правые части этих уравнений, получим:

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2) \Delta t.$$

Согласно третьему закону Ньютона  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ . Следовательно,

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2) \Delta t. \quad (1.40)$$

В левой части стоит геометрическая сумма изменений импульсов всех тел системы, равная изменению импульса самой системы —  $\Delta \vec{p}_{\text{сист}}$ . С учётом этого равенство (1.40) можно записать:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = \vec{F} \Delta t, \quad (1.41)$$

где  $\vec{F}$  — сумма всех внешних сил, действующих на тело. Полученный результат означает, что импульс системы могут изменить только внешние силы, причём изменение импульса системы направлено так же, как суммарная внешняя сила.

Внутренние силы изменить суммарный импульс системы не могут. Они лишь меняют импульсы отдельных тел системы.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Тело массой 2 кг движется со скоростью 72 км/ч. Найти импульс тела.  
1) 20 (кг · м)/с      3) 2 (кг · м)/с  
2) 40 (кг · м)/с      4) 4 (кг · м)/с
- Тело массой 10 кг, тронувшись с места за 5 с, приобрело скорость 36 км/ч. Найти модуль силы, которая разогнала тело.  
1) 5 Н      3) 20 Н  
2) 10 Н      4) 36 Н
- Мяч массой 500 г пролетел 2 м с ускорением 1 м/с<sup>2</sup>. Найти изменение импульса тела.  
1) 1 (кг · м)/с      3) 2 (кг · м)/с  
2) 1,5 (кг · м)/с      4) 2,5 (кг · м)/с
- Снаряд массой 100 кг, летящий со скоростью 500 м/с, попадает в неподвижный вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. В результате этого вагон начнёт двигаться со скоростью  
1) 1 м/с      3) 5 м/с  
2) 8 м/с      4) 10 м/с
- Теннисный мячик отскакивает от стены. Количество движения мячика до соударения со стенкой составило  $mv$ . Количество движения, которое мячик передаёт стенке в момент удара, равно  
1)  $mv$       3)  $2mv$   
2)  $0,5mv$       4)  $0mv$
- Ракета массой 250 г содержит 350 г взрывчатого вещества. Какова начальная скорость ракеты, если взрыв горючего и выход газов со скоростью 0,3 км/с происходят мгновенно?  
1) 500 м/с      3) 1000 м/с  
2) 420 м/с      4) 100 м/с
- В результате удара хоккеиста клюшкой по шайбе скорость шайбы удвоилась. Как изменилась её кинетическая энергия?  
1) увеличилась в 2 раза  
2) уменьшилась в 4 раза  
3) не изменилась  
4) увеличилась в 4 раза

Из уравнения (1.41) вытекает закон сохранения импульса. Если на систему не действуют никакие внешние силы, то правая часть уравнения (1.41) обращается в ноль, что означает неизменность суммарного импульса системы:

$$\vec{p}_{\text{сист}} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \text{const.}$$

Система, на которую не действуют никакие внешние силы или равнодействующая внешних сил равна нулю, называется **замкнутой**.

Закон сохранения импульса гласит:

**Суммарный импульс замкнутой системы тел остаётся постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой.**

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел. Если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма их проекций на какое-то направление равна нулю, то проекция импульса системы на это направление не меняется. Так, например, система тел на поверхности Земли не может считаться замкнутой из-за силы тяжести, действующей на все тела, однако сумма проекций импульсов на горизонтальное направление может оставаться неизменной (при отсутствии трения), т. к. в этом направлении сила тяжести не действует.

**Реактивным движением** называют движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части. Вследствие закона сохранения импульса направление движения тела при этом противоположно направлению движения отделившейся части.

На принципе реактивного движения основаны полёты ракет. Современная космическая ракета представляет собой очень сложный летательный аппарат. Масса ракеты складывается из массы рабочего тела (т.е. раскалённых газов, образующихся в результате сгорания топлива и выбрасываемых в виде реактивной струи) и конечной, или, как говорят, «сухой» массы ракеты, остающейся после выброса из ракеты рабочего тела.

Когда реактивная газовая струя с большой скоростью выбрасывается из ракеты, сама ракета устремляется в противоположную сторону. Согласно закону сохранения импульса импульс  $m_p v_p$ , приобретаемый ракетой, должен быть равен импульсу  $m_{\text{газ}} \cdot v_{\text{газ}}$  выброшенных газов:

$$m_p v_p = m_{\text{газ}} \cdot v_{\text{газ}}.$$

Отсюда следует, что скорость ракеты

$$v_p = (m_{\text{газ}}/m_p) \cdot v_{\text{газ}}. \quad (1.42)$$

Из этой формулы видно, что скорость ракеты тем больше, чем больше скорость выбрасываемых газов и отношение массы рабочего тела (т.е. массы топлива) к конечной («сухой») массе ракеты.

Формула (1.42) является приближенной. В ней не учитывается, что по мере сгорания топлива масса летящей ракеты становится все меньше и меньше. Точная формула для скорости ракеты была получена в 1897 г. К. Э. Циолковским и носит его имя.

Формула Циолковского позволяет рассчитать запасы топлива, необходимые для сообщения ракете заданной скорости.

## Столкновение тел. Упругий и неупругий удары

Законы сохранения импульса и механической энергии применяются для решения задачи о движении тел после столкновения: по известным импульсам и энергиям до столкновения определяются значения этих величин после столкновения. Рассмотрим случаи упругого и неупругого ударов.

Абсолютно неупругим называется удар, после которого тела образуют единое тело, движущееся с определённой скоростью. Задача о скорости последнего решается с помощью закона сохранения импульса системы тел  $m_1$  и  $m_2$  (если речь идёт о двух телах) до и после удара:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}.$$

Очевидно, что кинетическая энергия тел при неупругом ударе не сохраняется (например, при  $\vec{v}_1 = -\vec{v}_2$  и  $m_1 = m_2$  она становится равной нулю после удара).

Абсолютно упругим называется удар, при котором сохраняется не только сумма импульсов, но и сумма кинетических энергий ударяющихся тел.

Для абсолютно упругого удара справедливы уравнения:

$$\frac{m_1 \vec{v}_1}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2}{2} = \frac{m_1 \vec{v}_1'}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2'}{2},$$

где  $m_1, m_2$  — массы шаров,  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$  — скорости шаров до удара,  $\vec{v}'_1, \vec{v}'_2$  — скорости шаров после удара.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

◆ Закончите предложения.

1. Величина, равная произведению массы тела на его скорость, называется

2. Единица импульса в СИ равна:

$$[p] = \frac{1}{\kappa \Gamma}.$$

♦ Запишите закон сохранения импульса системы трёх тел  $m_1, m_2, m_3$ .

[illegible]

## Ответы на тестовые задания (неделя 8)

**1—2. 2—3. 3—1. 4—3. 5—3. 6—2. 7—4.**



### Работа силы

Термин «работа» был введён в физику в 1826 г. французским учёным Ж. Понселе. Если в обыденной жизни работой называют лишь труд человека, то в физике и, в частности, в механике принято считать, что работу совершает сила. Физическую величину работы обычно обозначают буквой  $A$ .

*Работа силы* — это мера действия силы, зависящая от её модуля и направления, а также от перемещения точки приложения силы. Для постоянной силы и прямолинейного перемещения работа определяется равенством:

$$A = F |\Delta \vec{r}| \cos \alpha,$$

где  $F$  — сила, действующая на тело,  $\Delta \vec{r}$  — перемещение,  $\alpha$  — угол между силой и перемещением (рис. 42).

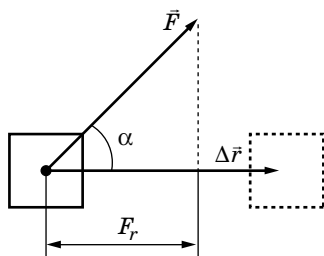


Рис. 42

Работа силы равна произведению модулей силы и перемещения и косинуса угла между ними, т. е. скалярному произведению векторов  $\vec{F}$  и  $\Delta \vec{r}$ .

Работа — величина скалярная. Если  $\alpha < 90^\circ$ , то  $A > 0$ , а если  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ , то  $A < 0$ ; если же  $\alpha = 90^\circ$ , то  $A = 0$ . Так, сила тяжести не совершает работу при перемещении тела по горизонтальной плоскости. Также при движении спутника по круговой орбите сила тяготения не совершает работу.

При действии на тело нескольких сил полная работа (сумма работ всех сил) равна работе результирующей силы.

Единицей работы в СИ является **джоуль** (1 Дж). 1 Дж — это работа, которую совершает сила в 1 Н на пути в 1 м в направлении действия этой силы. Эта единица названа в честь английского учёного Дж. Джоуля (1818–1889): 1 Дж = 1 Н · м. Часто применяются также килоджоули и миллиджоули: 1 кДж = 1000 Дж, 1 мДж = 0,001 Дж.

### Работа силы тяжести

Рассмотрим тело, скользящее по наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha$  и высотой  $H$  (рис. 43). Выразим  $\Delta x$  через  $H$  и  $\alpha$ :

$$\Delta x = \frac{H}{\sin \alpha}. \quad (1.43)$$

Учитывая что сила тяжести  $F_T = mg$  составляет угол  $(90^\circ - \alpha)$  с направлением перемещения и используя формулу (1.43), получим выражение для работы силы тяжести  $A_g$ :

$$A_g = mg \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \frac{H}{\sin \alpha} = mgH.$$

Из этой формулы видно, что работа силы тяжести зависит от высоты и не зависит от угла наклона плоскости. Отсюда следует, что:

- 1) работа силы тяжести не зависит от формы траектории, по которой движется тело, а лишь от начального и конечного положения тела;
- 2) при перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю, т. е. сила тяжести — консервативная сила (консервативными называются силы, обладающие таким свойством).

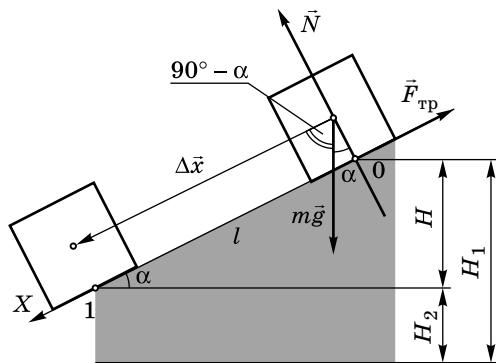


Рис. 43

Работа сил реакции, как следует из рис. 43, равна нулю, поскольку сила реакции ( $N$ ) направлена перпендикулярно перемещению  $\Delta x$ .

### Работа силы трения

Сила трения направлена противоположно перемещению  $\Delta x$  и составляет с ним угол  $180^\circ$  (рис. 43), поэтому работа силы трения отрицательна:

$$A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \Delta x \cdot \cos 180^\circ = -F_{\text{тр}} \cdot \Delta x.$$

Так как  $F_{\text{тр}} = \mu N$ ,  $N = mg \cdot \cos \alpha$ ,  $\Delta x = l = \frac{H}{\sin \alpha}$ , то

$$A_{\text{тр}} = \mu mgH \operatorname{ctg} \alpha.$$

### Работа силы упругости

Пусть на нерастянутую пружину длиной  $l_0$  действует внешняя сила  $\vec{F}$ , растягивая её на  $\Delta l_0 = x_0$  (рис. 44). В положении  $x = x_0$   $F_{\text{упр}} = kx_0$ . После прекращения действия силы  $\vec{F}$  в точке  $x_0$  пружина под действием силы  $F_{\text{упр}}$  сжимается.

Определим работу силы упругости при изменении координаты правого конца пружины от  $x_0$  до  $x$ . Поскольку

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Найти работу, которую совершает человек, поднимая груз массой 20 кг над высоту 2 м.
  - 1) 200 Дж
  - 2) 2 кДж
  - 3) 4 кДж
  - 4) 400 Дж
2. Какую работу нужно произвести для того, чтобы сжать пружину на 5 см, если для сжатия её на 2 см необходима сила 50 Н?
  - 1) 3,154 Дж
  - 2) 3,125 Дж
  - 3) 3,254 Дж
  - 4) 3,225 Дж
3. Человек передвигает груз, прикладывая силу 300 Н. Какую работу совершает человек, переместив груз на 10 м?
  - 1) 2,5 кН
  - 2) 2 кН
  - 3) 1,5 кН
  - 4) 3 кН
4. Чтобы поднять из канавы камень объёмом  $0,6 \text{ м}^3$ , совершили работу 45 кДж. На какой глубине находится камень, если плотность камня равна  $2500 \text{ кг/м}^3$ ?
  - 1) 5 м
  - 2) 3 м
  - 3) 6 м
  - 4) 2 м
5. Человек, поднимая ведро воды массой 20 кг за 5 с, развил мощность 80 Вт. На какую высоту человек поднял ведро?
  - 1) 2 м
  - 2) 4 м
  - 3) 5 м
  - 4) 8 м
6. Тело движется со скоростью 36 км/ч. Найти силу сопротивления движению, если тело развило мощность 40 кВт.
  - 1) 200 Н
  - 2) 400 Н
  - 3) 2 кН
  - 4) 4 кН

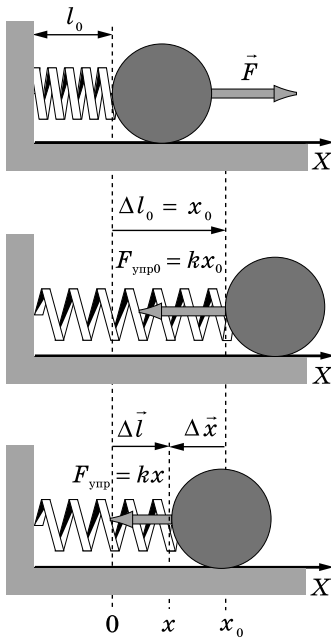


Рис. 44

сила упругости на этом участке изменяется линейно, в законе Гука можно использовать её среднее значение на этом участке:

$$F_{\text{упр. ср}} = \frac{kx_0 + kx}{2} = \frac{k}{2}(x_0 + x).$$

Тогда работа (с учётом того что направления  $\vec{F}_{\text{упр. ср}}$  и  $\vec{\Delta x}$  совпадают) равна:

$$A_{\text{упр}} = \frac{k}{2}(x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Можно показать, что вид последней формулы не зависит от угла между  $\vec{F}_{\text{упр}}$  и  $\vec{\Delta x}$ . Работа сил упругости зависит лишь от деформаций пружины в начальном и конечном состояниях.

Таким образом, сила упругости, подобно силе тяжести, является консервативной силой.

## Мощность

**Мощность** — физическая величина, измеряемая отношением работы к промежутку времени, в течение которого она произведена.

Другими словами, мощность показывает, какая работа совершается за единицу времени (в СИ — за 1 с). Мощность определяется формулой:

$$N = \frac{A}{\Delta t}, \quad (1.52)$$

где  $N$  — мощность,  $A$  — работа, совершённая за время  $\Delta t$ .

Подставив в формулу (1.52) вместо работы  $A$  её выражение  $A = F|\Delta \vec{r}|\cos \alpha$ , получим:

$$N = \frac{F|\Delta \vec{r}|\cos \alpha}{\Delta t} = Fv \cos \alpha.$$

**Мощность равна произведению модулей векторов силы и скорости на косинус угла между этими векторами.**

Мощность в системе СИ измеряется в **ваттах** (Вт). Один ватт (1 Вт) — это такая мощность, при которой за 1 с совершается работа 1 Дж: 1 Вт = 1 Дж/с.

Эта единица названа в честь английского изобретателя Дж. Ватта (Уатта), построившего первую паровую машину. Сам Дж. Ватт (1736–1819) пользовался другой единицей мощности — лошадиной силой (л. с.), которую он ввёл для того, чтобы можно было сравнивать работоспособности паровой машины и лошади: 1 л. с. = 735,5 Вт.

В технике часто применяются более крупные единицы мощности — киловатт и мегаватт: 1 кВт = 1000 Вт, 1 МВт = 1 000 000 Вт.

## Простые механизмы. КПД механизмов

**Простыми механизмами** называются приспособления, изменяющие величину или направление приложенных к телу сил.

Они применяются для перемещения или подъёма больших грузов с помощью небольших усилий. К ним относятся рычаг и его разновидности — блоки (подвижный и неподвижный), ворот, наклонная плоскость и её разновидности — клин, винт и др.

Рычаг представляет собой твёрдое тело, способное вращаться вокруг неподвижной опоры (рис. 45).

Правило рычага гласит:

**Рычаг находится в равновесии, если приложенные к нему силы обратно пропорциональны их плечам:**

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (1.53)$$

Из формулы (1.53), применив к ней свойство пропорции (произведение крайних членов пропорции равно произведению её средних членов), можно получить такую формулу:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2.$$

Но  $F_1 l_1 = M_1$  — момент силы, стремящейся повернуть рычаг по часовой стрелке, а  $F_2 l_2 = M_2$  — момент силы, стремящейся повернуть рычаг против часовой стрелки. Таким образом,  $M_1 = M_2$ , что и требовалось доказать.

Рычаг начал применяться людьми в глубокой древности. С его помощью удавалось поднимать тяжёлые каменные плиты при постройке пирамид в Древнем Египте. Без рычага это было бы невозможно. Ведь, например, для возведения пирамиды Хеопса, имеющей высоту 147 м, было использовано более двух миллионов каменных глыб, самая меньшая из которых имела массу 2,5 тонны!

В наше время рычаги находят широкое применение как на производстве (например, подъёмные краны), так и в быту (ножницы, кусачки, весы).

Действие неподвижного блока (рис. 46) аналогично действию рычага с равными плечами:  $l_1 = l_2 = r$ . Приложенная сила  $F_1$  равна нагрузке  $F_2$ , и условие равновесия имеет вид:

$$F_1 = F_2.$$

Неподвижный блок применяют, когда нужно изменить направление силы, не меняя её величину.

Подвижный блок (рис. 47) действует аналогично рычагу, плечи которого составляют:  $l_2 = l_1 / 2 = r$ . При этом условие равновесия имеет вид:

$$F_1 = \frac{F_2}{2},$$

где  $F_1$  — приложенная сила,  $F_2$  — нагрузка. Применение подвижного блока даёт выигрыш в силе в два раза.

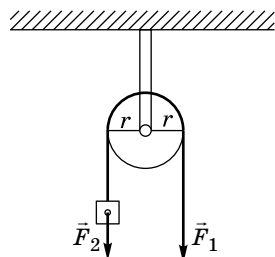


Рис. 46

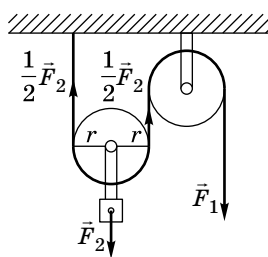


Рис. 47

Обычный полиспаст (рис. 48) состоит из  $n$  подвижных и  $n$  неподвижных блоков. Его применение даёт выигрыш в силе в  $2n$  раз:

$$F_1 = \frac{F_2}{2n}.$$

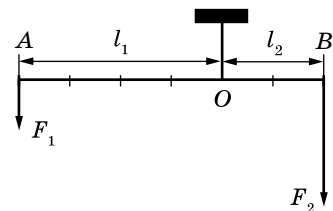


Рис. 45

Степенной полиспаст (рис. 49) состоит из  $n$  подвижных и одного неподвижного блока. Применение степенного полиспаста даёт выигрыш в силе в  $2^n$  раз:

$$F_1 = \frac{F_2}{2^n}.$$

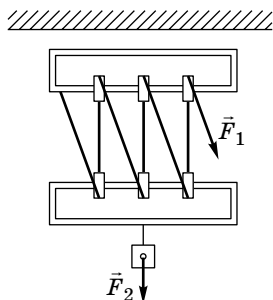


Рис. 48

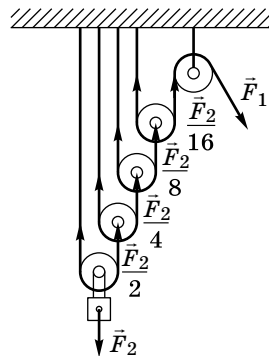
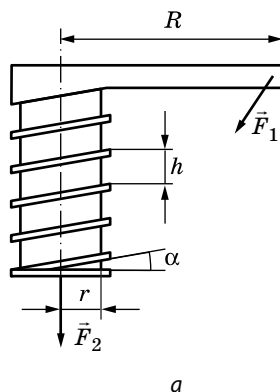


Рис. 49

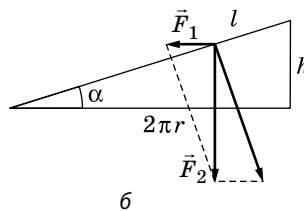
Винт представляет собой наклонную плоскость, навитую на ось (рис 50, а). Условие равновесия сил, действующих на винт (рис 50, б), имеет вид:

$$F_1 = \frac{F_2 h}{2\pi r} = F_2 \operatorname{tg} \alpha, \quad F_1 = \frac{F_2 h}{2\pi R},$$

где  $F_1$  — внешняя сила, приложенная к винту и действующая на расстоянии  $R$  от его оси;  $F_2$  — сила, действующая в направлении оси винта;  $h$  — шаг винта;  $r$  — средний радиус резьбы;  $\alpha$  — угол наклона резьбы.  $R$  — длина рычага (гаечного ключа), вращающего винт с силой  $F_1$ .



а



б

Рис. 50

**Коэффициент полезного действия (КПД)** — отношение полезной работы ко всей затраченной работе. Его часто выражают в процентах и обозначают греческой буквой  $\eta$  («эта»):

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\%,$$

где  $A_{\text{п}}$  — полезная работа,  $A_{\text{з}}$  — вся затраченная работа.

Полезная работа всегда составляет лишь часть полной работы, которую затрачивает человек, используя тот или иной механизм.

Часть совершённой работы тратится на преодоление сил трения. Поскольку  $A_3 > A_{\text{п}}$ , КПД всегда меньше 1 (или  $< 100\%$ ).

Когда КПД немного меньше 1, можно считать, что затраченная работа примерно равна полезной:  $A_3 \approx A_{\text{п}}$ .

Поскольку каждую из работ в этом равенстве можно выразить в виде произведения соответствующей силы на пройденный путь, то его можно переписать так:  $F_1 s_1 \approx F_2 s_2$ .

Отсюда следует, что, выигрывая с помощью механизма в силе, мы во столько же раз проигрываем в пути, и наоборот. Этот закон называют **золотым правилом механики**.

Золотое правило механики является приближенным законом, так как в нём не учитывается работа по преодолению трения и силы тяжести частей используемых приспособлений. Тем не менее оно бывает очень полезным при анализе работы любого простого механизма.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните схему.

Работа против сил		
Сила тяжести	Сила упругости	Сила трения
$A_{\text{т}} =$	$A_{\text{упр}} =$	$A_{\text{тр}} =$

♦ Заполните пропуски в формуле для мощности.

$$N = F \underline{\hspace{1cm}} \cos \alpha.$$

Ответы на тестовые задания (неделя 9)

1 — 4. 2 — 2. 3 — 4. 4 — 2. 5 — 1. 6 — 4.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
**9**  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

- 1.4. Законы сохранения в механике
- 1.4.7. Кинетическая энергия
- 1.4.8. Потенциальная энергия
- 1.4.9. Закон сохранения механической энергии

## Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии

Если тело или несколько взаимодействующих между собой тел (система тел) могут совершать работу, то говорят, что они обладают энергией.

Слово «энергия» (от греч. *energia* — действие, деятельность) нередко употребляется в быту. Так, например, людей, которые могут быстро выполнять работу, называют энергичными, обладающими большой энергией.

### Кинетическая энергия

Энергия, которой обладает тело при движении, называется **кинетической энергией**. Как и в случае определения энергии вообще, о кинетической энергии можно сказать, что кинетическая энергия — это способность движущегося тела совершать работу.

Найдём кинетическую энергию тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ . Поскольку кинетическая энергия — это энергия, обусловленная движением, нулевым состоянием для неё является то состояние, в котором тело покоится. Найдя работу, необходимую для сообщения телу данной скорости, мы найдём его кинетическую энергию.

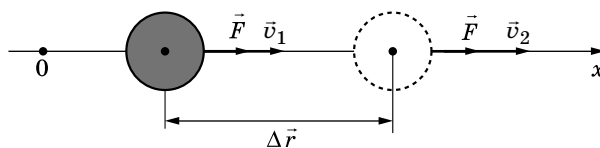


Рис. 51

Для этого подсчитаем работу на участке перемещения  $\Delta \vec{r}$  при совпадении направлений векторов силы  $\vec{F}$  и перемещения  $\Delta \vec{r}$  (рис. 51). В этом случае работа равна

$$A = F \cdot \Delta x, \quad (1.44)$$

где  $\Delta x = \Delta r$ .

Для движения точки с ускорением  $a = \text{const}$  выражение для перемещения имеет вид:

$$\Delta x = v_1 t + \frac{at^2}{2}, \quad (1.45)$$

где  $v_1$  — начальная скорость.

Подставив в уравнение (1.44) выражение для  $\Delta x$  из (1.45) и воспользовавшись вторым законом Ньютона  $F = ma$ , получим:

$$A = ma \left( v_1 t + \frac{at^2}{2} \right) = \frac{mat}{2} (2v_1 + at). \quad (1.46)$$

Выразив ускорение через начальную  $v_1$  и конечную  $v_2$  скорости  $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$  и подставив в (1.46), имеем:

$$A = \frac{m(v_2 - v_1)}{2} \cdot (2v_1 + v_2 - v_1)$$

или

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Приравняв теперь начальную скорость к нулю:  $v_1 = 0$ , получим выражение для *кинетической энергии*:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.47)$$

Таким образом, движущееся тело обладает кинетической энергией. Эта энергия равна работе, которую необходимо совершить, чтобы увеличить скорость тела от нуля до значения  $v$ .

Из (1.47) следует, что работа силы по перемещению тела из одного положения в другое равна изменению кинетической энергии:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k. \quad (1.48)$$

Равенство (1.48) выражает **теорему об изменении кинетической энергии**:

**Изменение кинетической энергии тела (материальной точки) за некоторый промежуток времени равно работе, совершённой за это время силой, действующей на тело.**

## Потенциальная энергия

**Потенциальной энергией** называется энергия, определяемая взаимным расположением взаимодействующих тел или частей одного и того же тела.

Поскольку энергия определяется как способность тела совершать работу, то потенциальную энергию, естественно, определяют как работу силы, зависящую только от взаимного расположения тел. Таковой является работа силы тяжести  $A = mgh_1 - mgh_2 = mgH$  и работа силы упругости:

$$A = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальной энергией тела, взаимодействующего с Землёй, называют величину, равную произведению массы  $m$  этого тела на ускорение свободного падения  $g$  и на высоту  $h$  тела над поверхностью Земли:

$$E_p = mgh. \quad (1.49)$$

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Во сколько раз увеличится кинетическая энергия тела, если его скорость увеличилась от 2 м/с до 4 м/с?
  - в 2 раза
  - в 6 раз
  - в 4 раза
  - не изменится
- Мяч брошен вверх со скоростью 2 м/с, в верхней точке его кинетическая энергия равна 0, т. е. в верхней точке — точке остановки — скорость равна 0. Вся кинетическая энергия переходит в потенциальную 4 Дж. Найти массу мяча.
  - 2 кг
  - 4 кг
  - 6 кг
  - 8 кг
- Тело подняли на высоту 3 м. Найти массу тела, если потенциальная энергия его равна 6 кДж.
  - 2 кг
  - 20 кг
  - 200 кг
  - 2000 кг
- Во сколько раз увеличилась потенциальная энергия пружины, если её удлинение увеличилось в 4 раза?
  - в 2 раза
  - в 4 раза
  - в 8 раз
  - в 16 раз
- Камень бросили вертикально вверх со скоростью 36 км/ч. На какой высоте его кинетическая энергия равна потенциальной энергии?
  - 1,5 м
  - 2,5 м
  - 9 м
  - 7 м
- На какую высоту поднимется мяч после удара, если его скорость изменилась от 40 м/с до 20 м/с?
  - 20 м
  - 40 м
  - 60 м
  - 80 м

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
**10**  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36



Потенциальной энергией упруго деформированного тела называют величину, равную половине произведения коэффициента упругости (жёсткости)  $k$  тела на квадрат деформации  $\Delta l$ :

$$E_p = \frac{1}{2} k \Delta l^2. \quad (1.50)$$

Работа консервативных сил (тяжести и упругости) с учётом (1.49) и (1.50) выражается следующим образом:

$$A = E_{p_1} - E_{p_2} = -(E_{p_2} - E_{p_1}) = -\Delta E_p. \quad (1.51)$$

Эта формула позволяет дать общее определение потенциальной энергии:

**Потенциальной энергией системы называется зависящая от положения тел величина, изменение которой при переходе системы из начального состояния в конечное равно работе внутренних консервативных сил системы, взятой с противоположным знаком.**

Знак «минус» в правой части уравнения (1.51) означает, что при совершении работы внутренними силами (например, падение тела на землю под действием силы тяжести в системе «камень — Земля») энергия системы убывает. Работа и изменение потенциальной энергии в системе всегда имеют противоположные знаки.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии (см. (1.51)), то физический смысл в механике имеет только изменение энергии. Поэтому выбор нулевого уровня энергии произволен и определяется исключительно соображениями удобства, например, простотой записи соответствующих уравнений.

### Закон сохранения механической энергии

**Полной механической энергией системы называется сумма её кинетической и потенциальной энергий:**

$$E = E_k + E_p.$$

Она определяется положением тел (потенциальная энергия) и их скоростью (кинетическая энергия).

Согласно теореме о кинетической энергии,

$$E_k - E_{k_1} = A_p + A_{np},$$

где  $A_p$  — работа потенциальных сил,  $A_{np}$  — работа непотенциальных сил.

В свою очередь, работа потенциальных сил равна разности потенциальной энергии тела в начальном  $E_{p_1}$  и конечном  $E_{p_2}$  состояниях. Учитывая это, получим выражение для закона изменения механической энергии:

$$(E_k + E_p) - (E_{k_1} + E_{p_1}) = A_{np}.$$

где левая часть равенства — изменение полной механической энергии, а правая — работа непотенциальных сил.

Итак, закон изменения механической энергии гласит:

**Изменение механической энергии системы равно работе всех непотенциальных сил.**

Механическая система, в которой действуют только потенциальные силы, называется консервативной. В ней  $A_{np} = 0$ . Отсюда следует закон сохранения механической энергии:

**В замкнутой консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем):**

$$E_k + E_p = E_{k_1} + E_{p_1}.$$

Закон сохранения механической энергии выводится из законов механики Ньютона, которые применимы для системы материальных точек (или макрочастиц). Однако он справедлив и для системы микрочастиц, где сами законы Ньютона уже не действуют.

Закон сохранения механической энергии является следствием *однородности времени*, которое заключается в том, что при одинаковых начальных условиях протекание физических процессов не зависит от того, в какой момент времени эти условия созданы.

Закон сохранения механической энергии означает, что при изменении кинетической энергии в консервативной системе должна меняться и её потенциальная энергия, так что их сумма остаётся постоянной. Это означает возможность превращения одного вида энергии в другой.

В соответствии с различными формами движения материи рассматривают различные виды энергии: механическую, внутреннюю (равную сумме кинетической энергии хаотического движения молекул относительно центра масс тела и потенциальной энергии взаимодействия молекул друг с другом), электромагнитную, химическую (которая складывается из кинетической энергии движения электронов и электрической энергии их взаимодействия друг с другом и с атомными ядрами), ядерную и пр. Из сказанного видно, что деление энергии на разные виды достаточно условно.

В настоящее время понятие энергии является одним из основных понятий физики и неразрывно связано с представлением о превращении одной формы движения в другую.

Вот как в современной физике формулируется понятие энергии:

**Энергия** — общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую. Понятие энергии связывает воедино все явления природы.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

### ♦ Закончите предложение.

Закон сохранения механической энергии гласит: \_\_\_\_\_

### ♦ Заполните схему.



Ответы на тестовые задания (неделя 10) \_\_\_\_\_

1 — 2. 2 — 1. 3 — 3. 4 — 4. 5 — 2. 6 — 3.

- 1.5. Механические колебания и волны
- 1.5.1. Гармонические колебания
- 1.5.2. Амплитуда и фаза колебаний
- 1.5.3. Период колебаний
- 1.5.4. Частота колебаний
- 1.5.5. Свободные колебания (математический и пружинный маятники)

## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Механические колебания

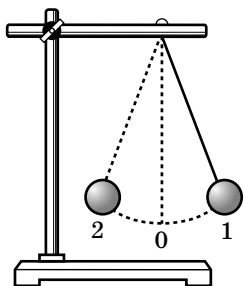


Рис. 52

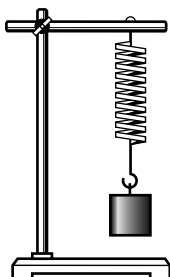


Рис. 53

**Колебания** — это движения или состояния, повторяющиеся во времени. Колебания являются очень распространённым видом движения. Это покачивание веток деревьев на ветру, вибрация струн музыкальных инструментов, движение поршня в цилиндре двигателя автомобиля, качание маятника в настенных часах и даже биеение нашего сердца, пульсация излучения звёзд, внутри которых происходят циклические ядерные реакции, приливы и отливы на Земле, вызываемые движением Луны. Колебания свойственны практически всем явлениям природы.

Одним из видов колебаний, особо выделяемых в физике, являются механические колебания.

Рассмотрим колебательное движение на примере двух маятников — нитяного и пружинного.

Нитяной маятник изображён на рис. 52. Он представляет собой шарик, прикреплённый к легкой тонкой нити. Если этот шарик сместить в сторону от положения равновесия и отпустить, то он начнёт колебаться, т. е. совершать колебательные движения, периодически проходя через положение равновесия.

На рис. 53 изображён пружинный маятник. Он представляет собой груз, способный колебаться под действием силы упругости.

Колебательное движение характеризуют **амплитудой  $A$** , **периодом  $T$**  и **частотой колебаний  $\nu$** .

### Амплитуда колебаний

**Амплитуда колебаний** (от лат. *amplitude* — величина) — это наибольшее отклонение колеблющегося тела от положения равновесия.

Для маятника это максимальное расстояние, на которое удаляется шарик от своего положения равновесия (рис. 52). Для колебаний с малыми амплитудами за такое расстояние можно принимать как длину дуги  $O1$  или  $O2$ , так и длины этих отрезков.

Амплитуда колебаний измеряется в единицах длины — метрах, сантиметрах и т. д. На графике колебаний амплитуда определяется как максимальная (по модулю) ордината синусоидальной кривой (см. рис. 56).

## Период колебаний

**Период колебаний** — это наименьший промежуток времени, через который система, совершающая колебания, снова возвращается в то же состояние, в котором она находилась в начальный момент времени.

Другими словами, **период колебаний ( $T$ )** — это время, за которое совершается одно полное колебание. Например, на рис. 54 это время, за которое грузик маятника перемещается из крайней правой точки через точку равновесия  $O$  в крайнюю левую точку и обратно через точку  $O$  снова в крайнюю правую. За полный период колебаний, таким образом, тело проходит путь, равный четырём амплитудам. Период колебаний измеряется в единицах времени — секундах, минутах и т. д. Период колебаний может быть определён по известному графику колебаний (см. рис. 56).

Понятие «период колебаний», строго говоря, справедливо, лишь когда значения колеблющейся величины точно повторяются через определённый промежуток времени, т. е. для гармонических колебаний. Однако это понятие применяется также и для случаев приблизительно повторяющихся величин, например для затухающих колебаний.

## Частота колебаний

**Частота колебаний** — это число колебаний, совершаемых за единицу времени, например за 1 с.

Единица частоты в СИ названа **герцем (Гц)** в честь немецкого физика Г. Герца (1857–1894). Если частота колебаний ( $\nu$ ) равна 1 Гц, то это значит, что за каждую секунду совершается одно колебание. Частота и период колебаний связаны соотношениями:

$$T = 1/\nu, \nu = 1/T.$$

В теории колебаний пользуются также понятием циклической, или круговой, частоты  $\omega$ . Она связана с обычной частотой  $\nu$  и периодом колебаний  $T$  соотношениями:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

**Циклическая частота** — это число колебаний, совершаемых за  $2\pi$  секунд.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Тело за 30 минут совершило 100 колебаний. Найти период колебаний.

1) 0,3 с                      3) 18 с  
2) 3 мин                    4) 18 мин

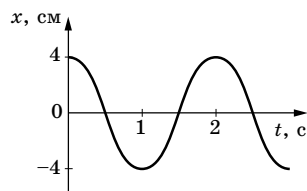
2. Колебания описываются формулой  $x = 0,5 \cos 5t$  м. Чему равна амплитуда колебания?

1) 0,5 см                    3) 50 см  
2) 5 см                     4) 5 м

3. Сколько колебаний совершило тело за 10 мин, если частота колебания равна 20 Гц?

1) 10 000                    3) 14 000  
2) 12 000                    4) 16 000

4. На рисунке показан график гармонического колебания. Найти частоту колебания.



1) 0,5 Гц                    3) 4 Гц  
2) 2 Гц                     4) 1 Гц

5. Груз массой 100 г, подвешенный на пружине, совершает за 20 с 100 колебаний. Найти жёсткость пружины.

1) 50 Н/м                    3) 150 Н/м  
2) 100 Н/м                   4) 300 Н/м

6. Тело на нитке за 40 с совершает 100 колебаний. Найти длину нити.

1) 0,04 м  
2) 0,02 м  
3) 0,06 м  
4) 0,01 м

7. Тело на пружине жёсткостью 100 Н/м совершает колебания. Найти массу тела, если амплитуда его колебаний равна 5 см, а наибольшая скорость — 2 м/с.

1) 0,02 кг  
2) 0,04 кг  
3) 0,06 кг  
4) 0,08 кг

## Гармонические колебания

**Гармонические колебания** — это колебания, при которых физическая величина меняется во времени по синусоидальному закону:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $x$  — значение колеблющейся величины в момент времени  $t$ ,  $A$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота,  $\varphi$  — начальная фаза колебаний,  $(\omega t + \varphi)$  — полная фаза колебаний. При этом величины  $A$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  — постоянные.

Для механических колебаний колеблющейся величиной  $x$  являются, в частности, смещение и скорость, для электрических колебаний — напряжение и сила тока.

Гармонические колебания занимают особое место среди всех видов колебаний, т. к. это единственный тип колебаний, форма которых не искажается при прохождении через любую однородную среду, т. е. волны, распространяющиеся от источника гармонических колебаний, также будут гармоническими. Любое негармоническое колебание может быть представлено в виде сумм (интеграла) различных гармонических колебаний (в виде спектра гармонических колебаний).

В процессе колебаний происходит переход потенциальной энергии  $W_p$  в кинетическую  $W_k$  и наоборот. В положении максимального отклонения от положения равновесия потенциальная энергия максимальна, кинетическая равна нулю. По мере возвращения к положению равновесия скорость колеблющегося тела растёт, а вместе с ней растёт и кинетическая энергия, достигая максимума в положении равновесия. Потенциальная энергия при этом падает до нуля. Дальнейшее движение происходит с уменьшением скорости, которая падает до нуля, когда отклонение достигает своего второго максимума. Потенциальная энергия здесь увеличивается до своего первоначального (максимального) значения (при отсутствии трения). Таким образом, колебания кинетической и потенциальной энергий происходят с удвоенной (по сравнению с колебаниями самого маятника) частотой и находятся в противофазе (т. е. между ними существует сдвиг фаз, равный  $\pi$ ). Полная энергия колебаний  $W$  остаётся неизменной. Для тела, колеблющегося под действием силы упругости, она равна:

$$E = E_p + E_k = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2},$$

где  $v_m$  — максимальная скорость тела (в положении равновесия),  $x_m = A$  — амплитуда.

Из-за наличия трения и сопротивления среды свободные колебания затухают: их энергия и амплитуда с течением времени уменьшаются. Поэтому на практике чаще используют не свободные, а вынужденные колебания.

## Свободные колебания

**Свободные колебания** (или собственные колебания) — это колебания колебательной системы, совершаемые только благодаря первоначально сообщённой энергии (потенциальной или кинетической) при отсутствии внешних воздействий.

Условиями возникновения свободных колебаний являются:

- 1) возникновение в них силы, возвращающей систему в положение устойчивого равновесия, после того как её вывели из этого состояния;
- 2) отсутствие трения в системе.

Потенциальная или кинетическая энергия может быть сообщена, например, в механических системах через начальное смещение или начальную скорость.

Свободно колеблющиеся тела всегда взаимодействуют с другими телами и вместе с ними образуют систему тел, которая называется колебательной системой.

Например, пружина, шарик и вертикальная стойка, к которой прикреплен верхний конец пружины (см. рис. 54), входят в колебательную систему «Пружинный маятник». Здесь шарик свободно скользит по струне (силы трения пренебрежимо малы). Если отвести шарик вправо и предоставить его самому себе, он будет совершать свободные колебания около положения равновесия (точки  $O$ ) вследствие действия силы упругости пружины, направленной к положению равновесия.

Другим классическим примером механической колебательной системы является математический маятник (см. рис. 55). В данном случае шарик совершает свободные колебания под действием двух сил: силы тяжести и силы упругости нити (в колебательную систему входит также Земля). Их равнодействующая направлена к положению равновесия. Силы, действующие между телами колебательной системы, называются **внутренними силами**. **Внешними силами** называются силы, действующие на систему со стороны тел, не входящих в неё.

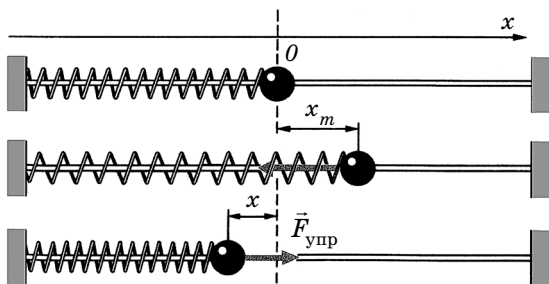


Рис. 54

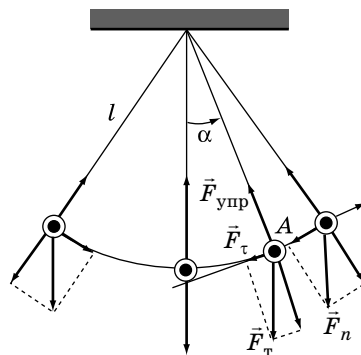


Рис. 55

## Динамика свободных колебаний

**Колебания тела под действием сил упругости.** Уравнение колебательного движения тела под действием силы упругости  $F_{\text{упр}}$  (рис. 54) может быть получено с учётом второго закона Ньютона ( $F = ma$ ) и закона Гука ( $F_{\text{упр}} = -kx$ ), где  $m$  — масса шарика,  $a$  — ускорение, приобретаемое шариком под действием силы упругости,  $k$  — коэффициент жёсткости пружины,  $x$  — смещение тела от положения равновесия (оба уравнения записаны в проекции на горизонтальную ось  $Ox$ ). Приравняв правые части этих уравнений и учитывая, что ускорение  $a$  — это вторая производная от координаты  $x$  (смещения), получим:

$$x'' = -\frac{k}{m}x. \quad (1.54)$$

Это дифференциальное уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости: **Вторая производная координаты по времени (ускорение тела) прямо пропорциональна его координате, взятой с противоположным знаком.**

**Колебания математического маятника.** Для получения уравнения колебания математического маятника (см. рис. 55) необходимо разложить силу тяжести  $F_T = mg$  на нормальную  $F_n$  (направленную вдоль нити) и тангенциальную  $F_\tau$  (касательную к траектории движения шарика — окружности) составляющие. Нормальная составляющая силы тяжести  $F_n$  и сила упругости нити  $F_{\text{упр}}$  в сумме сообщают маятнику центростремительное ускорение, не влияющее на величину скорости, а лишь меняющее её направление, а тангенциальная

составляющая  $F_\tau$  является той силой, которая возвращает шарик в положение равновесия и заставляет его совершать колебательные движения. Используя, как и в предыдущем случае, закон Ньютона для тангенциального ускорения  $ma_\tau = F_\tau$  и учитывая, что  $F_\tau = -mg \sin \alpha$ , получим:

$$a_\tau = -g \sin \alpha.$$

Знак минус появился потому, что сила и угол отклонения от положения равновесия  $\alpha$  имеют противоположные знаки. Для малых углов отклонения  $\sin \alpha \approx \alpha$ . В свою очередь,  $\alpha = s/l$ , где  $s$  — дуга  $OA$ ,  $l$  — длина нити. Учитывая, что  $a_\tau = s''$ , окончательно получим:

$$s'' = \frac{g}{l} s. \quad (1.55)$$

Вид уравнения (1.55) аналогичен уравнению (1.54). Только здесь параметрами системы являются длина нити и ускорение свободного падения, а не жёсткость пружины и масса шарика; роль координаты играет длина дуги (т.е. пройденный путь, как и в первом случае).

**Свободные колебания описываются уравнениями одного вида (подчиняются одним и тем же законам) независимо от физической природы сил, вызывающих эти колебания.**

Решением уравнений (1.54) и (1.55) является функция вида:

$$x = x_m \cos \omega_0 t \text{ (или } x = x_m \sin \omega_0 t \text{)}. \quad (1.56)$$

Координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по закону косинуса или синуса, и, следовательно, эти колебания являются гармоническими (рис. 56).

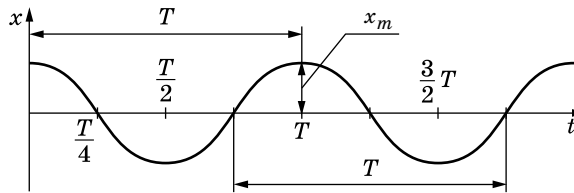


Рис. 56

В уравнении (1.56)  $x_m$  — амплитуда колебания,  $\omega_0$  — собственная циклическая (круговая) частота колебаний.

Циклическая частота и период свободных гармонических колебаний определяются свойствами системы. Так, для колебаний тела, прикреплённого к пружине, справедливы соотношения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Собственная частота тем больше, чем больше жёсткость пружины или меньше масса груза, что вполне подтверждается опытом.

Для математического маятника выполняются равенства:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Эта формула была впервые получена и проверена на опыте голландским учёным Гюйгенсом (современником Ньютона).

Период колебаний возрастает с увеличением длины маятника и не зависит от его массы.

Следует особо обратить внимание на то, что гармонические колебания являются строго периодическими (т.к. подчиняются закону синуса или косинуса) и даже для математического

маятника, являющегося идеализацией реального (физического) маятника, возможны только при малых углах колебания. Если углы отклонения велики, смещение груза не будет пропорционально углу отклонения (синусу угла) и ускорение не будет пропорционально смещению.

Скорость и ускорение тела, совершающего свободные колебания, также будут совершать гармонические колебания. Беря производную по времени функции (1.56), получим выражение для скорости:

$$v = -v_m \sin \omega_0 t = v_m \cos(\omega_0 t + \pi/2), \quad (1.57)$$

где  $v_m = \omega_0 x_m$  — амплитуда скорости.

Аналогично выражение для ускорения  $a$  получим, дифференцируя (1.57):

$$a = -a_m \cos \omega_0 t,$$

где  $a_m = \omega_0^2 x_m$  — амплитуда ускорения. Таким образом, амплитуда скорости гармонических колебаний пропорциональна частоте, а амплитуда ускорения — квадрату частоты колебания.

## Фаза колебаний

**Фаза колебаний** — это аргумент периодически изменяющейся функции, описывающей колебательный или волновой процесс.

Для гармонических колебаний

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1.58)$$

где  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  — фаза колебания,  $A$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота,  $t$  — время,  $\varphi_0$  — начальная (фиксированная) фаза колебания: в момент времени  $t = 0$   $\varphi = \varphi_0$ . Фаза выражается в радианах.

Фаза гармонического колебания при постоянной амплитуде определяет не только координату колеблющегося тела в любой момент времени, но и скорость и ускорение, которые тоже изменяются по гармоническому закону (скорость и ускорение гармонических колебаний — это первая и вторая производные по времени функции (1.58), которые, как известно, снова дают синус и косинус). Поэтому можно сказать, что **фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени**.

Два колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут отличаться друг от друга фазами. Так как  $\omega = 2\pi/T$ , то

$$\varphi - \varphi_0 = \omega t = 2\pi t/T.$$

Отношение  $t/T$  показывает, какая часть периода прошла от момента начала колебаний. Любому значению времени, выраженному в долях периода, соответствует значение фазы, выраженной в радианах (рис. 57). Сплошная кривая на рис. 57 — это зависимость координаты от времени и одновременно от фазы колебаний (верхние и нижние значения на оси абсцисс соответственно) для точки, совершающей гармонические колебания по закону:

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \quad (1.59)$$

Здесь начальная фаза равна нулю  $\varphi_0 = 0$ . В начальный момент времени амплитуда максимальна. Это соответствует случаю колебаний тела, прикрепленного к пружине (или маятника), которое в начальный момент времени отвели от положения равновесия и отпустили. Описание колебаний, начинающихся из положения равновесия (например, при кратковременном толчке покоящегося шарика), удобнее вести с помощью функции синуса:

$$x = x_m \sin \omega_0 t. \quad (1.60)$$

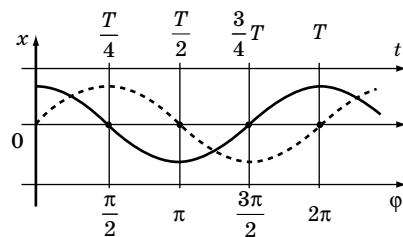


Рис. 57



## НЕДЕЛЯ 11. Механика

♦ Заполните таблицу.

Характеристика колебаний	Формула
_____ — количество колебаний в единицу времени	$[v] = 1/c = \text{Гц}$
Период колебаний — время одного колебания	$T = \text{---}$
_____ — количество колебаний, совершаемых за $2\pi$ секунд	$\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}$

♦ Заполните таблицу.

Пружинный маятник	Математический маятник
Колебания происходят под действием силы _____: $F = -kx$	Колебания происходят под действием силы тяжести: $F =$
Период колебаний равен: $T = 2\pi\sqrt{\text{---}}$	Период колебаний равен: $T = \text{---}\sqrt{\frac{l}{g}}$

Ответы на тестовые задания (неделя 11) \_\_\_\_\_

1 — 3. 2 — 3. 3 — 2. 4 — 1. 5 — 2. 6 — 1. 7 — 3.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

- 1.5. Механические колебания и волны
- 1.5.6. Вынужденные колебания
- 1.5.7. Резонанс
- 1.5.8. Длина волны
- 1.5.9. Звук

## Вынужденные колебания

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются **вынужденными колебаниями**.

Внешняя периодически изменяющаяся сила называется **вынуждающей силой**.

Примерами вынужденных колебаний являются тряска автомобиля, движущегося по неровной дороге, вибрации кормовой части судна, связанные с работой гребного винта, движение качелей, которые кто-то периодически подталкивает.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать свободные колебания, т. е. обладающие собственной частотой колебаний. Они интересны тем, что их амплитуда может возрастать при соответствующем изменении частоты вынуждающей силы.

В большинстве случаев постоянная частота и амплитуда вынужденных колебаний устанавливаются не сразу, а спустя некоторое время после их начала. Когда амплитуда и частота вынужденных колебаний перестают меняться, говорят, что колебания установились.

**Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.**

В отличие от свободных колебаний, являющихся затухающими, вынужденные колебания — незатухающие. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

## Резонанс

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы. Для изучения этой зависимости можно воспользоваться установкой, изображённой на рис. 59. На кривошипе с ручкой укреплен пружинный маятник. При равномерном вращении ручки на груз через пружину передаётся действие периодически изменяющейся силы. Изменяясь с частотой, равной частоте вращения ручки, эта сила заставит груз совершать вынужденные колебания. Если вращать ручку кривошипа очень медленно, то груз вместе с пружиной будет перемещаться вверх и вниз так же, как и точка подвеса  $O$ . Амплитуда вынужденных колебаний при этом будет невелика. При более быстром вращении груз начнёт колебаться сильнее, и при частоте

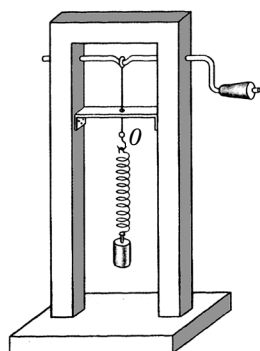


Рис. 59

вращения, равной собственной частоте пружинного маятника ( $\omega = \omega_{\text{соб}}$ ), амплитуда его колебаний достигнет максимума. При дальнейшем увеличении частоты вращения ручки амплитуда вынужденных колебаний гру- за опять станет меньше.

Резонанс возникает из-за того, что внешняя сила, действуя в такт со свободными колебаниями тела, всё время совершает положительную работу. За счёт этой работы энергия колеблющегося тела увеличивается, и амплитуда колебаний возрастает.

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при  $\omega = \omega_{\text{соб}}$  называется **резонансом**.

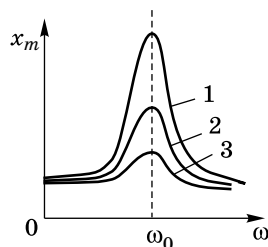


Рис. 60

Изменение амплитуды колебаний в зависимости от частоты при одной и той же амплитуде внешней силы, но при различных коэффициентах трения  $\mu$  изображено на рис. 60, где кривой 1 соответствует минимальное значение  $\mu$ , кривой 3 — максимальное.

Из рис. 60 видно, что о резонансе имеет смысл говорить, если затухание свободных колебаний в системе мало. Иначе амплитуда вынужденных колебаний при  $\omega = \omega_0$  мало отличается от амплитуды колебаний при других частотах.

Явление резонанса может быть крайне опасным. Так, например, в 1750 г. близ города Анжера во Франции через цепной мост длиной 102 м шел в ногу отряд солдат. Частота их шагов совпала с частотой свободных колебаний моста. Из-за этого размахи колебаний моста резко увеличились (наступил резонанс), и цепи оборвались. Мост обрушился в реку. В 1830 г. по той же причине обрушился подвесной мост около Манчестера в Англии.

Теперь для предотвращения подобных случаев войсковым частям при переходе через мост приказывают «сбить ногу», идти не строевым, а вольным шагом.

Если же через мост проезжает поезд, то, чтобы избежать резонанса, он проходит его либо на медленном ходу, либо, наоборот, на максимальной скорости (чтобы частота ударов колёс о стыки рельсов не оказалась равной собственной частоте моста).

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Расстояние между двумя населёнными пунктами 10 км. Сколько времени по воздуху идёт звук от одного пункта к другому?

- 1) 29 с
- 2) 18 с
- 3) 36 с
- 4) 42 с

2. При резонансе резко возрастает

- 1) амплитуда вынужденных колебаний
- 2) амплитуда свободных колебаний
- 3) период вынужденных колебаний
- 4) период свободных колебаний

3. Расстояние между соседними гребнями волны в реке равно 4 м. Найти скорость волны, если за 2 мин поплавок поднимается на гребень волны 60 раз.

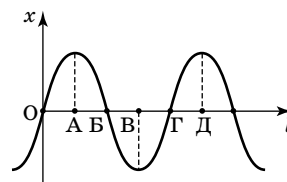
- 1) 1 м/с
- 2) 2 м/с
- 3) 3 м/с
- 4) 4 м/с

4. За 1 минуту лодка, которая стоит на якорь, поднимается на гребень волны 10 раз. Найти расстояние между соседними гребнями волны, если скорость волны равна 2,5 м/с.

- 1) 5 м
- 2) 7,5 м
- 3) 10 м
- 4) 15 м

5. На рисунке изображена поперечная волна, распространяющаяся по шнуру, в некоторый момент времени. Расстояние между какими точками равно длине волны?

- 1) ОВ
- 2) ОД
- 3) АД
- 4) АГ



ДЛЯ ЗАМЕТОК

Явление резонанса встречается не только на суше, но и в море, и даже в воздухе. Так, например, при некоторых частотах гребного вала в резонанс входили целые корабли. А на заре развития авиации некоторые авиационные двигатели вызывали столь сильные резонансные колебания частей самолёта, что он разваливался в воздухе.

## Упругие волны (механические волны)

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называют **волнами**.

**Упругие волны** — это возмущения, распространяющиеся в твёрдой, жидкой и газообразной средах благодаря действию в них сил упругости.

Сами эти среды называют упругими. Возмущение упругой среды — это любое отклонение частиц этой среды от своего положения равновесия.

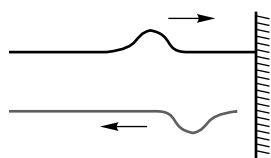


Рис. 61

Возьмём, например, длинную верёвку (или резиновую трубку) и прикрепим один из её концов к стене. Туго натянув верёвку, резким боковым движением руки создадим на её незакреплённом конце кратковременное возмущение. Мы увидим, что это возмущение побежит вдоль верёвки и, дойдя до стены, отразится назад (рис. 61).

Начальное возмущение среды, приводящее к появлению в ней волны, вызывается действием в ней какого-нибудь инородного тела, которое называют **источником волны**.

Если действие источника носит кратковременный характер, то в среде возникает так называемая одиночная волна (см. рис. 61). Если же источник волны совершает длительное колебательное движение, то волны в среде начинают идти одна за другой.

Необходимым условием возникновения упругой волны является появление в момент возникновения возмущения сил упругости, препятствующих этому возмущению. Эти силы стремятся сблизить соседние частицы среды, если они расходятся, и отдалить их, когда они сближаются. Действуя на всё более удалённые от источника частицы среды, силы упругости начинают выводить их из положения равновесия. Постепенно все частицы среды одна за другой вовлекаются в колебательное движение. Распространение этих колебаний и проявляется в виде волны.

В любой упругой среде одновременно существуют два вида движения: колебания частиц среды и распространение возмущения. Волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления её распространения, называется **продольной**, а волна, в которой частицы среды колеблются поперёк направления её распространения, называется **поперечной**.

## Длина и скорость волны

Любая волна распространяется с некоторой скоростью. Под **скоростью волны** понимают скорость распространения возмущения. Например, удар по торцу стального стержня вызывает в нём местное сжатие, которое затем распространяется вдоль стержня со скоростью около 5 км/с.

Скорость волны определяется свойствами среды, в которой эта волна распространяется. При переходе волны из одной среды в другую её скорость изменяется.

**Длиной волны** называется расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний в ней.

Поскольку скорость волны — величина постоянная (для данной среды), то пройденное волной расстояние равно произведению скорости на время её распространения. Таким образом, чтобы найти длину волны, надо скорость волны умножить на период колебаний в ней:

$$\lambda = vT, \quad (1.61)$$

где  $v$  — скорость волны,  $T$  — период колебаний в волне,  $\lambda$  (лямбда) — длина волны.

Учитывая что период колебаний в волне обратно пропорционален частоте  $\nu$  ( $T = 1/\nu$ ), получаем

$$\lambda = vT = v \frac{1}{\nu},$$

откуда

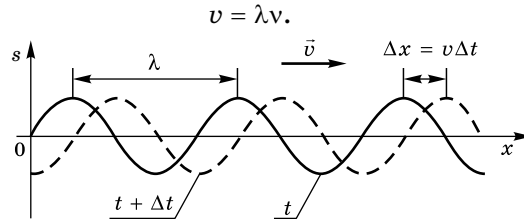


Рис. 62

Полученная формула показывает, что скорость волны равна произведению длины волны на частоту колебаний в ней.

**Длина волны** — это пространственный период волны. На графике волны (рис. 62) длина волны определяется как расстояние между двумя ближайшими точками гармонической бегущей волны, находящимися в одинаковой фазе колебаний.

При переходе волны из одной среды в другую меняются её скорость и длина, а частота остаётся неизменной.

## Звук

**Звук (или звуковые волны)** — это распространяющиеся в виде волн колебательные движения частиц упругой среды — газообразной, жидкой или твёрдой.

Под словом «звук» понимают также ощущения, вызываемые действием звуковых волн на специальный орган чувств (орган слуха, или, проще говоря, ухо) человека и животных: человек слышит звук частотой от 16 Гц до 20 кГц. Частоты этого диапазона называют звуковыми.

Итак, физическое понятие звука подразумевает упругие волны не только тех частот, которые человек слышит, но также более низкие и более высокие частоты. Первые называются **инфразвуком**, вторые — **ультразвуком** (рис. 63). Самые высокочастотные упругие волны в диапазоне  $10^9$ – $10^{13}$  Гц относятся к гиперзвуку.

«Услышать» звуковые волны можно, заставив дрожать зажатую в тисках длинную стальную линейку. Однако если над тисками будет выступать большая часть линейки (рис. 64, а), то, вызвав её колебания, мы не услышим порождаемые ею волны. Но если укоротить выступающую часть линейки и тем самым увеличить частоту её колебаний (рис. 64, б), то линейка начнёт звучать.

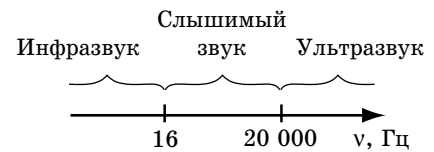


Рис. 63

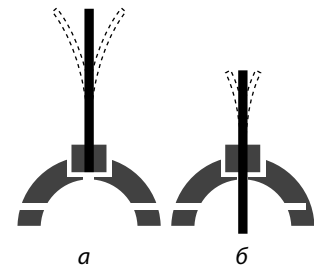


Рис. 64

Любое тело, колеблющееся со звуковой частотой, является источником звука, так как в окружающей среде возникают распространяющиеся от него волны.

Существуют как естественные, так и искусственные источники звука. Один из искусственных источников звука, камертон (рис. 65), был изобретён в 1711 г. английским музыкантом Дж. Шором для настройки музыкальных инструментов.

Камертон представляет собой изогнутый (в виде двух ветвей) металлический стержень с держателем посередине. Ударив резиновым молоточком по одной из ветвей камертона, мы услышим определённый звук. Ветви камертона начинают вибрировать, создавая вокруг себя попеременные сжатия и разрежения воздуха (рис. 65, а). Распространяясь по воздуху, эти возмущения образуют звуковую волну.

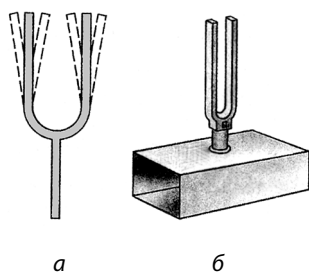


Рис. 65

Стандартная частота колебаний камертона — 440 Гц. Это означает, что за 1 с его ветви совершают 440 колебаний.

Для усиления звука, создаваемого камертоном, его держатель укрепляют на деревянном ящике, открытом с одной стороны (см. рис. 65, б). Этот ящик называют резонатором. При колебаниях камертона вибрация ящика передаётся находящемуся в нём воздуху. Из-за резонанса, возникающего при правильно подобранных размерах ящика, амплитуда вынужденных колебаний воздуха возрастает, и звук усиливается. Его усилению способствует и увеличение площади излучающей поверхности, которое имеет место при соединении камертона с ящиком.

Нечто подобное происходит и в таких музыкальных инструментах, как гитара, скрипка.

Источниками звука могут быть не только колеблющиеся твёрдые тела, но и некоторые явления, вызывающие колебания давления в окружающей среде (взрывы, полёт пуль, завывания ветра и т. д.). Наиболее ярким примером подобных явлений является молния. Во время грозы температура в канале молнии увеличивается до 30 000 °С. Давление резко возрастает, и в воздухе возникает ударная волна, постепенно переходящая в звуковые колебания (с типичной частотой 60 Гц), распространяющиеся в виде раскатов грома.

Приёмники звука служат для восприятия звуковой энергии и преобразования её в другие виды энергии. К приёмникам звука относятся, в частности, слуховой аппарат человека и животных. В технике для приёма звука применяют главным образом микрофоны (в воздухе), гидрофоны (в воде) и геофоны (в земной коре).

**В газах и жидкостях звуковые волны распространяются в виде продольных волн сжатия и разрежения.** Сжатия и разрежения среды, возникающие вследствие колебаний источника звука (колокольчика, струны, камертона, мембраны телефона, голосовых связок и т. д.), через некоторое время достигают человеческого уха, заставляя барабанную перепонку уха совершать вынужденные колебания с частотой, соответствующей частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончанием слухового нерва, раздражают их и тем вызывают у человека определённые слуховые ощущения. Животные также реагируют на упругие колебания, правда, в качестве звука они воспринимают волны других частот.

Человеческое ухо — очень чувствительный прибор. Воспринимать звук мы начинаем уже тогда, когда амплитуда колебаний частиц воздуха в волне оказывается равной всего лишь радиусу атома! С возрастом из-за потери эластичности барабанной перепонки верхняя граница воспринимаемых человеком частот постепенно снижается. Лишь молодые люди способны слышать звуки с частотой 20 кГц. В среднем и тем более в старшем возрасте как мужчины, так и женщины перестают воспринимать звуковые волны, частота которых превышает 12–14 кГц.

Ухудшается слух людей и в результате длительного воздействия громких звуков. Работа вблизи мощных самолётов, в очень шумных заводских цехах, частое посещение дискотек и чрезмерное увлечение аудиоплеерами негативно влияют на остроту восприятия звуков (особенно высокочастотных) и в некоторых случаях могут привести к потере слуха.

**Громкость звука** — это субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать звуки по шкале от тихих до громких.

Громкость звука определяется амплитудой: чем больше амплитуда колебаний в звуковой волне, тем больше громкость.

Громкость звука зависит также от того, насколько чувствительно наше ухо к данному звуку. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает к звуковым волнам с частотой 1–5 кГц. Поэтому, например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет восприниматься нашим ухом как более громкий, чем низкий мужской голос с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок у них одинаковы.

Громкость звука зависит также от его длительности, интенсивности и от индивидуальных особенностей слушателя.

**Интенсивностью звука** называется энергия, переносимая звуковой волной за 1 с через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>. Оказалось, что интенсивность самых громких звуков (при которых возникает ощущение боли) превышает интенсивность самых слабых звуков, доступных восприятию человека, в 10 триллионов раз! В этом смысле человеческое ухо называется намного более совершенным устройством, чем любой из обычных измерительных приборов. Ни одним из них столь широкий диапазон значений измерить невозможно (у приборов диапазон измерений редко превосходит 100).

Единицу громкости называют **соном**. Громкостью в 1 сон обладает приглушённый разговор. Тиканье часов характеризуется громкостью около 0,1 сона, обычный разговор — 2 сона, стук пишущей машинки — 4 сона, громкий уличный шум — 8 сон. В кузнечном цехе громкость достигает 64 сон, а на расстоянии 4 м от работающего двигателя реактивного самолёта — 264 сон. Звуки ещё большей громкости начинают вызывать болевые ощущения.

Помимо громкости звук характеризуется высотой. Высота звука определяется его частотой: чем больше частота колебаний в звуковой волне, тем выше звук. Колебаниям небольшой частоты соответствуют низкие звуки, колебаниям большой частоты — высокие звуки.

Так, например, шмель машет своими крылышками с меньшей частотой, чем комар: у шмеля частота составляет 220 взмахов в секунду, а у комара — 500–600. Поэтому полёт шмеля сопровождается низким звуком (жужжанием), а полёт комара — высоким (писком).

Звуковую волну определённой частоты иначе называют музыкальным тоном, поэтому о высоте звука часто говорят как о высоте тона.

Основной тон с примесью нескольких колебаний других частот образует музыкальный звук. Например, звуки скрипки и пианино могут включать до 15–20 различных колебаний. От состава каждого сложного звука зависит его тембр.

Частота свободных колебаний струны зависит от её размеров и натяжения. Поэтому, натягивая струны гитары с помощью колышков и прижимая их к грифу гитары в разных местах, мы меняем их собственную частоту, а следовательно, и высоту издаваемых ими звуков.

При обычной речи в мужском голосе встречаются колебания с частотой от 100 до 7000 Гц, а в женском — от 200 до 9000 Гц. Наиболее высокочастотные колебания входят в состав согласного звука «с».

На границе между двумя разными средами часть звуковой волны отражается, а часть проходит дальше. При переходе звука из воздуха в воду 99,9 % звуковой энергии отражается назад, однако давление в прошедшей в воду звуковой волне оказывается почти в 2 раза большим, чем в воздухе. Слуховой аппарат рыб реагирует именно на это. Поэтому, например, крики и шумы над поверхностью воды являются верным способом распугать обитателей водоёма.



При переходе звука из воды в воздух снова отражается 99,9 % энергии. Но если при переходе из воздуха в воду звуковое давление увеличивалось, то теперь оно, наоборот, резко уменьшается. Именно по этой причине человек, находящийся над водой, не слышит звук, возникающий под водой при ударе одним камнем о другой.

Отражением звука объясняется и эхо. Эхо — это звуковые волны, отражённые от какого-либо препятствия и возвратившиеся к своему источнику. Мы слышим эхо лишь в том случае, когда отражённый звук воспринимается отдельно от произнесенного. Происходит это тогда, когда до нас доходят звуковые волны, последовательно отразившиеся от нескольких препятствий и разделённые интервалом времени  $t > 50\text{--}60$  мс. Тогда возникает многократное эхо. Некоторые из таких явлений приобрели мировую известность. Так, например, скалы, расположенные в форме круга возле Адерсбаха в Чехии, в определённом месте повторяют 7 слогов, а в замке Вудсток в Англии эхо отчетливо повторяет 17 слогов!

Увеличение длительности звука, вызванное его отражениями от различных препятствий, называется **реверберацией**. Реверберация велика в пустых помещениях, где она приводит к гулкости. И наоборот, помещения с мягкой обивкой стен, драпировками, шторами, мягкой мебелью, коврами, а также наполненные людьми хорошо поглощают звук, и потому реверберация в них незначительна.

## Скорость звука

Для распространения звука необходима упругая среда. В вакууме звуковые волны распространяться не могут, так как там нечему колебаться. В этом можно убедиться на простом опыте. Если поместить под стеклянный колокол электрический звонок, то по мере выкачивания из-под колокола воздуха звук от звонка будет становиться всё слабее и слабее, пока не прекратится совсем.

Известно, что во время грозы мы видим вспышку молнии и лишь через некоторое время слышим раскаты грома. Это запаздывание возникает из-за того, что скорость звука в воздухе значительно меньше скорости света, идущего от молнии.

**Скорость звука в воздухе** впервые была измерена в 1636 г. французским учёным М. Мерсенном. При температуре 20 °С она равна 343 м/с, т. е. 1235 км/ч.

Скорость звука в газах зависит от температуры среды: с увеличением температуры воздуха она возрастает, а с уменьшением — убывает. При 0 °С скорость звука в воздухе составляет 332 м/с.

В разных газах звук распространяется с разной скоростью. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нём. Так, при температуре 0 °С скорость звука в водороде составляет 1284 м/с, в гелии — 965 м/с, а в кислороде — 316 м/с.

**Скорость звука в жидкостях, как правило, больше скорости звука в газах.** Скорость звука в воде впервые была измерена в 1826 г. Ж. Колладоном и Я. Штурмом. Свои опыты они проводили на Женевском озере в Швейцарии. При температуре 8 °С она оказалась равной 1440 м/с.

**Скорость звука в твёрдых телах больше, чем в жидкостях и газах.**

Хорошей проводимостью звука обладает земля.

Твёрдые тела хорошо проводят звук. Благодаря этому люди, потерявшие слух, иной раз способны танцевать под музыку, которая доходит до слуховых нервов не через воздух и наружное ухо, а через пол и кости.

Скорость звука можно определить, зная длину волны и частоту (или период) колебаний:

$$v = \lambda \nu,$$

$$v = \lambda / T.$$

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Закончите предложение.

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называют \_\_\_\_\_

♦ Заполните схему.

Частотные диапазоны звука		
$\nu < 20 \text{ Гц}$	$20 \text{ Гц} < \nu < 20\,000 \text{ Гц}$	$\nu > 20\,000 \text{ Гц}$

♦ Запишите формулы определения скорости звука.

$v =$  \_\_\_\_\_

$v =$  \_\_\_\_\_

♦ Заполните таблицу.

Характеристика волны	Формула
_____ — расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в фазе	$\lambda = vT$
_____ — время одного колебания	$T = \frac{1}{\nu}$
Скорость волны — скорость распространения колебаний в пространстве	$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu$
Частота колебаний — количество колебаний в единицу времени	$\nu = \frac{1}{T}$

Ответы на тестовые задания (неделя 12)

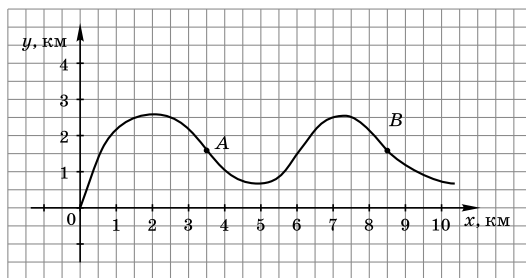
1 — 1. 2 — 1. 3 — 2. 4 — 4. 5 — 3.

# ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАЗДЕЛУ «МЕХАНИКА»

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «КИНЕМАТИКА»

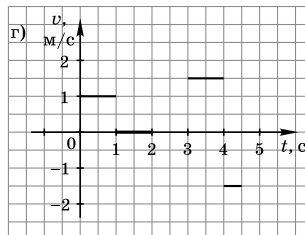
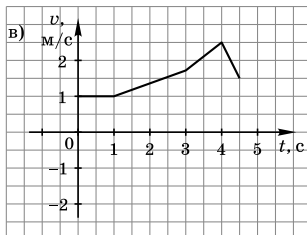
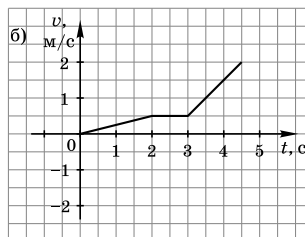
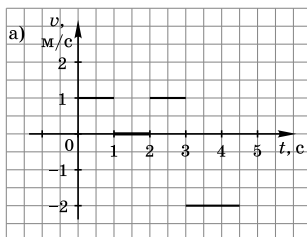
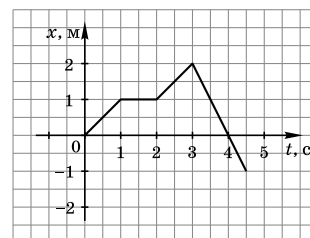
Ответами к заданиям 1–7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. На рисунке изображена траектория движения автомобиля. Определите модуль вектора перемещения из точки  $A$  в точку  $B$ .



Ответ: \_\_\_\_\_ км.

2. На рисунке приведён график движения тела  $x(t)$ . Под ним приведены четыре графика зависимостей скорости от времени  $v(t)$ . Какой из этих четырёх графиков  $v(t)$  (левый верхний, правый верхний, левый нижний, правый нижний) соответствует графику движения тела  $x(t)$ ? Ответ запишите словами.

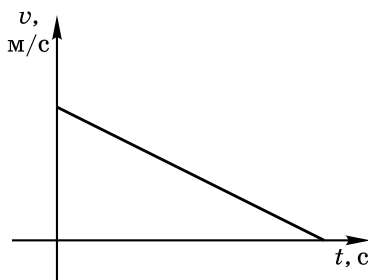


Ответ: \_\_\_\_\_.

3. Тело двигалось из точки  $A$  в точку  $B$  с переменной скоростью, преодолев первый участок пути в 5 м за время 8 с, второй участок в 3 м — за 10 с, и третий участок длиной 10 м — за 18 с. Определите среднюю путевую скорость движения между точками  $A$  и  $B$ .

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

4. Какой из видов движения (**равномерное, равноускоренное, равнозамедленное**) изображён на графике зависимости скорости от времени? Ответ запишите словами.



Ответ: \_\_\_\_\_ .

5. Точка совершает равномерное движение вдоль окружности радиуса  $R = 5$  м со скоростью 3 м/с. Определите центростремительное ускорение точки.

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с<sup>2</sup>.

6. Чему равна угловая скорость минутной стрелки часов?

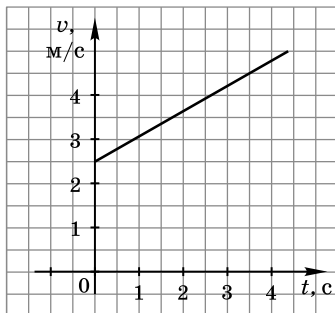
Ответ: \_\_\_\_\_ мрад/с.

7. В безветренную погоду капли дождя падают на землю вертикально. Какую кривую описывает след от капель на окне поезда, движущегося с постоянной скоростью для наблюдателя, стоящего на платформе — **прямую линию, гиперболу или параболу**? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 8, 9 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

8. Пользуясь графиком зависимости скорости от времени, определите путь, пройденный телом за первые 3 секунды.



Ответ: \_\_\_\_\_ м.

9. Мгновенное ускорение тела, движущегося по окружности, равно 5 м/с, при этом его центростремительное ускорение составляет 4 м/с. Каково тангенциальное ускорение тела?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с<sup>2</sup>.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ДИНАМИКА»

Ответами к заданиям 1—9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Деревянный брусок лежит неподвижно на наклонной плоскости, не соскальзывая вниз. Какая сила удерживает его от соскальзывания — **сила тяжести, сила трения** или **сила упругости**? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

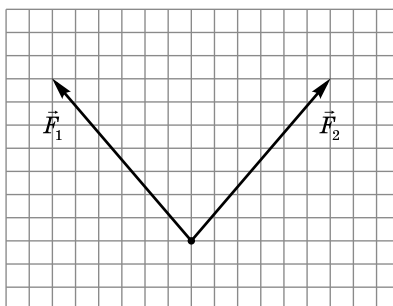
2. На тело, покоящееся в инерциальной системе отсчёта, кратковременно подействовала силой, придав ему некоторую скорость. Как будет меняться скорость тела и пройденный им путь со временем относительно той же системы отсчёта, если в дальнейшем на него не будут действовать никакие силы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличится                      2) уменьшится                      3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Скорость тела	Пройденный путь

3. К материальной точке, изображённой на рисунке, приложены две силы. В каком направлении будет двигаться точка под действием этих сил — **вправо, влево, вверх, вниз**? Ответ запишите словом.



Ответ: \_\_\_\_\_ .

4. Тело массой 80 кг лежит на подставке. Определите силу давления (в СИ) тела на подставку.

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

5. Тело, движущееся в поле тяжести Земли, находится в состоянии невесомости. Выберите два верных утверждения, касающиеся ускорения  $a$  и веса тела  $P$  в этом состоянии.

1)  $a < g$                       2)  $P = 0$                       3)  $a = g$                       4)  $P = mg$

Ответ: ☐ ☐

6. Пружину растянули на 5 см. Жёсткость пружины равна 0,1 Н/м. Определите силу упругости пружины, вызванную этим растяжением.

Ответ: \_\_\_\_\_ мН.

7. Сила давления  $F_1$ , приложенная к площади  $S_1$ , оказывает на неё давление  $P_1$ . Сила давления  $F_2$ , приложенная к площади  $S_2$ , оказывает на неё давление  $P_2$ . Чему равно отношение  $S_1/S_2$ , если  $F_1/F_2 = 4$ , а  $P_2/P_1 = 8$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ .

8. Установите соответствие между названием закона, принципа и его математическим выражением. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

#### ЗАКОН, ПРИНЦИП

- А) закон всемирного тяготения  
Б) принцип относительности Галилея

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ

1)  $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t, t = t'$

2)  $p = mv$

3)  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

4)  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

Ответ: 

А	Б

9. Тело массой  $m$  движется по наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha$  с постоянной скоростью  $v$ . Чему равен коэффициент трения скольжения  $\mu$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 10—12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

10. К материальной точке массой 5 кг приложена сила 2 Н. С каким ускорением движется точка?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с<sup>2</sup>.

11. Ускорение свободного падения на Юпитере в 2,55 раза больше, чем на Земле, а масса Юпитера в 318 раз больше массы Земли. Определите радиус Юпитера в км.

Ответ: \_\_\_\_\_ км.

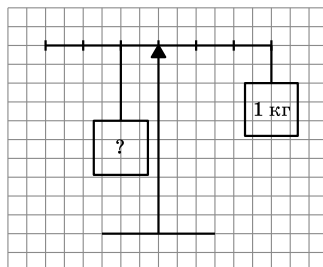
12. Тело выпустили из рук на высоте 10 м от Земли. Какова скорость тела в момент соприкосновения с Землёй? (Сопротивлением воздуха можно пренебречь.)

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «СТАТИКА»

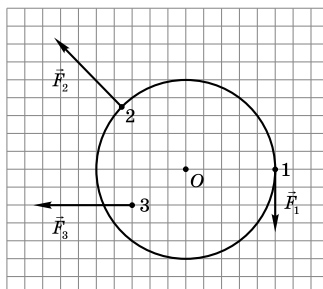
Ответами к заданиям 1—7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Какова масса груза, который уравновесит рычаг, изображённый на рисунке?



Ответ: \_\_\_\_\_ кг.

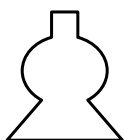
2. К разным точкам диска, изображённого на рисунке, способного свободно вращаться вокруг неподвижной оси, приложены силы, величина и направление которых изображены стрелками. Как поведёт себя диск под действием этих сил: будет вращаться **по часовой стрелке**, **против часовой стрелки**, **останется неподвижным**? Ответ запишите словами.



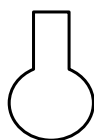
Ответ: \_\_\_\_\_ .

3. К рулю автомобиля приложена пара сил, суммарный момент которых равен 3 Н·м. Радиус штурвала равен 20 см. С какой силой водитель крутит руль левой рукой?  
 Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

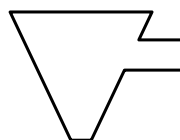
4. На рисунке изображены три сосуда разной формы, но одинаковой высоты. Как различается давление жидкости на дно сосудов: **равно**, **различно**? Ответ запишите словом.



A



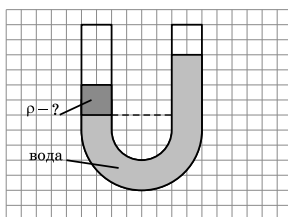
B



C

Ответ: \_\_\_\_\_ .

5. Определите плотность неизвестной жидкости в сообщающихся сосудах, изображённых на рисунке.



Ответ: \_\_\_\_\_ г/см<sup>3</sup>.

6. Тело плавает в жидкости. Выберите два правильных утверждения, касающихся этой ситуации.

- 1) Масса тела  $m$  больше массы вытесненной им жидкости  $m_{\text{ж}}$ .
- 2) Плотность тела  $\rho_{\text{т}}$  больше плотности жидкости  $\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{т}} > \rho_{\text{ж}}$ .
- 3)  $\rho_{\text{т}} \leq \rho_{\text{ж}}$ .
- 4) Сила Архимеда  $F_{\text{А}} < mg$ .
- 5) Между объёмом тела  $V$ , объёмом вытесненной телом жидкости  $V_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{т}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$  справедливо соотношение:  $\rho_{\text{т}}V = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}$ .

Ответ: ☐ ☐

7. Как меняется атмосферное давление с увеличением высоты местности: **повышается, понижается, не меняется?** Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 8—12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

8. Рассчитайте величину гидростатического давления в атм. на дне озера Байкал на глубине ~ 1600 м, считая воду чистой.

Ответ: \_\_\_\_\_ атм.

9. В жидкость с плотностью 1,4 г/см<sup>3</sup> погружён шар радиусом 5 см. Рассчитайте силу Архимеда, действующую на шар.

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

10. Какую силу  $F_1$  нужно приложить к ручке гидравлического пресса, чтобы сжать деталь с силой  $F_2 = 100$  Н, если отношение площадей поршней  $S_1/S_2 = 1/5$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

11. С какой силой надо давить на пробку объёмом 5 см<sup>3</sup> и плотностью 0,24 г/см<sup>3</sup>, чтобы полностью погрузить её в воду?

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

12. Подъёмная сила аэростата  $F_{\text{А}} = 1000$  Н, объём шара  $V = 100$  м<sup>3</sup>. Вес самой оболочки 50 Н. Какова плотность газа, наполняющего воздушный шар?

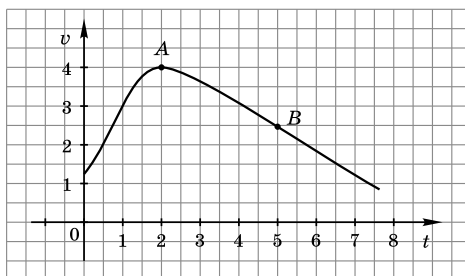
Ответ: \_\_\_\_\_ кг/м<sup>3</sup>.



## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ»

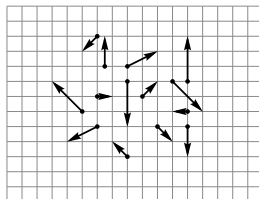
Ответами к заданиям 1—11 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. По графику зависимости скорости тела от времени, изображённого на рисунке, определите отношение количеств движения тела в точках  $A$  и  $B$ .



Ответ: \_\_\_\_\_.

2. На рисунке стрелками изображены величина и направление импульсов частиц, составляющих изолированную систему. Определите суммарный импульс системы.



Ответ: \_\_\_\_\_ Н·с.

3. Теннисный мячик отскакивает от стены. Количество движения мячика до соударения со стенкой составляло 10 Н·с. Чему равно количество движения, которое мячик передаёт стенке в момент удара?

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

4. Ракета массой 250 г содержит 350 г взрывчатого вещества. Какова начальная скорость ракеты, если взрыв горючего и выход газов со скоростью 0,3 км/с происходят мгновенно?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

5. Тело первый раз подняли на высоту 1 м вертикально вверх. Второй раз его тащили по наклонной плоскости длиной 2 м и подняли на такую же высоту. В каком случае работа по преодолению силы тяжести больше (силой трения и сопротивления воздуха пренебречь): в первом случае, во втором случае, одинакова? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_.

6. Тело массой 5 кг подняли на высоту 10 м. Чему равна совершённая работа?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

7. В результате удара хоккеиста клюшкой по шайбе её скорость удвоилась. Как изменились кинетическая энергия и количество движения шайбы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась в два раза                      3) не изменилась  
2) уменьшилась в 4 раза                      4) увеличилась в 4 раза

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Кинетическая энергия	Количество движения шайбы

8. Тело массой 1 кг, двигаясь со скоростью 5 м/с, сталкивается со вторым неподвижным телом массой 0,5 кг. Определите скорости тел, считая удар абсолютно неупругим.

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

9. Тело приводят в движение кратковременным ( $t = 0,2$  с) толчком с силой 10 Н. Какое количество движения приобрело тело?

Ответ: \_\_\_\_\_ Н.с.

10. Тело массой 70 кг переместили по горизонтальной плоскости на расстояние 5 км. Какова работа сил трения, если коэффициент трения скольжения равен 0,1?

Ответ: \_\_\_\_\_ КДЖ.

11. К телу приложена некоторая сила  $\vec{F} \neq 0$ , однако работа этой силы равна нулю. Исходя из определения понятия работы, выберите два соотношения между перемещением  $\Delta \vec{r}$  и силой  $\vec{F}$ , каждое из которых правильно объясняет эту ситуацию.

- 1)  $\Delta \vec{r} \parallel \vec{F}$       2)  $\Delta \vec{r} \uparrow \downarrow \vec{F}$       3)  $\Delta \vec{r} \perp \vec{F}$       4)  $\Delta \vec{r} = 0$

Ответ: 

--	--

Запишите полное решение задачи.

12. Два шарика массой 50 г и 100 г двигались навстречу друг другу по одной прямой со скоростями 0,5 м/с и 1 м/с соответственно. Определите скорости шаров после упругого удара.

Ответ: \_\_\_\_\_.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

Ответами к заданиям 1—8 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

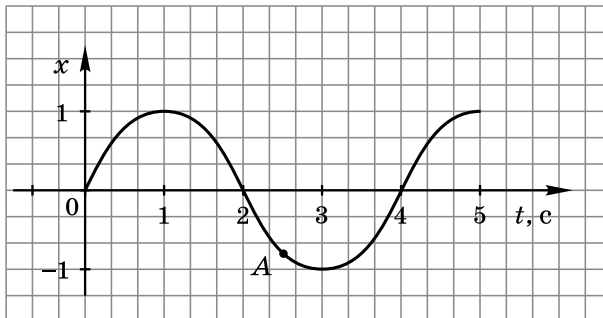
1. Амплитуда, частота и начальная фаза колебаний математического маятника равны 5 м, 10 с<sup>-1</sup> и 0 соответственно. Выберите два верных утверждения на основании данных, приведённых в условии задачи.

- 1) Уравнение колебания этого маятника имеет вид:  $x = 5 \sin 20\pi t$ .
- 2) Круговая частота колебаний  $\omega = 30$ .

- 3) Эти колебания — гармонические.  
 4) Эти колебания — не гармонические.  
 5) Уравнение колебания этого маятника имеет вид:  $x = 2 \sin 10$ .

Ответ:

2. Внимательно рассмотрите рисунок и выберите два верных утверждения, следующих из рисунка, о величинах фазы  $\varphi_A$  колебания в точке  $A$  и его периода  $T$ .



- 1)  $\varphi_A = 0,8\pi$       3)  $\varphi_A = \pi$       5)  $\varphi_A = 0,8\pi$       7)  $\varphi_A = 1,25\pi$   
 2)  $T = 4$  с      4)  $T = 2$  с      6)  $T = 2$  с

Ответ:

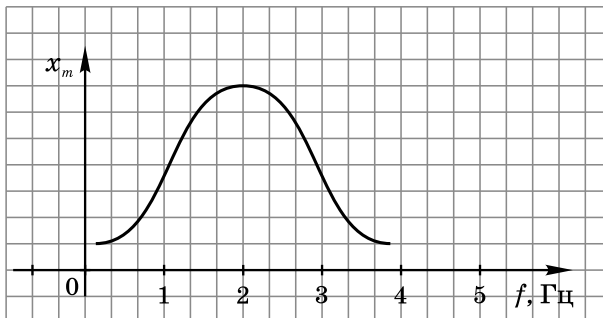
3. Длину нити математического маятника увеличили. Как нужно изменить массу груза, чтобы уменьшить частоту колебаний маятника: **увеличить, уменьшить, невозможно выполнить задачу?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

4. Массу груза пружинного маятника увеличили вдвое. Как надо изменить жёсткость пружины, чтобы собственная частота его колебаний не изменилась: **уменьшить вдвое, увеличить вдвое, оставить неизменной?** Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

5. На рисунке представлена резонансная кривая вынужденных колебаний некоторой системы. Какова собственная частота колебаний этой системы?



Ответ: \_\_\_\_\_ Гц.

6. Длина звуковой волны  $\lambda = 0,7$  м, её скорость  $v = 350$  м/с. Определите период звуковых колебаний  $T$ .

Ответ: \_\_\_\_\_ мс.

7. Установите соответствие между описанием характеристик и параметров колебательного процесса и их названием. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА

НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА, ПРОЦЕССА

- А) максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия  
Б) колебания, описываемые функцией синуса или косинуса

- 1) смещение  
2) гармонические колебания  
3) амплитуда  
4) частота  
5) фаза  
6) период

Ответ: 

А	Б

8. В упругой среде распространяются две когерентные волны с  $\lambda = 5$  м. Разность расстояний от источников этих волн до некоторой точки составляет 1 м. Будет ли в этой точке наблюдаться максимум интерференции этих волн: да, нет? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 9—10 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.
--

9. Определите смещение точки, совершающей гармонические колебания с частотой 10 Гц, амплитудой 1 см в момент времени  $t = 100$  с от начала колебания.

Ответ: \_\_\_\_\_ см.

10. Какова длина звуковой волны, создаваемой человеческим голосом с частотой колебаний 200 Гц в воде?

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

# НЕДЕЛЯ 13

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 2.1. Молекулярная физика
  - 2.1.1. Модели строения газов, жидкостей и твёрдых тел
  - 2.1.2. Тепловое движение атомов и молекул вещества
  - 2.1.3. Броуновское движение
  - 2.1.4. Диффузия
  - 2.1.5. Экспериментальные доказательства атомистической теории.
- Взаимодействие частиц вещества

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

#### Основы молекулярно-кинетической теории

Молекулярная физика описывает строение вещества с помощью молекулярно-кинетической теории (*МКТ*), согласно которой все тела состоят из отдельных частиц — молекул и атомов, то есть не являются сплошными.

##### Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества

1. Вещество состоит из частиц (атомов и молекул).
2. Эти частицы беспорядочно движутся.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом.

**Атом** — это наименьшая часть химического элемента, обладающая его свойствами и способная к самостоятельному существованию. Каждому элементу соответствует определённый род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента. Например, атом кислорода обозначается символом *O*, водорода — *H*, гелия — *He* и т. д.

Атомы могут существовать в свободном состоянии (в виде отдельных атомов) в газах. В жидкостях и твёрдых телах они существуют в виде молекул, в которых соединяются с атомами того же элемента или других химических элементов (или, как принято говорить, существуют в связанном состоянии).

**Молекула** — мельчайшая устойчивая частица вещества, состоящая из атомов одного или нескольких химических элементов, сохраняющая основные химические свойства этого вещества. Атомы можно рассматривать как одноатомные молекулы.

Поскольку молекулы очень малы, в каждом физическом теле их содержится огромное количество. Так, в 1 см<sup>3</sup> воздуха содержится около  $27 \cdot 10^{18}$  молекул. Чтобы понять, насколько велико это число, представим себе, что через маленькое отверстие пропускают по миллиону молекул в секунду, тогда указанное количество молекул пройдёт через отверстие за 840 000 лет.

## Масса молекул

Масса молекул (за исключением молекул органических веществ, например, белков) очень мала. Так, масса молекулы воды составляет около  $2,7 \cdot 10^{-23}$  г. Работать с такими малыми цифрами неудобно, поэтому в физике и химии принято выражать массы атомов и молекул в относительных единицах.

**Атомная единица массы (а.е.м.)** — единица массы, равная  $1/12$  массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Чтобы перевести значение массы атомов или молекул, выраженной в а.е.м., т. е. относительную молекулярную (или атомную) массу вещества  $M_r$ , в единицу массы СИ (кг), пользуются формулой:

$$m \text{ (кг)} = \frac{M_r \cdot 10^{-3} [\text{моль}^{-1} \cdot \text{кг}]}{N_A \cdot [\text{моль}^{-1}]},$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро.

**Относительная молекулярная масса (атомная масса)** — относительное значение массы молекулы (атома), выраженное в атомных единицах массы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{OC}}} \left( M_r = \frac{m_0}{1 \text{ а.е.м.}} \right),$$

где  $M_r$  — относительная молекулярная (атомная) масса;  $m_0$  — масса молекулы (атома), выраженная в единицах СИ (кг);  $m_{\text{OC}}$  — масса молекулы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , выраженная в тех же единицах, что и  $m_0$ .

$$\frac{1}{12} m_{\text{OC}} = 1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Атомная масса была взята Д. И. Менделеевым за основную характеристику элемента при открытии им периодической системы элементов. Атомная масса — дробная величина, в отличие от массового числа — количества нуклонов в атоме.

Относительная молекулярная масса вещества складывается из относительных атомных масс (а.м.), входящих в молекулу элементов. Например:  $M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18$ ;  $M_r(\text{CO}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 48$ .

Атомные массы всех химических элементов точно измерены.

**Моль** — количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной (молекулярной) массе.

Моль — единица количества вещества в СИ (одна из основных единиц СИ).

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Найти массу 15 моль азота.

- 1) 150 г
- 2) 210 г
- 3) 420 г
- 4) 630 г

2. Найти массу атома натрия.

- 1)  $3,8 \cdot 10^{-23}$  кг
- 2)  $3,8 \cdot 10^{-26}$  кг
- 3)  $2 \cdot 10^{-25}$  кг
- 4)  $22 \cdot 10^{-3}$  кг

3. Найти объём, который занимает 4 моля алюминия.

- 1)  $40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$
- 2)  $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$
- 3)  $30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$
- 4)  $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

4. Какова масса в 200 молей метана ( $\text{CH}_4$ )?

- 1) 0,64 кг
- 2) 0,48 кг
- 3) 3,2 кг
- 4) 0,24 кг

5. Какова масса в 150 молей кислорода ( $\text{O}_2$ )?

- 1) 3,2 кг
- 2) 4,8 кг
- 3) 2,4 кг
- 4) 6,4 кг

6. Сколько молекул содержится при нормальных условиях в 0,6 кг окиси азона ( $\text{NO}$ )?

- 1)  $1,2 \cdot 10^{25}$
- 2)  $1,2 \cdot 10^{24}$
- 3)  $1,2 \cdot 10^{26}$
- 4)  $1,2 \cdot 10^{23}$

===== ДЛЯ ЗАМЕТОК =====

В 1 моле содержится столько молекул (атомов или других частиц вещества), сколько атомов содержится в 0,012 кг нуклида углерода  $^{12}\text{C}$  с атомной массой 12.

Из этого определения следует, что в одном моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул.

Число это называется постоянной Авогадро и обозначается  $N_A$ :

$$N_A = 6,022054(32) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Постоянная Авогадро (число Авогадро)** — это число атомов (молекул или других структурных элементов вещества), содержащихся в 1 моле.

Постоянная Авогадро — одна из фундаментальных физических констант. Она входит в некоторые другие постоянные, например в постоянную Больцмана.

**Количество вещества** — это число частиц вещества (атомов, молекул), выраженное в молях. Учитывая определение моля и числа Авогадро, можно сказать, что количество вещества  $\nu$  равно отношению числа молекул  $N$  в данном теле к постоянной Авогадро  $N_A$ , т. е. к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (2.1)$$

**Молярной массой вещества  $M$**  называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль:

$$M = m_0 N_A, \quad (2.2)$$

где  $m_0$  — масса молекулы данного вещества.

Поскольку для любого тела его масса  $m$  связана с количеством молекул  $N$  в нём соотношением

$$m = m_0 N, \quad (2.3)$$

то из (2.1), (2.2) и (2.3) получим:

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (2.4)$$

**Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе.**

Из (2.4) и (2.1) получаем:

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M} —$$

выражение для числа молекул в теле с массой  $m$  и молярной массой  $M$ .

## Обоснования молекулярно-кинетической теории

Диффузия, растворимость и броуновское движение могут быть объяснены только на основе представления о молекулярном строении веществ и являются убедительными обоснованиями первого и второго положений молекулярно-кинетической теории.

### Броуновское движение

**Броуновское движение (брауновское движение)** — беспорядочное движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием ударов молекул окружающей среды.

Впервые такое движение исследовал и описал в 1827 г. английский ботаник Р. Броун при изучении под микроскопом взвешенной в воде цветочной пыльцы. Он обнаружил, что частички пыльцы находятся в непрерывном беспорядочном движении, как бы исполняя дикий фантастический танец.

Броуновское движение можно наблюдать и в газе. Например, в воздухе его совершают взвешенные там частицы пыли или дыма.

Броуновское движение никогда не прекращается! В капле воды (если не давать ей высохнуть) движение крупинок можно наблюдать в течение многих дней, месяцев, лет.

Интенсивность броуновского движения увеличивается с повышением температуры, уменьшением вязкости среды, уменьшением размера частиц. Оно не зависит от химической природы частиц и времени наблюдения.

Броуновское движение служит доказательством существования ещё более мелких частиц — молекул жидкости, невидимых даже в самые сильные оптические микроскопы.

Броуновское движение объясняется тем, что благодаря случайной неодинаковости количества ударов молекул жидкости о частицу с разных направлений возникает равнодействующая сила определённого направления. Поскольку подобные флуктуации (случайные отклонения физической величины от её среднего значения) очень кратковременны, то в следующий миг направление равнодействующей меняется и, следовательно, изменится направление перемещения частицы. Отсюда наблюдающаяся хаотичность броуновского движения, которая отражает хаотичность молекулярного движения.

Открытие броуновского движения имело большое значение для изучения строения вещества. Оно показало, что тела действительно состоят из отдельных частиц — молекул — и что молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении.

Полная теория броуновского движения была разработана Эйнштейном и Смолуховским в 1905–1906 гг. и экспериментально подтверждена Ж. Перреном. Выводы теории показали, что среднее значение квадрата смещения броуновской частицы за определённый промежуток времени пропорционально этому промежутку времени, температуре и постоянной Больцмана.

Таким образом, броуновское движение является самым ярким подтверждением теплового движения молекул — одного из положений молекулярно-кинетической теории.

## Диффузия

Явление, при котором происходит взаимное проникновение молекул одного вещества между молекулами другого, называется **диффузией**.

Явление это объясняется свойством молекул находиться в непрерывном движении.

Подтверждением движения молекул газа является всем известное распространение запаха какого-либо пахучего вещества, внесенного в комнату.

В жидкостях наблюдать взаимное проникновение одного вещества в другое можно, если в крепкий раствор медного купороса осторожно добавить воду. Вначале резкая граница между темно-голубым медным купоросом и бесцветной водой со временем исчезает. Благодаря непрерывному и беспорядочному движению молекул этот процесс в конце концов приводит к тому, что вся жидкость становится однородной.

В твёрдых телах также наблюдается диффузия. Так, в одном из опытов гладко отшлифованные пластины свинца и золота положили друг на друга и сжали грузом. Через пять лет золото и свинец проникли друг в друга на 1 мм.

Скорость диффузии зависит от агрегатного состояния вещества и увеличивается с ростом температуры. В газах, где расстояние между молекулами очень велико по сравнению с их размерами и движение молекул хаотично, скорость диффузии наибольшая. В жидкостях она меньше, так как и расстояние между молекулами меньше, и движение молекул чуть более упорядочено. В твёрдых телах, где наблюдается строгий порядок в расположении атомов (или молекул), а сами они совершают лишь небольшие колебательные движения около своих мест, скорость диффузии наименьшая.



## Взаимодействие частиц вещества

Третье положение МКТ о взаимодействии молекул является очевидным. Достаточно вспомнить, сколько усилий требуется, чтобы сломать, скажем, деревянную палку.

Твёрдые тела и жидкости не распадаются на отдельные молекулы, несмотря на то, что их молекулы разделены промежутками и находятся в непрерывном беспорядочном движении.

Более того, твёрдое тело, например, трудно растянуть или сжать. Чем же объяснить, что молекулы в телах не только удерживаются друг около друга, но и в некоторых случаях промежутки между ними трудно увеличить?

Дело в том, что молекулы взаимодействуют друг с другом, и природа этого взаимодействия — электрическая. Молекула состоит из заряженных частиц — электронов и ядер. Заряженные частицы одной молекулы при соответствующих расстояниях взаимодействуют (притягиваются или отталкиваются) с заряженными частицами других молекул.

На расстояниях, превышающих 2–3 диаметра молекул, результирующая сила взаимодействия определяется силами притяжения. Вклад последних по мере уменьшения расстояния между молекулами сначала растёт, затем убывает. Силы взаимодействия обращаются в нуль, когда расстояние между молекулами становится равным сумме радиусов молекул.

Дальнейшее уменьшение расстояния приводит к перекрыванию электронных оболочек, что вызывает быстрое нарастание сил отталкивания.

## Модели строения газов, жидкостей и твёрдых тел в МКТ

### Газ

Газ — это агрегатное состояние вещества, в котором составляющие его атомы и молекулы почти свободно и хаотически движутся в промежутках между столкновениями. Во время столкновения молекулы резко меняют скорость и направление своего движения. Время столкновения молекул намного меньше промежутка времени между двумя столкновениями.

Объём, занимаемый газом, значительно сильнее зависит от давления и температуры, чем объём жидкостей и твёрдых тел. Газ можно сжать так, что его объём уменьшится в несколько раз. Это значит, что расстояние между молекулами  $l$  намного больше размеров самих молекул:  $l \gg d$ . На таких расстояниях молекулы очень слабо притягиваются друг к другу. По этой причине газы не имеют собственной формы и постоянного объёма. Нельзя заполнить газом, например, половину бутылки или стакана.

В отличие от жидкостей и твёрдых тел газы не образуют свободной поверхности и заполняют весь доступный им объём.

Газообразное состояние — самое распространённое состояние вещества Вселенной (межзвездное вещество, туманности, звёзды, атмосферы планет). По химическим свойствам газы и их смеси очень разнообразны — от малоактивных инертных газов до взрывчатых смесей.

Беспрерывно и хаотически двигаясь, молекулы газа сталкиваются не только друг с другом, но и со стенками сосуда, в котором находятся. Молекул в газе много, потому и число их ударов очень велико. Хотя сила удара одной молекулы мала, но действие всех молекул на стенки сосуда значительно, оно и составляет давление газа.

### Жидкость

**Жидкость** — вещество в состоянии, промежуточном между твёрдым и газообразным. Это агрегатное состояние вещества, в котором молекулы (или атомы) связаны между собой настолько, что это позволяет ему сохранять свой объём, но недостаточно сильно, чтобы сохранять и форму.

**Жидкости легко меняют свою форму, но сохраняют объём.** В обычных условиях они принимают форму сосуда, в котором находятся.

Поверхность жидкости, не соприкасающаяся со стенками сосуда, называется **свободной поверхностью**. Она образуется в результате действия силы тяжести на молекулы жидкости.

Свойства жидкостей объясняются тем, что промежутки между их молекулами меньше размеров молекул. Объяснение поведения жидкостей на основе характера молекулярного движения жидкости было дано советским учёным Я. И. Френкелем. Оно заключается в следующем. Молекула жидкости колеблется около положения временного равновесия, сталкиваясь с другими молекулами из ближайшего окружения. Время от времени ей удаётся совершить «прыжок», чтобы покинуть своих соседей из ближайшего окружения и продолжать совершать колебания уже среди других соседей. Время оседлой жизни молекулы воды, т. е. время колебания около одного положения равновесия при комнатной температуре, равно в среднем  $10^{-11}$  с. Время одного колебания значительно меньше —  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  с.

Поскольку расстояния между молекулами жидкости малы, то попытка уменьшить объём жидкости приводит к деформации молекул, они начинают отталкиваться друг от друга, чем и объясняется малая сжимаемость жидкости. Текучесть жидкости объясняется тем, что «прыжки» молекул из одного оседлого положения в другое происходят по всем направлениям с одинаковой частотой. Внешняя сила не меняет заметным образом число «прыжков» в секунду, она лишь задаёт их преимущественное направление, чем и объясняется текучесть жидкости и то, что она принимает форму сосуда.

## Твёрдое тело. Кристаллические и аморфные тела

**Твёрдое тело** — агрегатное состояние вещества, характеризующееся постоянством формы и характером движения атомов, которые совершают малые колебания около положений равновесия.

Молекулы или атомы большинства твёрдых тел, таких как лёд, соль, алмаз, металлы, расположены в определённом порядке. Такие твёрдые тела называют **кристаллическими**. Хотя частицы этих тел и находятся в движении, движения эти представляют собой колебания около определённых точек (положений равновесия). Частицы не могут уйти далеко от этих точек, поэтому твёрдое тело сохраняет свою форму и объём.

Кроме того, в отличие от жидкостей, точки положений равновесия атомов или ионов твёрдого тела, будучи соединёнными, располагаются в вершинах правильной пространственной решётки, которая называется **кристаллической**.

Положения равновесия, относительно которых происходят тепловые колебания частиц, называются **узлами кристаллической решётки**.

**Монокристалл** — твёрдое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решётку (одионый кристалл). Одним из главных свойств монокристаллов, которым они отличаются от жидкостей и газов, является анизотропия их физических свойств. **Анизотропия** — это зависимость физических свойств от направления в кристалле. Анизотропными являются механические свойства (например, известно, что слюду легко расслоить в одном направлении и очень трудно — в перпендикулярном), электрические свойства (электропроводность многих кристаллов зависит от направления), оптические свойства (явление двойного лучепреломления и дихроизма — анизотропии поглощения; так, например, монокристалл турмалина «окрашен» в разные цвета — зелёный и бурый, в зависимости от того, с какой стороны на него посмотреть).

**Поликристалл** — твёрдое тело, состоящее из беспорядочно ориентированных монокристаллов. Поликристаллическими являются большинство твёрдых тел, с которыми мы имеем дело в быту — соль, сахар, различные металлические изделия. Беспорядочная ориентация сросшихся микрокристалликов, из которых они состоят, приводит к исчезновению анизотропии свойств.

Кроме кристаллических и твёрдым телам относят также аморфные тела. Аморфный в переводе с греческого означает «бесформенный».

**Аморфные тела** — это твёрдые тела, для которых характерно неупорядоченное расположение частиц в пространстве. В этих телах молекулы (или атомы) колеблются около хаотически расположенных точек и, подобно молекулам жидкости, имеют определённое время оседлой жизни. Но, в отличие от жидкостей, время это у них очень велико.

К аморфным телам относятся стекло, янтарь, различные другие смолы, пластмассы. Хотя при комнатной температуре эти тела сохраняют свою форму, но при повышении температуры они постепенно размягчаются и начинают течь, как жидкости: **у аморфных тел нет определённой температуры плавления.**

Этим они отличаются от кристаллических тел, которые при повышении температуры переходят в жидкое состояние не постепенно, а скачком (при вполне определённой температуре — температуре плавления).

Все аморфные тела **изотропны**, т. е. имеют одинаковые физические свойства по разным направлениям. При ударе они ведут себя как твёрдые тела — раскалываются, а при очень длительном воздействии — текут.

В настоящее время есть много веществ в аморфном состоянии, полученных искусственным путём, например, аморфные и стеклообразные полупроводники, магнитные материалы и даже металлы.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

### ♦ Закончите предложения.

1. Число атомов, содержащихся в 1 моле, называется

---

2. Число частиц вещества, выраженное в молях, называется

---

3. Явление, при котором происходит взаимное проникновение молекул одного вещества между молекулами другого, называется

### ♦ Запишите формулы.

1. Количество вещества  $\nu =$
2. Молярная масса  $M =$
3. Связь между относительной молекулярной массой  $M_r$  и молярной массой  $M$ :

### ♦ Запишите основные положения МКТ.

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

---



---

♦ Заполните таблицу.

Характеристика	Газ	Жидкость	Твёрдое тело
Сила взаимодействия между молекулами			
Наличие внутренней структуры			
Сохраняют объём			

Ответы на тестовые задания (неделя 13) \_\_\_\_\_

1 — 3. 2 — 2. 3 — 1. 4 — 3. 5 — 2. 6 — 1.

# НЕДЕЛЯ 14

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 2.1. Молекулярная физика
- 2.1.6. Модель идеального газа
- 2.1.7. Связь между давлением и средней кинетической энергией теплового движения молекул идеального газа
- 2.1.8. Абсолютная температура
- 2.1.9 Связь температуры газа со средней кинетической энергией его частиц
- 2.1.10 Уравнение  $p = nkT$

## Модель идеального газа в МКТ

**Идеальный газ** — это теоретическая модель газа, в которой пренебрегают размерами и взаимодействиями частиц газа и учитывают лишь их упругие столкновения. Предполагается, что внутренняя энергия идеального газа определяется лишь кинетической энергией его частиц (т.е. потенциальной энергией взаимодействия молекул пренебрегают).

Модель идеального газа была предложена в 1847 г. Дж. Герапатом. На основе этой модели были теоретически выведены газовые законы (закон Бойля — Мариотта, закон Гей-Люссака, закон Шарля, закон Авогадро), которые ранее были установлены экспериментально. Модель идеального газа была положена в основу молекулярно-кинетической теории (МКТ) газа.

В современной физике её используют также для описания ансамблей любых слабовзаимодействующих частиц. Модель идеального газа справедлива для реальных классических газов при достаточно высоких температурах и разрежениях, когда среднее расстояние между молекулами много больше размеров самих молекул. В этом случае силами притяжения можно пренебречь. Силы же отталкивания проявляются лишь при столкновении друг с другом в течение ничтожно малых интервалов времени.

В простейшей модели газа молекулы рассматриваются как очень маленькие твёрдые шарики, обладающие массой. Движение отдельных молекул подчиняется законам механики Ньютона. Конечно, не все процессы в разреженных газах можно объяснить с помощью такой модели, однако давление газа вычислить с её помощью можно.

## Основное уравнение МКТ (давление газа)

Основное уравнение МКТ устанавливает связь между давлением идеального газа и средней кинетической энергией его молекул.

Вывод основного уравнения МКТ основывается на допущениях модели идеального газа и утверждении: **давление газа является результатом ударов молекул о стенку сосуда.**

Определим давление газа на стенку площадью  $S$  сосуда  $ABCD$  (рис. 66).

Каждая молекула массой  $m_0$ , отскакивая от стенки после упругого соударения со стенкой, передаёт ей импульс  $2m_0v_x$ , где  $v_x$  — проекция скорости молекулы  $\vec{v}$  на ось  $Ox$ , перпендикулярную стенке. Всего за одну секунду суммарный импульс, получаемый стенкой от всех молекул, равен  $2m_0v_xZ$ , где  $Z$  — число таких столкновений (за 1 с) всех молекул.

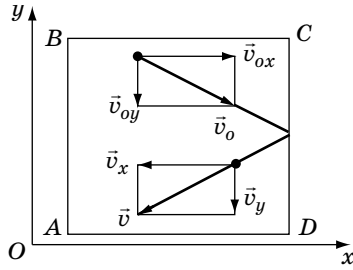


Рис. 66

Очевидно, что  $Z \sim n = \frac{N}{V}$ , где  $n$  — концентрация молекул в единице объёма;  $N$  — число всех молекул. Число  $Z$  пропорционально также скорости молекул  $v_x$  и площади стенки  $S$ :  $Z \sim nv_x S$ . Поскольку все направления при хаотичном движении молекул газа равновероятны, то из всех молекул, имеющих составляющую скорости  $v_x$ , только половина движется в сторону стенки  $CD$ , вторая половина — в сторону  $AB$  (т.е. в обратную).

Поэтому  $Z = \frac{1}{2} nv_x S$ , а полный импульс, переданный стенке за 1 с, равен  $2m_0 v_x Z = m_0 n v_x^2 S$ . Поскольку изменение импульса точки (тела) за единицу времени равно действующей на него силе  $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$ , то  $F = m_0 n v_x^2 S$ .

В действительности, поскольку речь идёт о большом количестве молекул, движущихся с разными скоростями, силу следует усреднить:  $\bar{F} = m_0 n \overline{v_x^2} S$ .

Сила эта зависит, таким образом, от среднего квадрата скорости  $\overline{v_x^2}$ . Поскольку вследствие хаотичности движения все направления равноправны, то:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \quad (2.5)$$

С другой стороны, известно, что квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат, поэтому:  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ .

Усредняя это выражение по всем молекулам и учитывая (2.5), получим:  $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2}$ .

$$\text{Отсюда: } \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}.$$

$$\text{С учётом последней формулы } \bar{F} = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} S.$$

Следовательно, давление на стенку сосуда равно:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}. \quad (2.6)$$

Это — **основное уравнение МКТ**, первое количественное соотношение, полученное в МКТ.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Найти давление газа, если его концентрация равна  $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ , а средняя кинетическая энергия каждого атома  $6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ .

- 1) 18 кПа
- 2) 200 кПа
- 3) 120 кПа
- 4) 90 кПа

2. Найти давление газа, если его плотность  $2 \text{ кг/м}^3$ , а среднее значение квадрата скорости его молекул  $36 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

- 1) 120 кПа
- 2) 240 кПа
- 3) 360 кПа
- 4) 480 кПа

3. Газ массой 3 кг занимает объём  $10 \text{ м}^3$ . Найти среднюю квадратичную скорость молекул газа, если давление его  $0,4 \text{ МПа}$ .

- 1)  $2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
- 2)  $3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
- 3)  $1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
- 4)  $4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$

4. Найти среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул при температуре  $30^\circ\text{C}$ .

- 1)  $6,3 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$
- 2)  $3,7 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$
- 3)  $5,1 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$
- 4)  $8,4 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$

5. Сколько молекул содержится в  $2 \text{ м}^3$  газа при давлении  $300 \text{ кПа}$  и температуре  $27^\circ\text{C}$ ?

- 1)  $1,4 \cdot 10^{26}$
- 2)  $2 \cdot 10^{26}$
- 3)  $27 \cdot 10^{26}$
- 4)  $6 \cdot 10^{26}$

6. Найти температуру газа, если средняя кинетическая энергия хаотического движения его молекул равна  $8,28 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ .

- 1) 200 К
- 2) 400 К
- 3) 800 К
- 4) 273 К

Уравнение (2.6) позволяет получить связь между давлением и средней кинетической

энергией молекул  $\bar{E}_k = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ :

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k. \quad (2.7)$$

**Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объёма.**

Важно подчеркнуть, что здесь речь идёт о средней кинетической энергии молекул газа. Это означает, что давление газа — величина, органически связанная с тем, что газ состоит из большого числа молекул. Давление газа — понятие, имеющее статистический характер (имеет смысл только для систем с очень большим числом частиц).

## Температура и её измерение

**Температура** — физическая величина, характеризующая тепловое состояние тел.

В окружающем нас мире происходят различные явления, связанные с нагреванием и охлаждением тел. Их называют тепловыми явлениями. Так, при нагревании холодная вода сначала становится тёплой, а затем горячей; вынутая из пламени металлическая деталь постепенно охлаждается и т. д. Степень нагретости тела, или его тепловое состояние, мы обозначаем словами «тёплый», «холодный», «горячий». Для количественной оценки этого состояния и служит температура.

Тела, состоящие из очень большого числа атомов или молекул, в физике называют **макроскопическими**. Размеры макроскопических тел во много раз превышают размеры атомов.

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называют **макроскопическими параметрами**. К ним относятся объём, давление, температура, концентрация частиц, масса, плотность, намагниченность и т. д. Температура — один из важнейших макроскопических параметров системы, характеристика её теплового равновесия.

**Тепловым, или термодинамическим, равновесием** называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что не меняются объём и давление в системе, не происходят фазовые превращения, не меняется температура. Однако микроскопические процессы не прекращаются: скорости молекул меняются, они перемещаются, сталкиваются.

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел — **термодинамическая система** — может находиться в различных состояниях теплового равновесия. В каждом из этих состояний температура имеет своё вполне определённое значение.

Температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы: во всех частях системы, находящихся в состоянии теплового равновесия, температура имеет одно и то же значение (это единственный макроскопический параметр, обладающий таким свойством).

Если два тела имеют одинаковую температуру, между ними не происходит теплообмен, если разную — теплообмен происходит, причём тепло передаётся от более нагретого тела к менее нагретому до полного выравнивания температур.

Измерение температуры основано на зависимости какой-либо физической величины (например, объёма) от температуры. Эта зависимость и используется в температурной шкале термометра — прибора, служащего для измерения температуры.

Действие термометра основано на тепловом расширении вещества. При нагревании столбик используемого в термометре вещества (например, ртути или спирта) увеличивается, при охлаждении — уменьшается. Используемые в быту термометры позволяют выразить температуру вещества в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

А. Цельсий (1701–1744) — шведский учёный, предложивший использовать стоградусную шкалу температур. В температурной шкале Цельсия за нуль (с середины XVIII в.) принимается температура тающего льда, а за 100 градусов — температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении.

Поскольку различные жидкости расширяются с повышением температуры по-разному, то температурные шкалы в термометрах с разными жидкостями различны.

Поэтому в физике используют идеальную газовую шкалу температур, основанную на зависимости объёма (при постоянном давлении) или давления (при постоянном объёме) газа от температуры.

## Шкала абсолютных температур

Согласно основному уравнению МКТ, давление  $p$  прямо пропорционально средней кинетической энергии  $\bar{E}$  поступательного движения молекул:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \quad (2.8)$$

где  $n$  — объёмная концентрация молекул. Заменяя в (2.8)  $n$  отношением числа молекул  $N$  к объёму газа  $V$   $\left(n = \frac{N}{V}\right)$ , получим:

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}. \quad (2.9)$$

В состоянии теплового равновесия при постоянном объёме средняя кинетическая энергия данной массы газа должна иметь вполне определённое значение, как и температура.

Согласно формуле (2.9) это означает, что отношение  $\frac{pV}{N}$  для данной температуры должно быть одним и тем же для любых идеальных газов. То, что это действительно так, было подтверждено экспериментально для разных газов, находящихся в условиях теплового равновесия при постоянном объёме (измерялось давление).

### Абсолютная температура

Таким образом, величина  $\Theta = \frac{pV}{N}$ , которую, в отличие от микропараметра  $\bar{E}$ , легко измерить, является вполне однозначной характеристикой теплового состояния газа, как и температура. Измеряется  $\Theta$  (как и энергия) в джоулях. Зависит она только от температуры и может рассматриваться как естественная мера температуры. Однако в силу укоренившейся привычки измерять температуру в градусах был введён коэффициент пропорциональности  $k$  между температурой  $\Theta$ , выраженной в энергетических единицах, и температурой  $T$ , выраженной в градусах:

$$\Theta = kT, \quad (2.10)$$

или

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (2.11)$$

Температура  $T$ , определяемая равенством (2.10), называется **абсолютной температурой**.



Значения температуры, определённой по формуле (2.9), всегда положительны в силу положительности  $\Theta = \frac{pV}{N}$  (ни давление, ни объём, ни число частиц отрицательными быть не могут). Поэтому минимальным значением температуры является нуль. Температура может равняться нулю, если давление либо объём равны нулю. Из принятого определения температуры следует, что нулем температуры является температура, при которой прекращается хаотическое движение молекул. Она называется **абсолютным нулем температуры**.

Температура, как и давление, определяется средней кинетической энергией молекул идеального газа. Поэтому температура, как и давление, является статистической величиной. Нельзя говорить о температуре одной или нескольких молекул.

Абсолютную шкалу температур ввёл английский учёный У. Кельвин в 1850 г. Нулевая температура по ней соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры равна градусу по шкале Цельсия. Единица абсолютной температуры является одной из семи основных единиц СИ и измеряется в **кельвинах** (К).

Связь между температурами, измеренными по шкалам Цельсия ( $t$ ) и Кельвина ( $T$ ), описывается формулой:

$$T(\text{К}) = t(^{\circ}\text{С}) + 273,15 \text{ К}.$$

Абсолютный нуль равен  $-273,15^{\circ}\text{С}$ . Как правило, при расчётах пользуются округлённым значением абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{С}$ ).

### Постоянная Больцмана

Коэффициент  $k$  в формуле (2.10) называется постоянной Больцмана в честь одного из основателей молекулярно-кинетической теории газа и составляет  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ .

**Постоянная Больцмана связывает температуру  $\Theta$  в энергетических единицах с температурой  $T$  в кельвинах.** Это одна из наиболее важных постоянных в МКТ.

## Температура как мера кинетической энергии

Из основного уравнения МКТ, записанного в форме (2.9)  $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$ , и определения абсолютной температуры согласно (2.11)  $\frac{pV}{N} = kT$ , получим:  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ .

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

Из полученного результата однозначно следует, что **абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул**.

Соотношение между температурой и кинетической энергией справедливо для любых тел, подчиняющихся законам механики Ньютона.

Из формулы (2.7) может быть получена **зависимость давления газа от абсолютной температуры  $T$  и концентрации его молекул**, если воспользоваться выражением для средней кинетической энергии:

$$p = nkT, \quad (2.12)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Из формулы (2.12) очевидно, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одинакова.

Отсюда следует известный закон Авогадро:

**В равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.**

Средняя скорость теплового движения молекул может быть также выражена через абсолютную температуру, если в формуле

$$\overline{E} = \frac{3}{2} kT \text{ заменить } \overline{E} \text{ на } \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}: \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT \rightarrow \overline{v^2} = 3 \frac{kT}{m_0}.$$

Квадратный корень из этой величины — **средняя квадратичная скорость**:  $\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Запишите положения модели идеального газа.

1. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

♦ Запишите основное уравнение МКТ.

$$p = \underline{\hspace{2cm}}$$

♦ Запишите связь между температурами, измеренными по шкалам Цельсия ( $t$ ) и Кельвина ( $T$ ).

$$T = t \underline{\hspace{2cm}}$$

♦ Запишите пропуск в формуле для зависимости давления газа от температуры.

$$p = \underline{\hspace{2cm}} T.$$

Ответы на тестовые задания (неделя 14) \_\_\_\_\_

1 — 3. 2 — 2. 3 — 1. 4 — 1. 5 — 1. 6 — 2.

- 2.1. Молекулярная физика
- 2.1.11. Уравнение Менделеева – Клапейрона
- 2.1.12. Изопроцессы: изотермический, изохорный, изобарный, адиабатный процессы
- 2.1.13. Насыщенные и ненасыщенные пары

### Уравнение Менделеева – Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

**Уравнение состояния идеального газа** — это зависимость между параметрами идеального газа — давлением  $p$ , объёмом  $V$  и абсолютной температурой  $T$ , определяющими его состояние:

$$pV = \nu RT, \quad (2.13)$$

где  $\nu$  зависит от массы газа  $m$  и его молекулярной массы  $M$ . В таком виде уравнение впервые получено в 1834 г. французским учёным Б. П. Э. Клапейроном.

В 1874 г. Д. И. Менделеев вывел уравнение состояния для одного моля идеального газа:  $pV = RT$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная. Если молярная масса газа —  $M$ , то:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2.14)$$

Уравнение состояния в форме (2.14) называется **уравнением Менделеева – Клапейрона**. Оно объединяет газовые законы Гей-Люссака, Бойля – Мариотта, Авогадро, Шарля.

Уравнение состояния (2.14) может быть получено из зависимости давления от температуры  $p = nkT$  (2.12), если в неё подставить концентрацию молекул  $n$  из выражения

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \cdot \frac{m}{M} N_A, \quad (2.15)$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро,  $N$  — число молекул в теле.

В результате получим:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T, \quad (2.16)$$

где  $k N_A = R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль·К;  $k$  — постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Заменив в (2.16)  $k N_A$  на  $R$ , получаем уравнение состояния в виде (2.14). Отношение уравнений (2.14) или (2.13) при двух наборах параметров  $p_1, V_1, T_1$  и  $p_2, V_2, T_2$  даёт:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.}$$

### Изопроцессы в газах

**Изопроцессами** называются процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров: давления ( $p$ ), объёма ( $V$ ), температуры ( $T$ ). В идеальном газе эти процессы

подчиняются газовым законам — количественным зависимостям между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего параметра.

**Закон Бойля – Мариотта**

Закон Бойля – Мариотта — один из основных газовых законов, он описывает изотермические процессы в газе (происходящие при постоянной температуре).

Закон гласит:

**Для данной массы произведение давления газа на его объём постоянно, если температура газа не меняется:**

$$pV = \text{const при } T = \text{const}.$$

Этот закон был экспериментально открыт английским учёным Р. Бойлем в 1662 г., в 1676 г. его сформулировал также французский учёный Э. Мариотт.

Закон строго выполняется только для идеальных газов. Для реальных газов он выполняется достаточно хорошо при небольших давлениях и высоких температурах. Так, при давлении 100 атм и температуре 0°C отклонение измеренного значения  $pV$  от расчётного составляет 7%. Закон Бойля — Мариотта, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа.

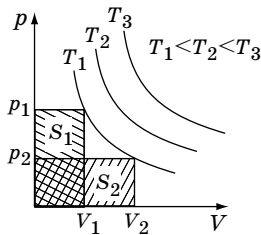


Рис. 67

Графики зависимости  $p(V)$  при  $T = \text{const}$  ( $p = \text{const}/V$ ) называются изотермами и представляют собой равносторонние гиперболы (площади  $S_1 = S_2$ ). Чем выше температура, тем выше лежит соответствующая ей изотерма (рис. 67).

**Закон Шарля**

**Давление  $p$  данной массы газа при постоянном объёме пропорционально температуре:**

$$p = \text{const} \cdot T \text{ при } V = \text{const}. \tag{2.17}$$

Закон был открыт французским физиком Ж. Шарлем в 1787 году.

**ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ**

- 1. Газ сжат изотермически от объёма 4 мл до объёма 2 мл. Давление при этом увеличилось на 2 кПа. Найти начальное давление.  
1) 4 кПа  
2) 8 кПа  
3) 2 кПа  
4) 12 кПа
- 2. Как изменится давление газа в цилиндре, если поршень медленно опустить на 1/3 высоты цилиндра?  
1) 0,2  
2) 0,5  
3) 1,2  
4) 1,5
- 3. Давление насыщенного пара зависит от  
1) занимаемого объёма  
2) температуры  
3) температуры и химического состава пара  
4) объёма и температуры
- 4. Какую величину измеряют с помощью психрометра?  
1) относительную влажность  
2) абсолютную влажность  
3) плотность  
4) температуру

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называется **изохорным** (от греч. *hora* — пространство).

Закон Шарля, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const}.$$

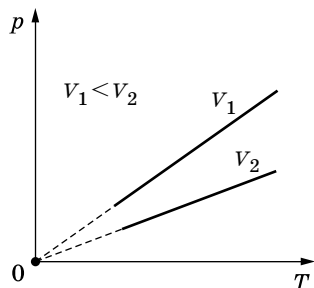


Рис. 68

Согласно (2.17), давление газа линейно зависит от температуры при постоянном объёме. Эта зависимость изображается прямой, которая называется **изохорой** (рис. 68). С ростом объёма газа при постоянной температуре давление его, согласно закону Бойля – Мариотта, падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объёму, лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объёму.

В соответствии с (2.17), все изохоры начинаются в точке  $T = 0$  (давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю).

Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объёма.

### Закон Гей-Люссака

При постоянном давлении  $p$  объём  $V$  идеального газа меняется линейно с температурой. То есть

$$V = V_0 (1 + \alpha t), \quad (2.18)$$

где  $V_0$  — начальный объём,  $t$  — разность начальной и конечной температур. Коэффициент теплового расширения идеальных газов  $\alpha = (1/273,15)\text{K}^{-1}$  одинаков для всех газов.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называется **изобарным** (от греч. *baros* — вес, тяжесть).

Закон открыт французским учёным Ж. Гей-Люссаком в 1802 г. и независимо от него Дж. Дальтоном в 1801 г.

Закон Гей-Люссака, как и другие газовые законы, является следствием уравнения состояния идеального газа. Это становится очевидным, если в (2.18) заменить  $t$  на абсолютную температуру  $T = t + 273,15$ , а коэффициент расширения  $\alpha$  — его численным значением  $1/273,15$ :

$$V = V_0 \frac{T}{273,15}.$$

или

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const}. \quad (2.19)$$

Для газа данной массы отношение объёма к температуре постоянно, если давление газа не меняется.

Согласно (2.19), объём газа линейно зависит от температуры при постоянном давлении:

$$V = \text{const} \cdot T.$$

Эта зависимость графически изображается прямой, которая называется **изобарой** (рис. 69).

Различным давлениям соответствуют разные изобары. С ростом давления объём газа при постоянной температуре, согласно закону Бойля — Мариотта, уменьшается, поэтому изобара,

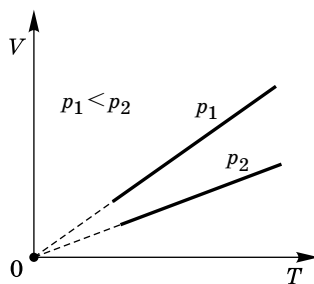


Рис. 69

соответствующая более высокому давлению  $p_2$ , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению  $p_1$ .

В области низких температур все изобары идеального газа сходятся в точке  $T = 0$ , но это не означает, что объём реального газа действительно обращается в нуль. При низких температурах все газы обращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния не применимо.

## Свойства тел в разных агрегатных состояниях

**Агрегатные состояния вещества** (от лат. *aggrego* — присоединяю) — это состояния одного и того же вещества в различных интервалах (промежутках) температур и давлений.

Агрегатными состояниями принято считать **газообразное, жидкое и твёрдое**.

Самым простым примером существования одного и того же вещества в этих трёх агрегатных состояниях являются лёд, вода и водяной пар. Невидимый водяной пар всегда присутствует в окружающем нас воздухе. Вода существует в интервале температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ , лёд — при температуре ниже  $0^\circ\text{C}$ . При температуре выше  $100^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении молекулы воды существуют только в газообразном состоянии — в виде водяного пара. Вода, лёд и водяной пар — это одно и то же вещество с химической формулой  $\text{H}_2\text{O}$ .

Многие вещества в обыденной жизни мы наблюдаем только в одном из агрегатных состояний. Так, кислород в окружающем нас воздухе представляет собой газ. Но при температуре  $-193^\circ\text{C}$  он превращается в жидкость. Охладив эту жидкость до  $-219^\circ\text{C}$ , мы получим твёрдый кислород. И наоборот, железо в обычных условиях твёрдое. Однако при температуре  $1535^\circ\text{C}$  железо плавится и превращается в жидкость. Над расплавленным железом будет находиться газ — пар из атомов железа.

Различные агрегатные состояния существуют у каждого вещества. Отличаются эти вещества не молекулами, а тем, как эти молекулы расположены и как движутся. Расположение молекул воды в трёх агрегатных состояниях показано на рис. 70.

При определённых условиях вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое.

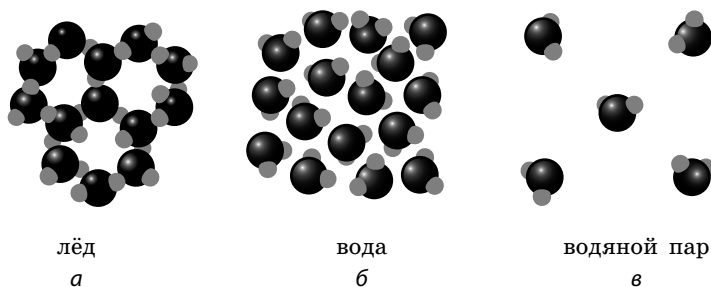


Рис. 70

Всего различают шесть процессов, приводящих к агрегатным превращениям вещества (рис. 71).

Переход вещества из твёрдого (кристаллического) состояния в жидкое называется **плавлением**, обратный процесс называется **кристаллизацией**, или **отвердеванием**. Пример плавления — таяние льда, обратный процесс происходит при замерзании воды.

Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием**, обратный процесс называется **конденсацией**. Пример парообразования — испарение воды, обратный процесс можно наблюдать при выпадении росы.

Переход вещества из твёрдого состояния сразу в газообразное (минуя жидкое) называется **сублимацией**, или **возгонкой**, обратный процесс называется **десублимацией**. Например, графит можно нагреть до тысячи, двух тысяч и даже трёх тысяч градусов и, тем не менее, в жидкость он не превратится: он будет сублимироваться, т. е. из твёрдого состояния сразу переходить в газообразное. Все запахи, которыми обладают твёрдые тела (например, нафталин), также обусловлены возгонкой: вылетая из твёрдого тела, молекулы образуют над ним газ (или пар), обладающий запахом.

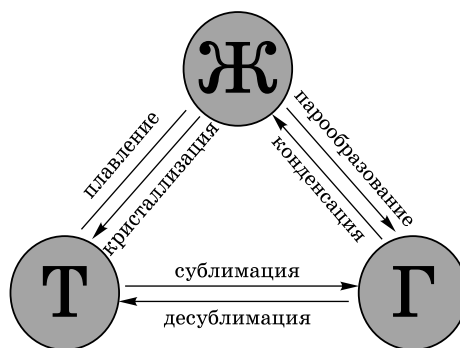


Рис. 71

Примером десублимации является образование на окнах зимой узоров из кристалликов льда. Эти красивые узоры образуются при десублимации водяного пара, находящегося в воздухе.

Переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое играют важную роль не только в природе, но и в технике. Так, воду, превращённую в пар, можно использовать в паровых турбинах на электростанциях. Из расплавленных металлов на заводах получают различные сплавы: сталь, чугун, латунь и т. д. Для понимания этих процессов надо знать, что происходит с веществом при изменении его агрегатного состояния и при каких условиях это изменение возможно.

## Испарение и конденсация

**Испарение** — это переход вещества из жидкого состояния в газообразное (пар), происходящее со свободной поверхности жидкости. Сублимацию также называют испарением.

Из повседневных наблюдений известно, что количество любой жидкости (бензина, эфира, воды), находящейся в открытом сосуде, постепенно уменьшается. Жидкость не исчезает бесследно — она превращается в пар. Испарение — это один из видов парообразования. Другой вид — это кипение.

Как происходит испарение? Молекулы любой жидкости находятся в непрерывном и беспорядочном движении, причём чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Если вблизи поверхности окажется молекула с кинетической энергией, достаточной для преодоления сил межмолекулярного притяжения, она вылетит из жидкости. То же самое повторится с другой быстрой молекулой, со второй, третьей и т. д. Вылетая наружу, эти молекулы образуют над жидкостью пар. Образование этого пара и есть испарение.

Поскольку при испарении из жидкости вылетают более быстрые молекулы, средняя кинетическая энергия оставшихся в жидкости молекул становится всё меньше и меньше. Это значит, что внутренняя энергия испаряющейся жидкости уменьшается. Поэтому если нет притока энергии к жидкости извне, температура испаряющейся жидкости понижается,

жидкость охлаждается (именно поэтому, в частности, человеку в мокрой одежде холоднее, чем в сухой, особенно при ветре).

Чтобы испарение жидкости происходило без изменения её температуры, жидкости необходимо сообщать энергию.

Количество теплоты, которое необходимо сообщить жидкости для образования единицы массы пара при постоянной температуре, называется **теплотой парообразования**.

В отличие от кипения испарение происходит при любой температуре, однако с повышением температуры жидкости скорость испарения возрастает. Чем выше температура жидкости, тем больше быстро движущихся молекул имеет достаточную кинетическую энергию, чтобы преодолеть силы притяжения соседних частиц и вылететь за пределы жидкости, и тем быстрее идёт испарение.

Скорость испарения зависит от рода жидкости. Быстрее испаряются летучие жидкости, у которых силы межмолекулярного взаимодействия малы (например, эфир, спирт, бензин).

Скорость испарения жидкости зависит от площади её свободной поверхности: чем больше площадь, тем большее количество молекул одновременно вылетает в воздух.

Испарение играет важную роль в энергетике, холодильной технике, в процессах сушки, испарительного охлаждения. Например, в космической технике быстроиспаряющимися веществами покрывают спускаемые аппараты. При прохождении через атмосферу планеты корпус аппарата в результате трения нагревается, и покрывающее его вещество начинает испаряться и охлаждать космический аппарат, спасая его тем самым от перегрева.

**Конденсация** (от лат. *condensatio* — уплотнение, сгущение) — переход вещества из газообразного состояния (пара) в жидкое или твёрдое состояние.

Известно, что при наличии ветра жидкость испаряется быстрее. Почему? Дело в том, что одновременно с испарением с поверхности жидкости идёт и конденсация. Конденсация происходит из-за того, что часть молекул пара, беспорядочно перемещаясь над жидкостью, снова возвращается в неё. Ветер же выносит вылетевшие из жидкости молекулы и не даёт им возвращаться.

Конденсация может происходить и тогда, когда пар не соприкасается с жидкостью. Именно конденсацией объясняется, например, образование облаков: молекулы водяного пара, поднимающиеся над землей, в более холодных слоях атмосферы группируются в мельчайшие капельки воды, скопления которых и представляют собой облака. Следствием конденсации водяного пара в атмосфере являются также дождь и роса.

При испарении жидкость охлаждается и, став более холодной, чем окружающая среда, начинает поглощать её энергию. При конденсации же, наоборот, происходит выделение некоторого количества теплоты в окружающую среду, и её температура несколько повышается. Количество теплоты, выделяющееся при конденсации единицы массы, равно теплоте испарения.

## Насыщенные и ненасыщенные пары

Если испарение происходит в закрытом сосуде, то сначала число молекул, вылетевших из жидкости, будет больше числа молекул, возвратившихся обратно в жидкость. Поэтому плотность пара в сосуде будет постепенно увеличиваться. С увеличением плотности пара увеличивается и число молекул, возвращающихся в жидкость. Довольно скоро число молекул, вылетающих из жидкости, станет равным числу молекул пара, возвращающихся обратно в жидкость. С этого момента число молекул пара над жидкостью будет постоянным. Для воды при комнатной температуре это число приблизительно равно  $10^{22}$  молекул за 1 с на  $1 \text{ см}^2$  площади поверхности. Наступает так называемое динамическое равновесие между паром и жидкостью.



Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным паром**.

Это означает, что в данном объёме при данной температуре не может находиться большее количество пара. При динамическом равновесии масса жидкости в закрытом сосуде не изменяется, хотя жидкость продолжает испаряться. Точно так же не изменяется и масса насыщенного пара над этой жидкостью, хотя пар продолжает конденсироваться.

При сжатии насыщенного пара, температура которого поддерживается постоянной, равновесие сначала начнёт нарушаться: плотность пара возрастет, и вследствие этого из газа в жидкость будет переходить больше молекул, чем из жидкости в газ; продолжаться это будет до тех пор, пока концентрация пара в новом объёме не станет прежней, соответствующей концентрации насыщенного пара при данной температуре (и равновесие восстановится). Объясняется это тем, что число молекул, покидающих жидкость за единицу времени, зависит только от температуры.

Итак, концентрация молекул насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объёма.

Поскольку давление газа пропорционально концентрации его молекул, то и давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объёма. Давление  $p_0$ , при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют **давлением насыщенного пара**.

При сжатии насыщенного пара большая его часть переходит в жидкое состояние. Жидкость занимает меньший объём, чем пар той же массы. В результате объём пара при неизменной его плотности уменьшается.

Для идеального газа справедлива линейная зависимость давления от температуры при постоянном объёме. Применительно к насыщенному пару с давлением  $p_0$  эта зависимость выражается равенством:

$$p_0 = nkT. \quad (2.20)$$

Так как давление насыщенного пара не зависит от объёма, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Экспериментально определённая зависимость  $p_0(T)$  отличается от зависимости (2.20) для идеального газа (рис. 72). С увеличением температуры давление насыщенного пара растёт быстрее, чем давление идеального газа (участок кривой  $AB$  на рис. 72). Это становится особенно очевидным, если провести изохору через точку  $A$  (пунктирная прямая). Происходит это потому, что при нагревании жидкости часть её превращается в пар и плотность пара растёт. Поэтому, согласно формуле (2.20), давление насыщенного пара растёт не только в результате повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара заключается в изменении массы пара при изменении температуры при неизменном объёме (в закрытом сосуде) или при изменении объёма при постоянной температуре. С идеальным газом ничего подобного происходить не может (МКТ идеального газа не предусматривает фазового перехода газа в жидкость).

После испарения всей жидкости поведение пара будет соответствовать поведению идеального газа (участок  $BC$  кривой на рис. 72).

Если в пространстве, содержащем пары какой-либо жидкости, может происходить дальнейшее испарение этой жидкости, то пар, находящийся в этом пространстве, является **ненасыщенным**.

Пар, не находящийся в состоянии равновесия со своей жидкостью, называется **ненасыщенным**.

Ненасыщенный пар можно простым сжатием превратить в жидкость. Как только это превращение началось, пар, находящийся в равновесии с жидкостью, становится насыщенным.

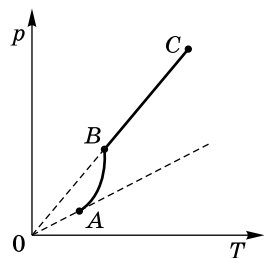


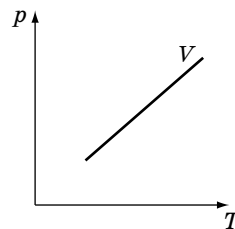
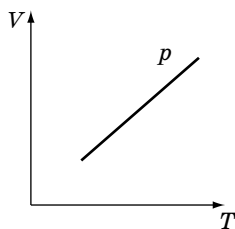
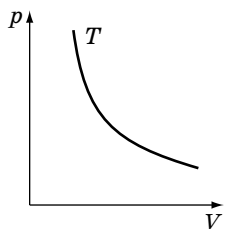
Рис. 72

# КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

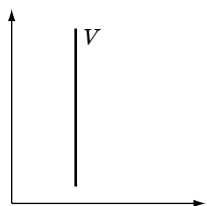
♦ Заполните пропуски в формуле Менделеева – Клайперона.

$$pV = \frac{m}{M} \cdot \underline{\hspace{2cm}}$$

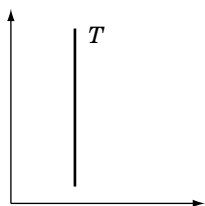
♦ Подпишите графики изотермических процессов.



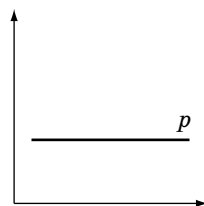
♦ Подпишите координатные оси на графиках изотермических процессов.



изохорический



изотермический



изобарический

♦ Запишите условия, при которых соблюдаются законы:

Шарля  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $\underline{\hspace{2cm}}$

Бойля – Мариотта  $pV = \text{const}$  при  $\underline{\hspace{2cm}}$

Гей-Люссака  $\frac{V}{T} = \text{const}$  при  $\underline{\hspace{2cm}}$

Ответы на тестовые задания (неделя 15)  $\underline{\hspace{2cm}}$

1 — 3. 2 — 4. 3 — 3. 4 — 1.

# НЕДЕЛЯ 16

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 2.1. Молекулярная физика
- 2.1.14. Влажность воздуха
- 2.1.15. Изменение агрегатных состояний вещества: испарение, конденсация, кипение жидкости
- 2.1.16. Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация
- 2.1.17. Изменение энергии в фазовых переходах

## Кипение жидкости

**Кипение** — это интенсивный переход жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объёму жидкости при определённой температуре.

В отличие от испарения, которое происходит при любой температуре жидкости, другой вид парообразования — кипение — возможен лишь при совершенно определённой (при данном давлении) температуре — **температуре кипения**.

При нагревании воды в открытом стеклянном сосуде можно увидеть, что по мере увеличения температуры стенки и дно сосуда покрываются мелкими пузырьками. Они образуются в результате расширения мельчайших пузырьков воздуха, которые существуют в углублениях и микротрещинах не полностью смачиваемых стенок сосуда.

Пары жидкости, которые находятся внутри пузырьков, являются насыщенными. С ростом температуры давление насыщенных паров возрастает, и пузырьки увеличиваются в размерах. С увеличением объёма пузырьков растёт и действующая на них выталкивающая (архимедова) сила. Под действием этой силы наиболее крупные пузырьки отрываются от стенок сосуда и поднимаются вверх. Если верхние слои воды ещё не успели нагреться до  $100^{\circ}\text{C}$ , то в такой (более холодной) воде часть водяного пара внутри пузырьков конденсируется и уходит в воду; пузырьки при этом сокращаются в размерах, и сила тяжести заставляет их снова опускаться вниз. Здесь они опять увеличиваются и вновь начинают всплывать вверх. Попеременное увеличение и уменьшение пузырьков внутри воды сопровождается возникновением в ней характерных звуковых волн: закипающая вода шумит.

Когда вся вода прогреется до  $100^{\circ}\text{C}$ , поднявшиеся вверх пузырьки уже не сокращаются в размерах, а лопаются на поверхности воды, выбрасывая пар наружу. Возникает характерное бульканье — вода кипит.

Кипение начинается после того, как давление насыщенного пара внутри пузырьков сравнивается с давлением в окружающей жидкости.

Во время кипения температура жидкости и пара над ней не меняется. Она сохраняется неизменной до тех пор, пока вся жидкость не выкипит. Это происходит потому, что вся подводимая к жидкости энергия уходит на превращение её в пар.

Температура кипения зависит от давления, оказываемого на свободную поверхность жидкости. Это объясняется зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Пузырек пара растёт, пока давление насыщенного пара внутри него немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из внешнего давления и гидростатического давления столба жидкости.

**Чем больше внешнее давление, тем больше температура кипения.**

Всем известно, что вода кипит при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ . Но так происходит лишь при нормальном атмосферном давлении (примерно  $101\text{ кПа}$ ). При увеличении давления температура кипения воды возрастает. Так, например, в кастрюлях-скороварках пищу варят под давлением около  $200\text{ кПа}$ . Температура кипения воды при этом достигает  $120^{\circ}\text{C}$ . В воде такой температуры процесс варки происходит значительно быстрее, чем в обычном кипятке. Этим и объясняется название «скороварка».

И наоборот, уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения. Например, в горных районах (на высоте  $3\text{ км}$ , где давление составляет  $70\text{ кПа}$ ) вода кипит при температуре  $90^{\circ}\text{C}$ . Поэтому жителям этих районов, использующим такой кипяток, требуется значительно больше времени для приготовления пищи, чем жителям равнин.

У каждой жидкости своя температура кипения, которая зависит от давления насыщенного пара. **Чем выше давление насыщенного пара, тем ниже температура кипения соответствующей жидкости**, т. к. при меньших температурах давление насыщенного пара становится равным атмосферному. Например, при температуре кипения  $100^{\circ}\text{C}$  давление насыщенных паров воды равно  $101\,325\text{ Па}$  ( $760\text{ мм рт. ст.}$ ), а паров ртути — всего лишь  $117\text{ Па}$  ( $0,88\text{ мм рт. ст.}$ ). Кипит ртуть при  $357^{\circ}\text{C}$  при нормальном давлении.

### Теплота парообразования

**Теплота парообразования (теплота испарения)** — количество теплоты, которое необходимо сообщить веществу (при постоянном давлении и постоянной температуре) для полного превращения жидкого вещества в пар. Теплота парообразования равна количеству теплоты, выделяющемуся при конденсации пара в жидкость.

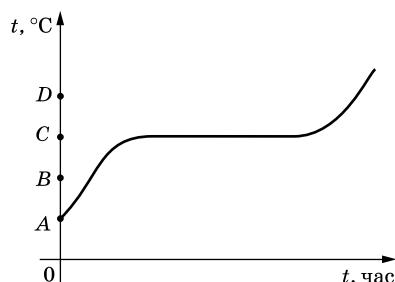
Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведет к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением их потенциальной энергии, т. к. расстояние между молекулами существенно увеличивается.

Опытами установлено, что для полного обращения в пар  $1\text{ кг}$  воды (при температуре кипения) необходимо затратить  $2,3\text{ МДж}$  энергии. Для обращения в пар других жидкостей требуется иное количество теплоты.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой  $1\text{ кг}$  в пар без изменения температуры, называется **удельной теплотой парообразования**. Удельную теплоту парообразования обозначают буквой  $r$  и измеряют в джоулях на килограмм ( $\text{Дж/кг}$ ).

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Выберите правильное утверждение относительно кипения воды в открытом сосуде при повышении атмосферного давления.
  - температура кипения остаётся неизменной
  - температура кипения понижается
  - кипение становится невозможным
  - температура кипения повышается
- На рисунке изображена зависимость температуры от времени некоторого вещества, в начальный момент времени находящегося в твёрдом состоянии. Количество подводимого тепла в единицу времени постоянно. Исходя из этого рисунка можно сделать вывод, что значению температуры плавления соответствует точка на оси ординат



- 1) A
- 2) B
- 3) C
- 4) D

### ДЛЯ ЗАМЕТОК

Чтобы вычислить количество теплоты  $Q$ , необходимое для превращения в пар жидкости любой массы, взятой при температуре кипения, нужно удельную теплоту парообразования  $r$  умножить на массу  $m$ :

$$Q = rm.$$

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q = -rm.$$

## Влажность воздуха

**Влажность воздуха** — это содержание в воздухе водяного пара.

Атмосферный воздух всегда содержит в себе водяные пары. Чем больше их находится в определённом объёме воздуха, тем ближе пар к состоянию насыщения. С другой стороны, чем выше температура воздуха, тем большее количество водяных паров требуется для его насыщения. В зависимости от количества водяных паров, находящихся при данной температуре в атмосфере, воздух бывает различной степени влажности.

Для того чтобы количественно оценить влажность воздуха, пользуются, в частности, понятиями абсолютной и относительной влажности.

**Абсолютная влажность** — это количество граммов водяного пара, содержащееся в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данных условиях, т. е. это плотность водяного пара  $\rho$ , выраженная в  $\text{г/м}^3$ .

**Относительная влажность воздуха**  $\varphi$  — это отношение абсолютной влажности воздуха  $\rho$  к плотности  $\rho_0$  насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

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

Концентрация пара связана с давлением ( $p_0 = nkT$ ), поэтому относительную влажность можно определить как процентное отношение парциального давления  $p$  пара в воздухе к давлению  $p_0$  насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = (p/p_0) \cdot 100 \, \%.$$

Под **парциальным давлением** понимают давление водяного пара, которое он производил бы, если бы все другие газы в атмосферном воздухе отсутствовали.

Если влажный воздух охлаждать, то при некоторой температуре находящийся в нём пар можно довести до насыщения. При дальнейшем охлаждении водяной пар начнёт конденсироваться в виде росы.

## Плавление и кристаллизация

Переход вещества из твёрдого кристаллического состояния в жидкое называется плавлением. Чтобы расплавить твёрдое кристаллическое тело, его нужно нагреть до определённой температуры, т. е. подвести тепло. Температура, при которой вещество плавится, называется **температурой плавления вещества**. Обратный процесс — переход из жидкого состояния в твёрдое — происходит при понижении температуры, т. е. тепло отводится.

Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое называется **отвердеванием**, или **кристаллизацией**. Температура, при которой вещество кристаллизуется, называется **температурой кристаллизации**.

Опыт показывает, что любое вещество кристаллизуется и плавится при одной и той же температуре. На рис. 73 представлен график зависимости температуры кристаллического тела (льда) от времени нагревания (от точки  $A$  до точки  $D$ ) и времени охлаждения (от точки  $D$  до точки  $K$ ). На нём по горизонтальной оси отложено время, а по вертикальной — температура.

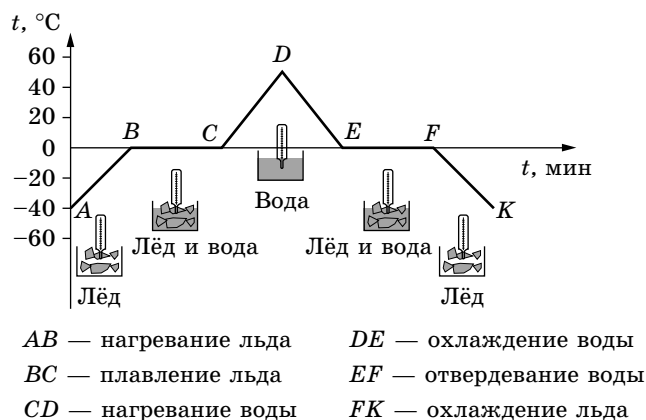


Рис. 73

Вид рассмотренного графика объясняется следующим образом. На участке *AB* благодаря подводимому теплу средняя кинетическая энергия молекул льда увеличивается, и температура его повышается. На участке *BC* вся энергия, получаемая содержимым колбы, тратится на разрушение кристаллической решётки льда: упорядоченное пространственное расположение его молекул сменяется неупорядоченным, меняется расстояние между молекулами, т. е. происходит перестройка молекул таким образом, что вещество становится жидким. Средняя кинетическая энергия молекул при этом не меняется, поэтому неизменной остаётся и температура. Дальнейшее увеличение температуры расплавленного льда-воды (на участке *CD*) означает увеличение кинетической энергии молекул воды вследствие подводимого горелкой тепла.

При охлаждении воды (участок *DE*) часть энергии у неё отбирается, молекулы воды движутся с меньшими скоростями, их средняя кинетическая энергия падает — температура уменьшается, вода охлаждается. При  $0^{\circ}\text{C}$  (горизонтальный участок *EF*) молекулы начинают выстраиваться в определённом порядке, образуя кристаллическую решётку. Пока этот процесс не завершится, температура вещества не изменится, несмотря на отводимое тепло, а это означает, что при отвердевании жидкость (вода) выделяет энергию. Это как раз та энергия, которую поглотил лёд, превращаясь в жидкость (участок *BC*). Внутренняя энергия у жидкости больше, чем у твёрдого тела. Пока вся вода не превратится в лёд, температура не изменится. Лишь после этого начинает уменьшаться температура льда (участок *FK*). При плавлении (и кристаллизации) внутренняя энергия тела меняется скачком.

Металлы, плавящиеся при температуре выше  $1650^{\circ}\text{C}$ , называют **тугоплавкими** (титан, хром, молибден и др.). Самая высокая температура плавления среди них у вольфрама — около  $3400^{\circ}\text{C}$ . Тугоплавкие металлы и их соединения используют в качестве жаропрочных материалов в самолётостроении, ракетостроении и космической технике, атомной энергетике.

Подчеркнем ещё раз, что при плавлении вещество поглощает энергию. При кристаллизации оно, наоборот, отдаёт её в окружающую среду. Получая определённое количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации, среда нагревается. Это хорошо известно многим птицам. Недаром их можно заметить зимой в морозную погоду сидящими на льду, который покрывает реки и озера. Из-за выделения энергии при образовании льда воздух над ним оказывается на несколько градусов теплее, чем в лесу на деревьях, и птицы этим пользуются.

Наличие определённой точки плавления — это важный признак кристаллических веществ. Именно по этому признаку их можно легко отличить от аморфных тел, которые

также относят к твёрдым телам. К ним, в частности, относятся стёкла, очень вязкие смолы, пластмассы.

Аморфные вещества (в отличие от кристаллических) не имеют определённой температуры плавления — они не плавятся, а размягчаются. При нагревании кусок стекла, например, сначала становится из твёрдого мягким, его легко можно гнуть или растягивать; при более высокой температуре кусок начинает менять свою форму под действием собственной тяжести. По мере нагревания густая вязкая масса принимает форму того сосуда, в котором лежит. Эта масса сначала густая, как мёд, затем — как сметана и наконец становится почти такой же маловязкой, как вода. Однако указать определённую температуру перехода твёрдого тела в жидкое здесь невозможно, поскольку её нет.

Причины этого лежат в коренном отличии строения аморфных тел от строения кристаллических. Атомы в аморфных телах расположены беспорядочно. Аморфные тела по своему строению напоминают жидкости. Значит, повышение температуры стекла лишь увеличивает размах колебаний его молекул, даёт им постепенно всё большую и большую свободу перемещения. Поэтому стекло размягчается постепенно и не обнаруживает резкого перехода «твёрдое — жидкое».

**Теплота плавления** — это количество теплоты, которое необходимо сообщить веществу при постоянном давлении и постоянной температуре, равной температуре плавления, чтобы полностью перевести его из твёрдого кристаллического состояния в жидкое.

Теплота плавления равна тому количеству теплоты, которое выделяется при кристаллизации вещества из жидкого состояния.

При плавлении вся подводимая к веществу теплота идёт на увеличение потенциальной энергии его молекул. Кинетическая энергия не меняется, поскольку плавление идёт при постоянной температуре.

Изучая на опыте плавление различных веществ одной и той же массы, можно заметить, что для превращения их в жидкость требуется разное количество теплоты. Например, для того чтобы расплавить 1 кг льда, нужно затратить 332 Дж энергии, а 1 кг свинца — 25 кДж.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо сообщить кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние, называется **удельной теплотой плавления**. Её измеряют в джоулях на килограмм (Дж/кг) и обозначают греческой буквой  $\lambda$  (лямбда).

Удельная теплота кристаллизации равна удельной теплоте плавления, поскольку при кристаллизации выделяется такое же количество теплоты, какое поглощается при плавлении.

Чтобы найти количество теплоты, необходимое для плавления кристаллического тела произвольной массы, или теплоту плавления, надо удельную теплоту плавления этого тела умножить на его массу:  $Q = \lambda m$ .

Количество теплоты, выделяемое телом, считается отрицательным. Поэтому при расчёте количества теплоты, выделяющегося при кристаллизации вещества массой  $m$ , следует пользоваться той же формулой, но со знаком «минус»:  $-Q = \lambda m$ .

**Теплота сгорания** — это количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании топлива.

Для нагревания тел часто используют энергию, выделяющуюся при сгорании топлива. Обычное топливо (уголь, нефть, бензин) содержит углерод. При горении атомы углерода соединяются с атомами кислорода, содержащегося в воздухе, в результате чего образуются молекулы углекислого газа. Кинетическая энергия этих молекул оказывается большей, чем у исходных частиц. Увеличение кинетической энергии молекул в процессе горения называют выделением энергии. Энергия, выделяющаяся при полном сгорании топлива, и есть теплота сгорания этого топлива.

Теплота сгорания топлива зависит от вида топлива и его массы. Чем больше масса топлива, тем больше количество теплоты, выделяющейся при его полном сгорании.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании топлива массой 1 кг, называется **удельной теплотой сгорания топлива**.

Удельную теплоту сгорания обозначают буквой  $q$  и измеряют в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Количество теплоты  $Q$ , выделяющееся при сгорании  $m$  кг топлива, определяют по формуле:

$$Q = qm.$$

Чтобы найти количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива произвольной массы, нужно удельную теплоту сгорания этого топлива умножить на его массу.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Запишите выражение для количества теплоты, выделяющегося при:

конденсации пара \_\_\_\_\_

плавлении \_\_\_\_\_

сгорании \_\_\_\_\_

♦ Закончите предложение.

Отношение абсолютной влажности воздуха  $p$  к плотности  $p_0$  насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах, называется \_\_\_\_\_ .

Ответы на тестовые задания (неделя 16) \_\_\_\_\_

1 — 4. 2 — 3.



# НЕДЕЛЯ 17

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 2.2. Термодинамика
  - 2.2.1. Внутренняя энергия
  - 2.2.2. Тепловое равновесие
  - 2.2.3. Теплопередача
  - 2.2.4. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость вещества
  - 2.2.5. Работа в термодинамике
  - 2.2.6. Уравнение теплового баланса

## ТЕРМОДИНАМИКА

**Термодинамика** — наука о наиболее общих тепловых свойствах макроскопических тел.

В термодинамике не вводятся упрощённые модели изучаемых явлений, поэтому выводы термодинамики имеют универсальный характер; не учитывается молекулярное строение тел. Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы.

**Основные понятия термодинамики:**

- **макроскопическая система** — система, состоящая из большого числа частиц, причём чем большее число частиц входит в систему, тем точнее описание её свойств;
- **замкнутая система** — это система, изолированная от любых внешних воздействий;
- **тело** — макроскопическая система, заключённая в определённый объём;
- **равновесное состояние** — это состояние макроскопической системы, при котором параметры, характеризующие её состояние, остаются неизменными во всех частях системы, т. е. отсутствуют потоки (импульса, энергии, массы и т. д.) между её частями;
- **процесс** — изменение состояния тела со временем. Важными характеристиками процесса являются поглощённое телом количество теплоты  $Q$ , совершённая над ним работа  $A$ .

Главное содержание термодинамики состоит в двух её началах (законах) — первом и втором; первое распространяет закон сохранения энергии на тепловые явления, второе же указывает направление возможных энергетических превращений в природе.

## Внутренняя энергия

**Внутреннюю энергию тела** составляют кинетическая энергия всех его молекул и потенциальная энергия их взаимодействия.

Внутренняя энергия входит в баланс энергетических превращений в природе. После открытия внутренней энергии был сформулирован **закон сохранения и превращения энергии**. Рассмотрим взаимное превращение механической и внутренней энергий. Пусть на свинцовой плите лежит свинцовый шар. Поднимем его вверх и отпустим. Когда мы подняли шар, то сообщили ему потенциальную энергию. При падении шара она уменьшается, т. к. шар опускается всё ниже и ниже. Но с увеличением скорости постепенно увеличивается кинетическая энергия шара. Происходит превращение потенциальной энергии шара в кинетическую. Но вот шар ударился о свинцовую плиту и остановился. И кинетическая, и потенциальная энергии его относительно плиты стали равными нулю. Рассматривая шар и плиту

после удара, мы увидим, что их состояние изменилось: шар немного сплюснулся, и на плите образовалась небольшая вмятина; измерив же их температуру, мы обнаружим, что они нагрелись.

Нагрев означает увеличение средней кинетической энергии молекул тела. При деформации изменяется взаимное расположение частиц тела, поэтому изменяется и их потенциальная энергия. Таким образом, можно утверждать, что в результате удара шара о плиту происходит превращение механической энергии, которой обладал в начале опыта шар, во внутреннюю энергию тела.

Таким образом, одним из способов изменения внутренней энергии тела является работа, совершаемая молекулами тела (или другими телами) над данным телом.

### Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

Поскольку молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, их потенциальная энергия считается равной нулю. Внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией беспорядочного поступательного движения его молекул.

Для её вычисления нужно умножить среднюю кинетическую энергию одного атома  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$  на число атомов  $N = \frac{m}{M} N_A$ . Учитывая что  $k \cdot N_A = R$ , получим значение внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT. \quad (2.21)$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его температуре.

Если воспользоваться уравнением Клапейрона — Менделеева, то выражение для внутренней энергии идеального газа можно представить в виде:

$$U = \frac{3}{2} pV.$$

Следует отметить, что, согласно выражению для средней кинетической энергии одного атома  $\left( \bar{E} = \frac{3}{2} kT \right)$  и в силу хаотичности движения, на каждое из трёх возможных направлений движения, или каждую степень свободы, по оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  приходится одинаковая энергия  $\frac{kT}{2}$ .

**Число степеней свободы** — это число возможных независимых направлений движения молекулы.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Какова внутренняя энергия 20 моль одноатомного газа при температуре 27 °С?  
1) 74,79 кДж  
2) 83,42 кДж  
3) 76 кДж  
4) 85,61 кДж
- В баллоне находится аргон массой 2 кг при температуре 20 °С. Найти внутреннюю энергию.  
1) 165 кДж  
2) 183 кДж  
3) 174 кДж  
4) 156 кДж
- Какое количество теплоты выделится при сгорании 4 кг бензина?  
1) 176 МДж  
2) 184 МДж  
3) 11 МДж  
4) 90 кДж
- Какое количество теплоты необходимо для нагревания на 10 °С стального тела массой 4 кг?  
1) 18,4 кДж  
2) 16,2 кДж  
3) 22,4 кДж  
4) 43,4 кДж
- Какое количество теплоты необходимо, чтобы превратить 5 кг льда температурой –40 °С в пар при 100 °С?  
1) 13,77 МДж  
2) 15,49 МДж  
3) 17,1 МДж  
4) 23,2 МДж
- Какую работу совершает газ при изобарном нагревании на 10 К, если количество вещества газа равно 10 моль?  
1) 432 Дж  
2) 831 Дж  
3) 653 Дж  
4) 521 Дж

Газ, каждая молекула которого состоит из двух атомов, называется двухатомным. Каждый атом может двигаться по трём направлениям, поэтому общее число возможных направлений движения — 6. За счёт связи между молекулами число степеней свободы уменьшается на одну, поэтому число степеней свободы для двухатомной молекулы равно пяти.

Средняя кинетическая энергия двухатомной молекулы равна  $\frac{5}{2}kT$ . Соответственно, внутренняя энергия идеального двухатомного газа равна:

$$U = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{5}{2} pV.$$

Формулы для внутренней энергии идеального газа можно обобщить:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV,$$

где  $i$  — число степеней свободы молекул газа ( $i = 3$  для одноатомного и  $i = 5$  для двухатомного газа).

Для идеальных газов внутренняя энергия зависит только от одного макроскопического параметра — температуры и не зависит от объёма, т. к. потенциальная энергия равна нулю (объём определяет среднее расстояние между молекулами).

Для реальных газов потенциальная энергия не равна нулю. Поэтому внутренняя энергия в термодинамике в общем случае однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние этих тел: объёмом ( $V$ ) и температурой ( $T$ ).

## Теплообмен

**Теплообмен** — это самопроизвольный (т. е. совершаемый без принуждения) процесс теплопередачи, происходящий между телами с разной температурой.

Различают три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

**Теплопроводность** — это вид теплопередачи, при котором происходит непосредственная передача энергии от частиц (молекул, атомов) более нагретой части тела к частицам его менее нагретой части.

Рассмотрим ряд опытов с нагревом твёрдого тела, жидкости и газа.

Закрепим в штативе толстую медную проволоку, а к ней прикрепим воском или пластилином несколько гвоздиков. При нагревании свободного конца проволоки в пламени спиртовки воск плавится, и гвоздики постепенно отпадают от проволоки. Причём сначала отпадают те, что находятся ближе к пламени, затем по очереди все остальные.

Следует помнить, что при теплопроводности само вещество не перемещается вдоль тела, переносится лишь энергия.

Рассмотрим теперь теплопроводность жидкостей. Возьмём пробирку с водой. Положим в неё кусочек льда и станем нагревать верхнюю часть пробирки. Вода у поверхности скоро закипит. Лёд же на дне пробирки за это время почти не растает. Значит, у жидкостей теплопроводность невелика, за исключением ртути и жидких металлов. Это объясняется тем, что в жидкостях молекулы расположены на больших расстояниях друг от друга, чем в твёрдых телах.

Исследуем теплопроводность газов. Сухую пробирку наденем на палец и нагреем в пламени спиртовки донышко. Палец при этом долго не чувствует тепла. Это связано с тем, что расстояние между молекулами газа ещё больше, чем у жидкостей. Следовательно, теплопроводность газов ещё меньше.

Итак, теплопроводность различных веществ различна.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы, особенно серебро и медь. Если теплопроводность различных веществ сравнивать с теплопроводностью меди, то окажется, что у железа она меньше примерно в 5 раз, у воды — в 658 раз, у пористого кирпича — в 848 раз, у свежевыпавшего снега — почти в 4000 раз, у ваты, древесных опилок и овечьей шерсти — почти в 10 000 раз, а у воздуха она меньше примерно в 20 000 раз. Плохой теплопроводностью обладают также волосы, перья, бумага, пробка и другие пористые тела. Это связано с тем, что между волокнами этих веществ содержится воздух. Самой низкой теплопроводностью обладает *вакуум*, так как в пространстве, где нет частиц, теплопроводность осуществляться не может.

Если возникает необходимость предохранить тело от охлаждения или нагревания, то применяют вещества с малой теплопроводностью. Так, ручки для кастрюль, сковородок изготавливают из пластмассы. Дома строят из брёвен или кирпича, обладающих плохой теплопроводностью, а значит, предохраняют помещения от охлаждения. На применении вакуума в качестве теплоизоляционного «материала» основано устройство термоса, изобретённого в 1892 г. английским учёным Джеймсом Дьюаром.

**Конвекция** (от лат. *convectio* — доставка) — это перенос теплоты в результате перемещения газа или жидкости.

Существуют различные виды конвекции. Мы рассмотрим свободную и вынужденную конвекции.

**Свободная конвекция** в газе или жидкости возникает тогда, когда имеются небольшие области, в которых плотность отличается от плотности основной окружающей их массы вещества. Тогда в условиях земного тяготения под действием силы Архимеда эти области начинают перемещаться. Примером свободной конвекции является всем известное движение воздуха в помещении, в котором топится печь, имеется радиатор или другой источник тепла.

Это явление можно объяснить таким образом. Часть воздуха, которая соприкасается с источником тепла, нагревается, расширяется и становится менее плотной, чем окружающий её более холодный воздух. Под действием архимедовой (выталкивающей) силы эта более тёплая часть воздуха начинает подниматься вверх. Её место занимает холодный воздух. Через некоторое время, прогревшись, этот слой воздуха также поднимается вверх, уступая место следующей порции воздуха, и т. д. Это и есть конвекция. В результате перемещения более тёплых слоёв воздуха происходит перенос тепла (т. е. энергии), или **конвективный теплообмен**.

Точно так же переносится энергия и при нагревании жидкости.

**Вынужденная конвекция** вызывается внешним механическим воздействием на среду. Примерами её являются обычное перемешивание жидкости ложечкой, движение воздуха в комнате под действием вентилятора, течение жидкости в трубе под действием гидронасоса и т. д. Физические процессы, происходящие при вынужденной конвекции, связанной с движением тел с большими скоростями в атмосфере, моделируются в аэродинамических трубах, где воспроизводится обтекание неподвижных моделей потоком воздуха.

Таким образом, конвективный теплообмен может осуществляться в газообразной и жидкой среде, при условии что имеется разность температур между частями этой среды. Для осуществления эффективного конвективного теплообмена в земных условиях жидкости и газы следует прогревать снизу. Если их прогревать сверху, конвекция не происходит, ведь тёплые слои и так находятся сверху, и опуститься ниже холодных, более тяжёлых, они не могут.

В отсутствие силы тяжести (в ракете, спутнике, межпланетном корабле) конвекция наблюдаться не будет.

Конвекция в твёрдых телах происходить не может, поскольку частицы в них колеблются около определённой точки, удерживаемые сильным взаимным притяжением. В связи

с этим при нагревании твёрдых тел потоки вещества в них образовываться не могут. Энергия в твёрдых телах передаётся теплопроводностью.

**Лучистый теплообмен** — это теплообмен, при котором энергия переносится различными лучами.

Например, сидя около костра, мы чувствуем, как тепло передаётся от огня нашему телу. Однако причиной такой теплопередачи не может быть ни теплопроводность (которая у воздуха, находящегося между пламенем и телом, очень мала), ни конвекция (так как конвекционные потоки всегда направлены вверх). Здесь имеет место третий вид теплообмена — лучистый теплообмен.

Лучистый теплообмен может происходить в полном вакууме. Этим он отличается от других видов теплообмена. Излучают энергию все тела, но чем выше температура тела, тем сильнее его тепловое излучение. Излучённая энергия, достигнув других тел, частично поглощается ими, а частично отражается. При поглощении энергия теплового излучения превращается во внутреннюю энергию тел, и они нагреваются.

Тела с тёмной поверхностью лучше поглощают энергию (и, следовательно, сильнее нагреваются), чем тела со светлой или зеркальной поверхностью.

Способность по-разному поглощать энергию излучения находит широкое применение в технике. Например, воздушные шары и крылья самолётов часто красят серебристой краской, чтобы они меньше нагревались солнечными лучами. Если же нужно использовать солнечную энергию (например, для нагревания некоторых приборов, установленных на искусственных спутниках), то эти устройства окрашивают в тёмный цвет.

## Количество теплоты. Удельная теплоёмкость вещества

**Количеством теплоты** называют количественную меру изменения внутренней энергии тела при теплообмене (или теплопередаче).

Количество теплоты — это энергия, которую тело отдаёт при теплообмене (без совершения работы). Количество теплоты, как и энергия, измеряется в джоулях (Дж).

**Теплоёмкость** — это количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 градус. Теплоёмкость тела обозначается  $C$ .

От чего зависит теплоёмкость тела? Прежде всего, от его массы. Ясно, что для нагрева, например, 1 килограмма воды потребуется больше тепла, чем для нагрева 200 граммов.

Так она зависит от рода вещества.

Таким образом, для нагревания одной и той же массы разных веществ до одинаковой температуры требуется разное количество теплоты. Количество теплоты, необходимое для нагревания тела и, следовательно, его теплоёмкость зависят от рода вещества, из которого состоит это тело.

Например, чтобы увеличить на  $1^\circ\text{C}$  температуру воды массой 1 кг, требуется количество теплоты, равное 4200 Дж, а для нагревания на  $1^\circ\text{C}$  такой же массы подсолнечного масла необходимо количество теплоты, равное 1700 Дж.

Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты требуется для нагревания 1 кг вещества на  $1^\circ\text{C}$ , называется **удельной теплоёмкостью** этого вещества.

У каждого вещества своя удельная теплоёмкость, которая обозначается  $c$  и измеряется в джоулях на килограмм–градус (Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ )).

Удельная теплоёмкость одного и того же вещества в разных агрегатных состояниях (твёрдом, жидком и газообразном) различна. Например, удельная теплоёмкость воды равна 4200 Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ), а удельная теплоёмкость льда 2100 Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ); алюминий в твёрдом состоянии имеет удельную теплоёмкость 920 Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ), а в жидком — 1080 Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ).

Из вышеизложенного ясно, что количество теплоты, необходимое для нагревания тела, зависит от рода вещества, из которого состоит тело (т.е. его удельной теплоёмкости), и от

массы тела. Ясно также, что количество теплоты зависит от того, на сколько градусов мы собираемся увеличить температуру тела.

Итак, чтобы определить количество теплоты, необходимое для нагревания тела или выделяемое им при охлаждении, нужно удельную теплоёмкость тела умножить на его массу и на разность между его конечной и начальной температурами:

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

где  $Q$  — количество теплоты,  $c$  — удельная теплоёмкость,  $m$  — масса тела,  $t_1$  — начальная температура,  $t_2$  — конечная температура.

При нагревании тела  $t_2 > t_1$  и, следовательно,  $Q > 0$ . При охлаждении тела  $t_2 < t_1$  и, следовательно,  $Q < 0$ .

В случае если известна теплоёмкость всего тела  $C$ ,  $Q$  определяется по формуле:

$$Q = C(t_2 - t_1).$$

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Заполните схему.



Ответы на тестовые задания (неделя 17)

1 — 1. 2 — 2. 3 — 2. 4 — 1. 5 — 2. 6 — 2.

# НЕДЕЛЯ 18

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 2.2. Термодинамика
- 2.2.7. Первый закон термодинамики
- 2.2.8. Второй закон термодинамики
- 2.2.9. КПД тепловой машины
- 2.2.10. Принципы действия тепловых машин

## Работа в термодинамике

В термодинамике рассматривается не движение тела как целого, а лишь относительное изменение частей термодинамической системы, в результате которого меняется её объём.

**Работа в термодинамике равна изменению внутренней энергии тела.** Вычислим работу, совершаемую газом при его действии на поршень с силой  $\vec{F}'$ , равной по величине и противоположной по направлению силе  $\vec{F}$ , действующей на газ со стороны поршня (рис. 74):  $\vec{F}' = -\vec{F}$  (согласно третьему закону Ньютона),  $F' = pS$ , где  $p$  — давление газа, а  $S$  — площадь поверхности поршня. Если перемещение поршня  $\Delta h$  в результате расширения мало, то давление газа можно считать постоянным и работа газа равна:

$$A' = F' \Delta h = pS \Delta h = p \Delta V. \quad (2.22)$$

Если газ расширяется, он совершает положительную работу, так как перемещение поршня совпадает по направлению с силой  $\vec{F}'$ . Если газ сжимается, то работа газа отрицательна, поскольку перемещение поршня противоположно силе  $\vec{F}'$ . В формуле (2.22) появится знак «минус»:  $\Delta V < 0$ , поскольку  $\Delta h < 0$  (см. рис 75). Работа внешних сил  $A$ , наоборот, положительна при сжатии газа и отрицательна при расширении:  $A = -A' = -p \Delta V$ .

Совершая над газом положительную работу, внешние тела передают ему часть своей энергии. При расширении газа внешние тела отбирают у газа часть его энергии — работа внешних сил отрицательна.

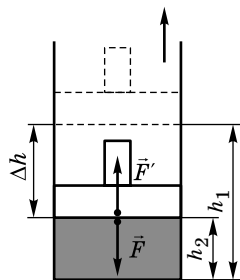


Рис. 74

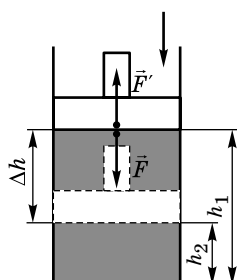


Рис. 75

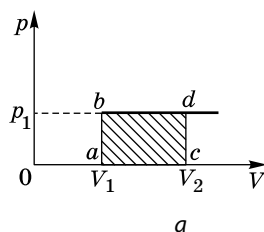
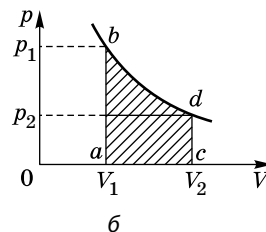


Рис. 76



На графике зависимости давления от объёма  $p(V)$  работа определяется как площадь, ограниченная кривой  $p(V)$ , осью  $V$  и отрезками  $ab$  и  $cd$ , равными давлениям  $p_1$  в начальном ( $V_1$ ) и  $p_2$  в конечном ( $V_2$ ) состояниях, как для изобарного, так и для изотермического процессов (рис. 76 а, б).

## Первый закон термодинамики

**Первое начало (первый закон) термодинамики** — это закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы. Согласно ему, работа может совершаться только за счёт теплоты или какой-либо другой формы энергии. Следовательно, работу и количество теплоты измеряют в одних единицах — джоулях (как и энергию).

Первый закон термодинамики был сформулирован немецким учёным Ю. Л. Майером в 1842 г. и подтверждён экспериментально английским учёным Дж. Джоулем в 1843 г.

**Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:**

$$\Delta U = A + Q, \quad (2.23)$$

где  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии,  $A$  — работа внешних сил,  $Q$  — количество теплоты, переданное системе.

Из (2.23) следует закон сохранения внутренней энергии. Если систему изолировать от внешних воздействий, то  $A = 0$  и  $Q = 0$ , а следовательно, и  $\Delta U = 0$ .

**При любых процессах, происходящих в изолированной системе, её внутренняя энергия остаётся постоянной.**

Если работу совершает система, а не внешние силы, то уравнение (2.23) записывается в виде:

$$Q = \Delta U + A', \quad (2.24)$$

где  $A'$  — работа, совершаемая системой ( $A' = -A$ ).

Количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Первое начало термодинамики может быть сформулировано как невозможность существования вечного двигателя первого рода, который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника (т. е. только за счёт внутренней энергии).

Действительно, если к телу не поступает теплота ( $Q = 0$ ), то работа  $A'$ , согласно уравнению (2.24), совершается только за счёт убыли внутренней энергии  $A' = -\Delta U$ . После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

Следует помнить, что как работа, так и количество теплоты — характеристики процесса изменения внутренней энергии, поэтому нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Система в любом состоянии обладает лишь определённой внутренней энергией.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- На сколько изменится внутренняя энергия газа, который совершил работу 50 кДж, передав количество теплоты 85 кДж?
  - 35 кДж
  - 135 кДж
  - 50 кДж
  - 25 кДж
- Какое количество теплоты необходимо передать газу, чтобы его внутренняя энергия увеличилась на 20 Дж и при этом газ совершил работу 40 Дж?
  - 60 Дж
  - 20 Дж
  - 80 Дж
  - 40 Дж
- Газу передано при изохорическом процессе 20 МДж теплоты. Чему равно изменение его внутренней энергии?
  - 40 Дж
  - 20 МДж
  - 40 МДж
  - 60 МДж
- Идеальный тепловой двигатель получает от нагревателя 7,2 МДж в секунду, а отдаёт в холодильник 6,4 МДж. КПД такого двигателя составляет
  - 15%
  - 25%
  - 11%
  - 8%
- Во время сгорания топлива в тепловом двигателе выделилось количество теплоты 100 кДж, а холодильнику передано количество теплоты 80 кДж. Найти КПД теплового двигателя.
  - 20%
  - 25%
  - 50%
  - 75%
- У идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя равна 400 К, а температура холодильника — 300 К. КПД машины равен
  - 20%
  - 25%
  - 40%
  - 30%

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
**18**  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36



Рассмотрим применение первого закона термодинамики к различным термодинамическим процессам.

**Изохорный (изохорический) процесс** — термодинамический процесс, происходящий в системе при постоянном объёме. Его можно осуществить в газах и жидкостях, заключённых в сосуд с постоянным объёмом.

При изохорном процессе объём газа не меняется ( $\Delta V = 0$ ), и, согласно первому началу термодинамики (см. уравнение (2.24)),

$$\Delta U = Q,$$

т. е. изменение внутренней энергии равно количеству переданного тепла, т. к. работа ( $A = p\Delta V = 0$ ) газом не совершается (рис. 77).

Если газ нагревается, то  $Q > 0$  и  $\Delta U > 0$ , его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа  $Q < 0$  и  $\Delta U < 0$  внутренняя энергия уменьшается.

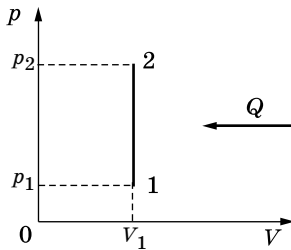


Рис. 77

**Изотермический процесс** — это термодинамический процесс, происходящий в системе при постоянной температуре.

Поскольку при изотермическом процессе внутренняя энергия газа не меняется (см. формулу (2.21)), ( $T = \text{const}$ ), то всё переданное газу количество теплоты идёт на совершение работы:  $Q = A'$ .

При получении газом теплоты ( $Q > 0$ ) он совершает положительную работу ( $A' > 0$ ). Если газ отдаёт тепло окружающей среде  $Q < 0$  и  $A' < 0$ . В этом случае над газом совершается работа внешними силами. Геометрически работа при изотермическом процессе определяется площадью под кривой  $p(V)$  (см. рис. 76, б).

**Изобарный (изобарический) процесс** — термодинамический процесс, происходящий в системе с постоянным давлением  $p$ . Примером изобарного процесса является расширение газа в цилиндре со свободно ходящим нагруженным поршнем.

При изобарном процессе, согласно формуле (2.24), передаваемое газу количество теплоты идёт на изменение его внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение им работы  $A'$  при постоянном давлении:  $Q = \Delta U + A'$ .

Работа идеального газа определяется по графику зависимости  $p(V)$  для изобарного процесса (рис. 76, а) ( $A' = p\Delta V$ ). Для идеального газа объём пропорционален температуре, в реальных газах часть теплоты расходуется на изменение средней энергии взаимодействия частиц.

**Адиабатический процесс (адиабатный процесс)** — это термодинамический процесс, происходящий в системе без теплообмена с окружающей средой ( $Q = 0$ ).

Адиабатическая изоляция системы приближенно достигается в сосудах Дьюара, в так называемых адиабатных оболочках. На адиабатически изолированную систему не оказывает влияния изменение температуры окружающих тел. Её внутренняя энергия  $U$  может меняться только за счёт работы, совершаемой внешними телами над системой, или самой системой.

Согласно первому началу термодинамики ( $\Delta U = A + Q$ ), в адиабатной системе

$$\Delta U = A,$$

где  $A$  — работа внешних сил.

При адиабатном расширении газа  $A < 0$ . Следовательно,

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T < 0,$$

что означает уменьшение температуры при адиабатном расширении. Оно приводит к тому, что давление газа уменьшается более резко, чем при изотермическом процессе.

На рис. 78 адиабата 1–2, проходящая между двумя изотермами, наглядно иллюстрирует сказанное. Площадь под адиабатой численно равна работе, совершаемой газом при его адиабатическом расширении от объёма  $V_1$  до  $V_2$ .

Адиабатное сжатие приводит к повышению температуры газа, т. к. в результате упругих соударений молекул газа с поршнем их средняя кинетическая энергия возрастает, в отличие от расширения, когда она уменьшается (в первом случае скорости молекул газа увеличиваются, во втором — уменьшаются).

Резкое нагревание воздуха при адиабатном сжатии используется в двигателях дизеля.

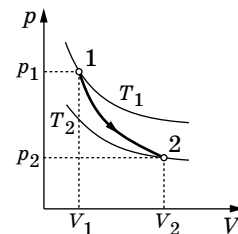


Рис. 78

## Уравнение теплового баланса

В замкнутой (изолированной от внешних тел) термодинамической системе изменение внутренней энергии какого-либо тела системы  $\Delta U_i$  не может приводить к изменению внутренней энергии всей системы. Следовательно,

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \Delta U_n = \sum_i^n \Delta U_i = 0. \quad (2.25)$$

Если внутри системы не совершается работа никакими телами, то согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии любого тела происходит только за счёт обмена теплом с другими телами этой системы:  $\Delta U_i = Q_i$ . Учитывая (2.25), получим:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \sum_i^n Q_i = 0.$$

Это уравнение называется уравнением теплового баланса. Здесь  $Q_i$  — количество теплоты, полученное или отданное  $i$ -ым телом. Любое из количеств теплоты  $Q_i$  может означать теплоту, выделяемую или поглощаемую при плавлении какого-либо тела, сгорании топлива, испарении или конденсации пара, если такие процессы происходят с различными телами системы, и будет определяться соответствующими соотношениями.

**Уравнение теплового баланса является математическим выражением закона сохранения энергии при теплообмене.**

## Второй закон термодинамики

**Необратимым** называется физический процесс, который может самопроизвольно протекать только в одном определённом направлении. В обратном направлении такие процессы могут протекать только как одно из звеньев более сложного процесса.

Необратимыми являются практически все процессы, происходящие в природе. Это связано с тем, что в любом реальном процессе часть энергии рассеивается за счёт излучения, трения и т. д. Например, тепло всегда переходит от более горячего тела к более холодному — это наиболее типичный пример необратимого процесса (хотя обратный переход не противоречит закону сохранения энергии).

Направленность процессов в природе указывает второй закон термодинамики.

**Второй закон термодинамики** — один из основных законов термодинамики, устанавливающий необратимость реальных термодинамических процессов.

Он был сформулирован Н. Л. С. Карно в 1824 г., затем У. Томсоном (Кельвином) в 1841 г. и Р. Клаузиусом в 1850 г. Формулировки закона различны, но эквивалентны.

Немецкий учёный Р. Клаузиус формулировал закон так: **Невозможно перевести теплоту от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.** Это означает, что теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более горячему (принцип Клаузиуса).

## Принцип действия и КПД тепловых двигателей

**Тепловой двигатель** — это устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Согласно второму началу термодинамики тепловой двигатель может непрерывно совершать периодически повторяющуюся механическую работу за счёт охлаждения окружающих тел, если он не только получает теплоту от более горячего тела (нагревателя), но при этом отдаёт теплоту менее нагретому телу (холодильнику). Следовательно, на совершение работы идёт не всё количество теплоты, полученное от нагревателя, а только часть её.

Таким образом, основными элементами любого теплового двигателя являются:

- 1) рабочее тело (газ или пар), совершающее работу;
- 2) нагреватель, сообщаящий энергию рабочему телу;
- 3) холодильник, поглощающий часть энергии от рабочего тела.

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$A' = |Q_1| - |Q_2|$ , где  $Q_1$  — количество теплоты, полученное от нагревателя,  $Q_2$  — количество теплоты, отданное холодильнику.

**Коэффициентом полезного действия (КПД)** теплового двигателя называется отношение работы  $A'$ , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}.$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику, то  $\eta < 1$ . КПД теплового двигателя пропорционален разности температур нагревателя и холодильника. При  $T_1 - T_2 = 0$  двигатель не может работать.

**Цикл Карно** — это круговой обратимый процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических процессов.

Целью исследований Карно было выяснение причин несовершенства тепловых машин того времени (они имели  $\text{КПД} \leq 5\%$ ) и поиски путей их усовершенствования.

Выбор двух изотермических и двух адиабатических процессов был обусловлен тем, что работа газа при изотермическом расширении совершается за счёт внутренней энергии нагревателя, а при адиабатном процессе — за счёт внутренней энергии расширяющегося газа. В этом цикле исключён контакт тел с разной температурой, следовательно, исключена теплопередача без совершения работы.

Цикл Карно — самый эффективный из всех возможных. Его КПД максимален.

На рис. 79 изображены термодинамические процессы цикла. В процессе изотермического расширения (1–2) при температуре  $T_1$  работа совершается за счёт изменения внутренней энергии нагревателя, т. е. за счёт подведения к газу количества теплоты  $Q_1$ :

$$A_{1-2} = Q_1.$$

Охлаждение газа перед сжатием (3–4) происходит при адиабатном расширении (2–3). Изменение внутренней энергии  $\Delta U_{23}$  при адиабатном процессе ( $Q = 0$ ) полностью преобразуется в механическую работу:

$$A_{2-3} = -\Delta U_{2-3}.$$

Температура газа в результате адиабатического расширения (2–3) понижается до температуры холодильника  $T_2 < T_1$ . В процессе (3–4) газ изотермически сжимается, передавая холодильнику количество теплоты  $Q_2$ :

$$A_{3-4} = Q_2,$$

Цикл завершается процессом адиабатического сжатия (4–1), при котором газ нагревается до температуры  $T_1$ .

Максимальное значение КПД тепловых двигателей, работающих на идеальном газе, по циклу Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.26)$$

Суть формулы (2.26) выражена в доказанной С. Карно теореме о том, что **КПД любого теплового двигателя не может превышать КПД цикла Карно, осуществляемого при той же температуре нагревателя и холодильника.**

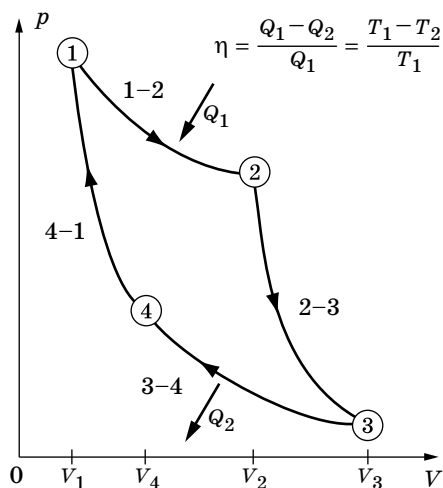


Рис. 79

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните таблицу.

Изопроцесс	Постоянная величина	График	Работа А
Изотермический	$= \text{const}$		
Изобарный	$= \text{const}$		
Изохорический	$= \text{const}$		
Адиабатический	$= 0$		

Ответы на тестовые задания (неделя 18)

1 — 1. 2 — 1. 3 — 2. 4 — 3. 5 — 2. 6 — 2.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАЗДЕЛУ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА»

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Ответами к заданиям 139 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Под количеством вещества понимают: **массу вещества, количество частиц его составляющих (молекул, атомов), количество молей, количество всех атомов**. Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

2. Во сколько раз масса и объём изделия из свинца больше массы и объёма аналогичного изделия из олова, при условии, что в них содержится равное количество вещества? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите **в таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ	ЗНАЧЕНИЕ
А) отношение масс изделий свинец/олово	1) 1,5
	2) 1,1
Б) отношение объёмов изделий свинец/олово	3) 3
	4) 1,7
	5) 1,9

Ответ: 

А	Б

3. В сосуд с чистой водой осторожно налили каплю чёрной туши. Через некоторое время содержимое сосуда приобрело равномерный серый цвет. Это произошло благодаря: **притяжению частиц туши к Земле, диффузии, перемещению более тёплых слоёв жидкости вверх**. Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

4. Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость — уменьшится в 3 раза: **увеличится, уменьшится, не изменится?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

5. Чему равна температура по шкале Кельвина, если по шкале Цельсия она равна  $300^{\circ}\text{C}$ ? Ответ округлите до целых.

Ответ: \_\_\_\_\_ К.

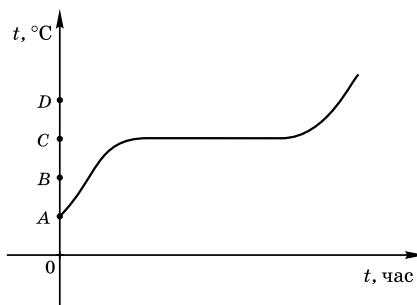
6. Какова средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при  $300^{\circ}\text{C}$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

7. Как изменится: **увеличится, уменьшится, не изменится** температура идеального газа заданной массы, если его объём уменьшить вдвое, а давление увеличить вдвое? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

8. На рисунке изображена зависимость температуры от времени некоторого вещества, в начальный момент времени находящегося в твёрдом состоянии. Количество подводимого тепла в единицу времени постоянно. Выберите два верных утверждения, основанных на анализе зависимости, показанной на рисунке.



- 1) В интервале температур  $AB$  вещество находится в жидком состоянии.
- 2) При температуре  $D$  вещество находится в газообразном состоянии.
- 3) Представленный на рисунке график описывает процесс плавления — фазовый переход первого рода.
- 4) Точка  $C$  соответствует температуре плавления.
- 5) Представленный на рисунке график описывает фазовый переход второго рода.

Ответ: ☐ ☐

9. Установите соответствие между некоторыми свойствами вещества и его агрегатным состоянием. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

**СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА**

**АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ**

- А) расстояние между молекулами намного больше размеров самих молекул
- Б) вещество принимает форму сосуда, в который его помещают

- 1) жидкость
- 2) газ
- 3) твёрдое тело
- 4) плазма
- 5) аморфное тело

Ответ: 

А	Б

Ответами к заданиям 10—12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

10. Вычислите среднеквадратичную скорость движения молекул неона при температуре 150 К.

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

11. В сосуде содержится  $10^{25}$  молекул воды. Какова масса воды?

Ответ: \_\_\_\_\_ кг.

12. Определите давление двух молей идеального газа, занимающего объём 2 л при температуре 10 К.

Ответ: \_\_\_\_\_ кПа.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ТЕРМОДИНАМИКА»

Ответами к заданиям 1—8 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. В каких из перечисленных ниже случаев система находится в состоянии термодинамического равновесия?
- 1) в закрытое теплоизолированное помещение только что внесли с улицы (на улице мороз) несколько баллонов со сжатым до нескольких атмосфер воздухом
  - 2) тот же случай, что и в п. 1, длительное время спустя
  - 3) в помещении топится печь, но при этом открыто окно
  - 4) в сосуд с водой опустили включенный кипятильник
  - 5) в системе отсутствуют потоки энергии, импульса, массы и т. д.

Ответ:

2. Как изменится внутренняя энергия идеального одноатомного газа, если его молярную массу увеличить в 2 раза, а температуру уменьшить в 2 раза: **возрастёт в 2 раза, уменьшится в 4 раза, не изменится?** Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

3. Для увеличения температуры тела на  $10^{\circ}\text{C}$  ему передали энергию 420 Дж. Чему равна теплоёмкость тела?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж/К.

4. При кристаллизации 100 г жидкости было выделено 0,17 Дж. Определить удельную теплоту плавления этого вещества.

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж/кг.

5. Газ некоторой массы перевели из состояния с давлением  $p = 5$  атм и объёмом  $V = 2$  л в состояние с  $p = 20$  атм и  $V = 1$  л. Как изменилась его внутренняя энергия: **удвоилась, уменьшилась в 1,5 раза, увеличилась в 1,2 раза?** Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

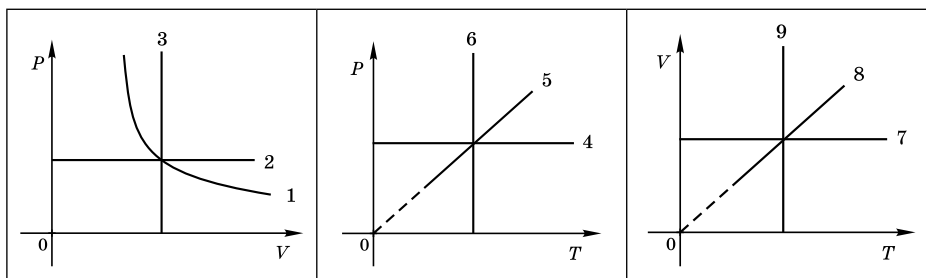
6. Какую работу совершает идеальный газ при изобарном расширении, если количество подведённого к нему тепла равно 2 кДж, а его внутренняя энергия изменилась на 1 кДж?

Ответ: \_\_\_\_\_ кДж.

7. В результате изотермического процесса газом совершена работа 5 Дж. Каково количество тепла, подведённое к газу?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

8. На рисунках представлены графики (кривые 1–9) изопроцессов в координатах  $p(V)$ ,  $p(T)$ ,  $V(T)$ . Проанализируйте рисунки и выберите два верных утверждения о процессах, представленных графиками 1–9.

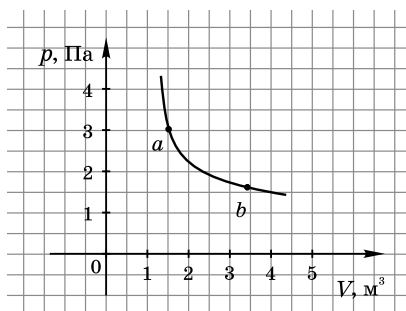


- 1) Графики 3, 5, 7 описывают изохорический процесс.
- 2) Изохорический процесс представлен графиками 2, 5, 7.
- 3) Изобару представляют кривые 8, 1, 9.
- 4) Изотермический процесс представлен графиками 4, 1, 9.
- 5) Изобары описаны графиками 2, 4, 5; изотермы — 1, 3, 7; изохоры — 6, 9, 2.
- 6) Изобары описаны графиками 2, 4, 8; изотермы — 1, 6, 9.

Ответ:

Ответами к заданиям 9—10 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

9. Определите по графику примерное значение работы, совершённой газом при изотермическом расширении на участке между точками  $a$  и  $b$ .



Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

10. В термостат с 2 л воды при температуре  $90^\circ\text{C}$  опустили кусок льда в медном ведре. Масса льда 0,2 кг, температура  $-10^\circ\text{C}$ , масса ведёрка 100 г, его температуру считать комнатной  $+20^\circ\text{C}$ . Какой будет температура содержимого термостата после установления термодинамического равновесия? Ответ дайте в  $^\circ\text{C}$ .

Ответ: \_\_\_\_\_  $^\circ\text{C}$ .



- 3.1. Электрическое поле
  - 3.1.1. Электризация тел
  - 3.1.2. Взаимодействие зарядов. Два вида заряда
  - 3.1.3. Закон сохранения электрического заряда
  - 3.1.4. Закон Кулона
  - 3.1.5. Действие электрического поля на электрические заряды
- 

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

**Электродинамика** — это область физики, в которой изучаются свойства и закономерности поведения электромагнитного поля и движение электрических зарядов, взаимодействующих друг с другом посредством этого поля.

Структура Вселенной формируется гравитационным притяжением тел, однако наличие лишь сил притяжения привело бы к неограниченному их гравитационному сжатию. Чтобы существовали тела неизменных размеров, должны действовать также и силы отталкивания между телами. Такими силами являются силы электромагнитного взаимодействия. Эти силы могут вызывать как притяжение, так и отталкивание заряженных частиц. Силы электромагнитного взаимодействия частиц тела на много порядков превосходят гравитационные силы, поэтому структура тел определяется электромагнитным взаимодействием.

Среди четырёх типов взаимодействий — гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых — электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию применения.

Электродинамика возникла в результате многочисленных исследований, начиная с обнаружения способности янтаря, потёртого о шерсть, притягивать к себе лёгкие предметы и кончая гипотезой великого английского учёного Дж.К. Максвелла о порождении магнитного поля переменным электрическим полем.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

### Электризация тел. Взаимодействие зарядов. Два вида электрических зарядов

Ещё в глубокой древности было известно, что если потереть янтарь о шерсть, он начинает притягивать к себе лёгкие предметы. Позднее это же свойство было обнаружено у других веществ (стекло, эбонит и др.). Это явление называется **электризацией**; тела же, способные притягивать к себе после натирания другие предметы, — **наэлектризованными**. Явление электризации объяснялось на основании гипотезы о существовании зарядов, которые приобретает наэлектризованное тело.

Простые опыты по электризации различных тел иллюстрируют следующие положения.

1. Существуют заряды двух видов: положительные (+) и отрицательные (-). Положительный заряд возникает при трении стекла о кожу или шёлк, а отрицательный — при трении янтаря (или эбонита) о шерсть.

2. Заряды (или заряженные тела) взаимодействуют друг с другом. Одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые заряды притягиваются.

3. Состояние электризации можно передать от одного тела к другому, что связано с переносом электрического заряда. При этом телу можно передать больший или меньший заряд, т. е. заряд имеет величину. При электризации трением заряд приобретают оба тела, причём одно — положительный, а другое — отрицательный. Следует подчеркнуть, что абсолютные величины зарядов наэлектризованных трением тел равны, что подтверждается многочисленными измерениями зарядов с помощью электрометров.

Объяснить, почему тела электризуются (т.е. заряжаются) при трении, стало возможным после открытия электрона и изучения строения атома. Как известно, все вещества состоят из атомов; атомы, в свою очередь, состоят из элементарных частиц — отрицательно заряженных **электронов**, положительно заряженных **протонов** и нейтральных частиц — **нейтронов**. Электроны и протоны являются носителями элементарных (минимальных) электрических зарядов.

**Элементарный электрический заряд ( $e$ )** — это наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный величине заряда электрона:

$$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Заряженных элементарных частиц существует много, и почти все они обладают зарядом  $+e$  или  $-e$ , однако эти частицы недолговечны. Они живут меньше миллионной доли секунды. Только электроны и протоны существуют в свободном состоянии неограниченно долго.

Протоны и нейтроны (нуклоны) составляют положительно заряженное ядро атома, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны, число которых равно числу протонов, так что атом в целом электрически нейтрален.

В обычных условиях тела, состоящие из атомов (или молекул), электрически нейтральны. Однако в процессе трения часть электронов, покинувших свои атомы, может перейти с одного тела на другое. Перемещения электронов при этом не превышают размеров межатомных расстояний. Но если тела после трения разъединить, то они окажутся заряженными: тело, которое отдало часть своих электронов, будет заряжено положительно, а тело, которое их приобрело, — отрицательно.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Если два заряда притягиваются друг к другу, это значит, что:
  - оба заряда имеют знак «плюс»
  - оба заряда имеют знак «минус»
  - один заряд имеет знак «минус», второй — знак «плюс»
  - оба заряда имеют одинаковые знаки, но разную величину заряда
- В результате трения с поверхности стеклянной палочки было удалено  $8,4 \cdot 10^{10}$  электронов. Определить электрический заряд на палочке.
  - $-13,44 \cdot 10^{-9}$  Кл
  - $13,44 \cdot 10^{-9}$  Кл
  - $1 \cdot 10^{-6}$  Кл
  - $2 \cdot 10^{-6}$  Кл
- В результате трения янтаря о шерсть последняя оказалась заряженной до некоторого значения  $+q$ . Чему равен заряд янтаря?
  - $+q$
  - $-q$
  - $+2q$
  - $0q$
- На каком расстоянии нужно расположить два заряда  $5 \cdot 10^{-9}$  и  $6 \cdot 10^{-9}$  Кл, чтобы они отталкивались с силой  $12 \cdot 10^{-4}$  Н?
  - 4,7 см
  - 5,8 см
  - 1,5 см
  - 7,6 см
- Как изменится сила взаимодействия между двумя точечными зарядами, если абсолютную величину каждого заряда увеличить вдвое, знак одного из них поменять на противоположный, а расстояние между ними уменьшить в 2 раза?
  - останется неизменной
  - увеличится в 2 раза по модулю и поменяет своё направление на противоположное
  - увеличится по модулю в 8 раз
  - увеличится в 16 раз по модулю и поменяет своё направление на противоположное
- Два заряда  $3,3 \cdot 10^{-8}$  Кл и  $6,6 \cdot 10^{-8}$  Кл взаимодействуют с силой  $5 \cdot 10^{-2}$  Н. Найти расстояние между зарядами.
  - 8,1 мм
  - 19,8 мм
  - 21,7 мм
  - 3,4 мм

Итак, тела электризуются, т. е. получают электрический заряд, когда они теряют или приобретают электроны. В некоторых случаях электризация обусловлена перемещением ионов. Новые электрические заряды при этом не возникают. Происходит лишь разделение имеющихся зарядов между электризующимися телами: часть отрицательных зарядов переходит с одного тела на другое.

Следует особо подчеркнуть, что заряд является неотъемлемым свойством частицы. Частицу без заряда представить себе можно, но заряд без частицы — нельзя.

Проявляют себя заряженные частицы в притяжении (разноименные заряды) либо в отталкивании (одноименные заряды) с силами, на много порядков превышающими гравитационные. Так, сила электрического притяжения электрона к ядру в атоме водорода в  $10^{39}$  раз больше силы гравитационного притяжения этих частиц. Взаимодействие между заряженными частицами называется электромагнитным взаимодействием, а электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий.

В современной физике так определяют заряд:

**Электрический заряд** — это физическая величина, являющаяся источником электрического поля, посредством которого осуществляется взаимодействие частиц, обладающих зарядом.

## Закон сохранения электрического заряда

**Закон сохранения электрического заряда гласит, что алгебраическая сумма электрических зарядов всех частиц изолированной системы не меняется при происходящих в ней процессах.**

Электрический заряд любой частицы или системы частиц является целым, кратным элементарному электрическому заряду (равному по величине заряду электрона) или нулевым.

Одним из подтверждений закона сохранения электрического заряда служит строгое равенство (по абсолютной величине) электрических зарядов электрона и протона. Изучение движения атомов (молекул) и микроскопических тел в электрических полях подтверждает электронейтральность вещества и, соответственно, равенство зарядов электрона и протона (и электронейтральность нейтрона) с точностью до  $10^{-21}$ .

Закон сохранения заряда подтверждается и простыми опытами по электризации тел. Укрепим на стержне электромера металлический диск и, положив на него прослойку из сукна, поставим сверху ещё один такой же диск, но с ручкой из диэлектрика. Совершив несколько движений верхним диском по изоляционной прослойке, уберём его в сторону. Мы увидим, что стрелка электромера отклонится, свидетельствуя о появлении на сукне и соприкасающемся с ним диске электрического заряда. Далее прикоснёмся вторым диском (которым мы терли о сукно) к стержню второго электромера. Стрелка этого электромера отклонится примерно на такой же угол, что и стрелка первого электромера. Это означает, что при электризации оба диска получили одинаковый по модулю заряд. Что можно сказать о знаках этих зарядов? Для ответа на этот вопрос завершим опыт, соединив электромеры металлическим стержнем. Мы увидим, как стрелки приборов опустятся вниз. Нейтрализация зарядов свидетельствует о том, что они были равны по модулю, но противоположны по знаку (и, следовательно, в сумме давали нуль).

Опыты показывают, что в процессе электризации общий (суммарный) заряд тел сохраняется: если он был равен нулю до электризации, то таким он останется и после неё.

Полный электрический заряд сохраняется и в том случае, если первоначальные заряды тел были отличны от нуля. Если обозначить первоначальные заряды тел как  $q_1$  и  $q_2$ , а заряд тех же тел после их взаимодействия как  $q'_1$  и  $q'_2$ , то можно записать:

$$q'_1 + q'_2 = q_1 + q_2.$$

**При любых взаимодействиях тел их полный электрический заряд остаётся неизменным.**

В этом заключается фундаментальный закон природы — закон сохранения электрического заряда.

Закон сохранения заряда был установлен в 1750 г. американским учёным и видным политическим деятелем Бенджамин Фрэнклином. Он же ввёл понятие о положительных и отрицательных зарядах, обозначив их знаками «+» и «-».

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Он очевиден, когда число элементарных частиц не меняется. Однако элементарные частицы могут возникать (рождаться) и исчезать, т. е. претерпевать различные превращения. Возникают и исчезают элементарные частицы всегда парами (с противоположными зарядами). Многочисленные наблюдения превращений элементарных частиц подтверждают закон сохранения заряда. Этот закон выражает одно из фундаментальных свойств электрического заряда.

Таким образом, электрический заряд во Вселенной сохраняется, а полный электрический заряд Вселенной, скорее всего, равен нулю.

## Закон Кулона

**Закон Кулона** — это один из основных законов электростатики. Он определяет величину и направление силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами.

Под **точечным зарядом** понимают заряженное тело, размер которого много меньше расстояния его возможного воздействия на другие тела. В таком случае ни форма, ни размеры заряженных тел не влияют практически на взаимодействие между ними.

Закон Кулона экспериментально впервые был доказан приблизительно в 1773 г. Кавендишем, который использовал для этого сферический конденсатор. Он показал, что внутри заряженной сферы электрическое поле отсутствует. Это означало, что сила электростатического взаимодействия меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, однако результаты Кавендиша не были опубликованы.

В 1785 г. закон был установлен Ш. О. Кулоном с помощью специальных крутильных весов.

Опыты Кулона позволили установить закон, поразительно напоминающий закон всемирного тяготения.

**Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

В аналитическом виде закон Кулона имеет вид:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

где  $|q_1|$  и  $|q_2|$  — модули зарядов;  $r$  — расстояние между ними;  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. Сила взаимодействия направлена по прямой, соединяющей заряды, причём одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Сила взаимодействия между зарядами зависит также от среды между заряженными телами.

В воздухе сила взаимодействия почти не отличается от таковой в вакууме. Закон Кулона выражает взаимодействие зарядов в вакууме.

**Кулон** — единица электрического заряда. Кулон (Кл) — единица СИ количества электричества (электрического заряда). Она является производной единицей и определяется через единицу силы тока — 1 ампер (А), которая входит в число основных единиц СИ.

За единицу электрического заряда принимают заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за 1 с.

То есть  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ .

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Сообщить такой заряд небольшому телу невозможно (отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться в теле). А вот в проводнике (который в целом электронейтрален) привести в движение такой заряд просто (ток в 1 А — вполне обычный ток, протекающий по проводам в наших квартирах).

Коэффициент  $k$  в законе Кулона при его записи в СИ выражается в  $\text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$ . Его численное значение, определённое экспериментально по силе взаимодействия двух известных зарядов, находящихся на заданном расстоянии, составляет:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

Часто его записывают в виде  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , где  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$  — электрическая постоянная. В среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  закон Кулона имеет вид:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}.$$

## Действие электрического поля на электрические заряды

**Электрическое поле** — это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц.

Введение понятия электрического поля понадобилось для объяснения взаимодействия электрических зарядов, т. е. для получения ответа на вопросы: *почему* возникают силы, действующие на заряды, и *как* они передаются от одного заряда к другому?

Понятия электрического и магнитного полей ввёл великий английский физик Майкл Фарадей. Согласно идее Фарадея, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создаёт в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд — и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.

С введением понятия поля в физике утвердилась теория близкогодействия, главным отличием которой от теории дальнегодействия является идея о существовании определённого процесса в пространстве между взаимодействующими телами, который длится конечное время.

Идея эта получила подтверждение в работах великого английского физика Дж.К. Максвелла, который теоретически доказал, что электромагнитные взаимодействия должны распространяться в пространстве с конечной скоростью —  $c$ , равной скорости света в вакууме (300 000 км/с). Экспериментальным доказательством этого утверждения явилось изобретение радио.

Электрическое поле возникает в пространстве, окружающем неподвижный заряд, точно так же, как вокруг движущихся зарядов — токов либо постоянных магнитов — возникает магнитное поле. Магнитные и электрические поля могут превращаться друг в друга, образуя единое электромагнитное поле. Электрическое поле (как и магнитное) является лишь частным случаем общего электромагнитного поля. Переменные электрические и магнитные поля могут существовать и без зарядов и токов, их породивших. Электромагнитное поле переносит определённую энергию, а также импульс и массу. Таким образом, электромагнитное поле — физическая сущность, обладающая определёнными физическими свойствами.

Итак, природа электрического поля состоит в следующем.

1. Электрическое поле материально, оно существует независимо от нашего сознания.
2. Главным свойством электрического поля является действие его на электрические заряды с некоторой силой. По этому действию устанавливается факт его существования. Действие поля на единичный заряд — *напряжённость поля* — является одной из его основных характеристик, по которой изучается распределение поля в пространстве.

Электрическое поле неподвижных зарядов называют *электростатическим*. Со временем оно не меняется, неразрывно связано с зарядами, его породившими, и существует в пространстве, их окружающем.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Запишите закон Кулона.

в аналитическом виде  $F =$  \_\_\_\_\_

в среде с диэлектрической проницаемостью  $F =$  \_\_\_\_\_

♦ Закончите предложение.

Особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц, называется \_\_\_\_\_.

Ответы на тестовые задания (неделя 19) \_\_\_\_\_

1 — 3. 2 — 2. 3 — 2. 4 — 3. 5 — 4. 6 — 2.

- 3.1. Электрическое поле
- 3.1.6. Напряжённость электрического поля
- 3.1.7. Принцип суперпозиции электрических полей
- 3.1.8. Потенциальность электростатического поля
- 3.1.9. Потенциал электрического поля. Разность потенциалов

## Напряжённость электрического поля

**Напряжённость электрического поля** — векторная характеристика поля, численно равная силе, действующей на единичный покоящийся в данной системе отсчёта электрический заряд.

Напряжённость определяется по формуле:

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

где  $\vec{E}$  — напряжённость поля;  $\vec{F}$  — сила, действующая на помещённый в данную точку поля заряд  $q$ . Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Единицей напряжённости в СИ является вольт на метр (В/м).

Согласно закону Кулона, точечный заряд  $q_0$  действует на другой заряд с силой, равной

$$F = k \frac{|q_0||q|}{r^2}.$$

Модуль напряжённости поля точечного заряда  $q_0$  на расстоянии  $r$  от него равен:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2}. \quad (3.1)$$

Вектор напряжённости в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 80).

## Принцип суперпозиции электрических полей

Принцип суперпозиции (наложения) полей формулируется так:

Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряжённости которых  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$  и т. д., то результирующая напряжённость поля в этой точке равна:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$

Принцип суперпозиции полей справедлив для случая, когда поля, созданные несколькими различными зарядами, не оказывают никакого влияния друг на друга, т. е. ведут себя так, как будто других полей нет. Опыт показывает, что для полей обычных интенсивностей, встречающихся в природе, это имеет место в действительности.

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряжённости поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно воспользоваться выражением напряжённости

поля точечного заряда (3.1). На рис. 81 показано, как в точке  $A$  определяется напряжённость поля  $\vec{E}$ , созданная двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ .

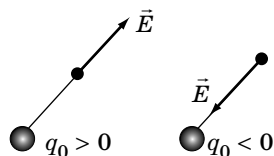


Рис. 80

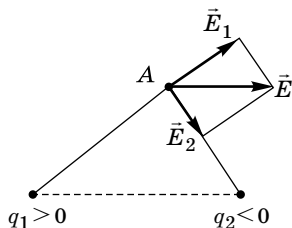


Рис. 81

Электрическое поле в пространстве принято представлять силовыми линиями. Понятие о силовых линиях ввёл М. Фарадей при исследовании магнетизма. Затем это понятие было развито Дж. Максвеллом в исследованиях по электромагнетизму.

**Силовая линия, или линия напряжённости электрического поля**, — это линия, касательная к которой в каждой её точке совпадает с направлением силы, действующей на положительный точечный заряд, находящийся в этой точке поля.

На рис. 82–85 изображены линии напряжённости положительно заряженного шарика (рис. 82); двух разноименно заряженных шариков (рис. 83); двух одноименно заряженных шариков (рис. 84) и двух пластин, заряженных разными по знаку, но одинаковыми по абсолютной величине зарядами (рис. 85).

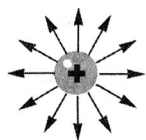


Рис. 82

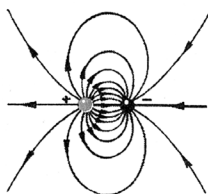


Рис. 83

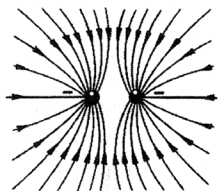


Рис. 84

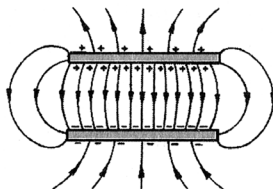
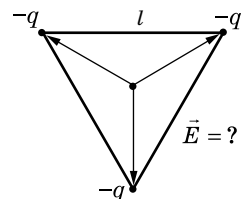


Рис. 85

Линии напряжённости на последнем рисунке почти параллельны в пространстве между пластинами, и плотность их одинакова. Это говорит о том, что поле в этой

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Величина напряжённости электрического поля в центре равностороннего треугольника (см. рисунок), в вершинах которого расположены три равных заряда  $-q$ , составляет



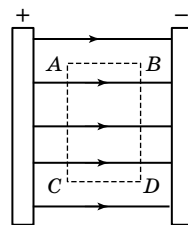
- 1)  $\frac{q}{l^2}$     2)  $\frac{kq}{l^2}$     3)  $\frac{2kq}{3l^2}$     4) 0

2. С каким ускорением движется протон в электрическом поле с напряжённостью 20 кВ/м?

- 1)  $1,9 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>
- 2)  $8,1 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>
- 3)  $3,4 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>
- 4)  $4,5 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>

3. Электрический заряд  $+q$  перемещён по замкнутому контуру  $ABCD$ . Какова работа по перемещению заряда по всему контуру?

- 1)  $A > 0$
- 2)  $A < 0$
- 3)  $A = 0$
- 4)  $A = 1$



4. Потенциалы электрических полей трёх точечных зарядов в некоторой точке  $A$  равны соответственно  $-5$  В,  $+3$  В и  $-1$  В. Суммарное значение потенциалов в этой точке составляет

- 1) 9 В    3)  $-3$  В
- 2)  $-7$  В    4)  $-5$  В

5. Какую работу нужно совершить, чтобы переместить заряд  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл между двумя точками электрического поля с разностью потенциалов 1500 В?

- 1)  $7,5 \cdot 10^{-5}$  Дж
- 2)  $8,4 \cdot 10^{-5}$  Дж
- 3)  $7,4 \cdot 10^{-4}$  Дж
- 4)  $8,2 \cdot 10^{-4}$  Дж



области пространства однородно. **Однородным** называется электрическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках пространства.

В электростатическом поле силовые линии не замкнуты, они всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. Они нигде не пересекаются, пересечение силовых линий говорило бы о неопределённости направления напряжённости поля в точке пересечения. Плотность силовых линий больше вблизи заряженных тел, где напряжённость поля больше.

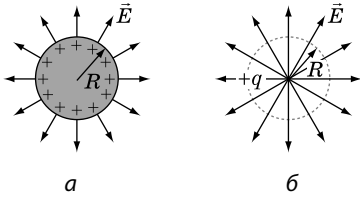


Рис. 86

Напряжённость поля заряженного проводящего шара на расстоянии от центра шара, превышающем его радиус  $r \geq R$ , определяется по той же формуле, что и поля точечного заряда (3.1). Об этом свидетельствует распределение силовых линий (рис. 86, а), аналогичное распределению линий напряжённости точечного заряда (рис. 86, б).

Заряд шара распределён равномерно по его поверхности. Внутри проводящего шара напряжённость поля равна нулю.

## Потенциальность электростатического поля

Каждая точка пространства, в которой действуют силы, характеризуется определённым значением потенциала. **Потенциал (потенциальная функция)** (от лат. *potentia* — сила) является энергетической характеристикой векторных полей, к числу которых относятся гравитационное, электромагнитное и электростатическое поля. Рассмотрим подробнее этот вопрос.

Пусть в однородном электрическом поле  $\vec{E}$  положительный заряд  $q$  перемещается на расстояние  $\Delta \vec{r}$  из точки 1 в точку 2 (рис. 87). Сила, действующая со стороны поля на электрический заряд, направлена всегда вдоль поля и определяется по формуле:

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

Работа  $A$ , совершаемая постоянной силой  $\vec{F}$  при прямолинейном перемещении, равна скалярному произведению  $\vec{F}$  на  $\Delta \vec{r}$ :

$$A = (\vec{F} \cdot \Delta \vec{r}) = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha = Fh, \quad (3.2)$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{F}$  и  $\Delta \vec{r}$ . Здесь через  $h$  обозначена проекция вектора перемещения  $\Delta \vec{r}$  на направление силы, параллельное  $\vec{E}$ .

Можно показать, что работа поля не зависит от формы траектории. Для этого достаточно разбить её на малые прямолинейные участки  $\Delta \vec{r}_i$  и применить к ним формулу (3.2), помня, что в каждой точке кривой сила параллельна полю. Работа силы равна сумме элементарных работ на всех участках:

$$A = \sum A_i = F \sum h_i = Fh.$$

Таким образом, *работа по перемещению заряда в однородном электростатическом поле зависит только от начального и конечного положений движущегося заряда и не зависит от формы траектории. При перемещении заряда по замкнутой траектории работа равна нулю.*

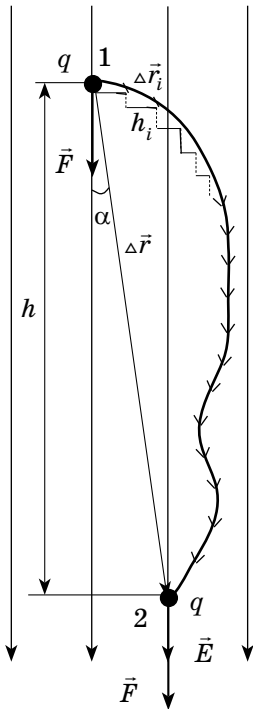


Рис. 87

Сила называется **потенциальной**, если работа этой силы зависит только от начального и конечного положений точки, на которую действует сила.

Стационарное поле, действующее на материальную точку с силой  $\vec{F}$ , называется **потенциальным полем**, если сила  $\vec{F}$  потенциальна.

Отсюда следует, что электростатическое поле, так же как и гравитационное, — потенциально.

## Потенциал электрического поля. Разность потенциалов

Потенциал электростатического поля в данной точке численно равен работе, которую совершают силы поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

То есть

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

где  $\varphi$  — потенциал,  $A$  — работа,  $q$  — положительный заряд.

Потенциал — величина скалярная. Потенциал считается положительным, если перемещение положительного единичного заряда из данной части поля в бесконечность совершается силами поля, и отрицательным, если силы поля препятствуют такому перемещению.

Поскольку работа в силовом поле равна разности потенциальных энергий двух точек поля, между которыми осуществляется перемещение, то

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

Работа равна разности энергий конечной и начальной точек, взятой с противоположным знаком:  $A = -(E_{n\infty} - E_{n_1})$ . Потенциальная энергия точки в бесконечности принята равной нулю:  $E_{n\infty} = 0$ ;  $E_{n_1} \equiv E_n$  — потенциальная энергия рассматриваемой точки поля. Выбор нулевого уровня потенциала произволен, так как физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов, или напряжение поля.

**Разность потенциалов (напряжение)** между двумя точками поля равна отношению работы поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3.3)$$

Поскольку работа по перемещению заряда в потенциальном поле не зависит от формы траектории, то, зная напряжение между двумя точками, мы определим работу, совершаемую полем по перемещению единичного заряда.

Если имеется несколько точечных зарядов, то потенциал поля в некоторой точке пространства определяется как алгебраическая сумма потенциалов электрических полей каждого заряда в этой точке:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (3.4)$$

**Эквипотенциальной поверхностью**, или **поверхностью равного потенциала**, называется поверхность, для любых точек которой разность потенциалов равна нулю. Это значит, что работа по перемещению заряда по такой поверхности равна нулю, следовательно, линии напряжённости электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости, а точечного заряда — концентрические сферы.

Вектор напряжённости  $\vec{E}$  (как и сила  $\vec{F}$ ) перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальной является поверхность любого проводника в электростатическом

поле, так как силовые линии перпендикулярны поверхности проводника. Внутри проводника разность потенциалов между любыми его точками равна нулю.

В однородном электрическом поле напряжённость  $E$  во всех точках одинакова, и работа  $A$  по перемещению заряда  $q$  параллельно  $\vec{E}$  на расстояние  $d$  между двумя точками с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  равна:

$$A = F \cdot d = qEd = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU \quad (3.5)$$

или

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3.6)$$

Таким образом, напряжённость поля пропорциональна разности потенциалов и направлена в сторону уменьшения потенциала. Поэтому положительный заряд будет двигаться в сторону уменьшения потенциала, а отрицательный — в сторону его увеличения.

Единицей напряжения (разности потенциалов) является *вольт*. Согласно формуле (3.3),  $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$ . Разность потенциалов между двумя точками равна одному вольту, если при перемещении заряда в 1 Кл между этими точками поле совершает работу в 1 Дж.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Запишите правила, по которым строятся линии электрического поля.

1. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

♦ Нарисуйте линии напряжённости электрического поля между двумя зарядами:



♦ Закончите предложения.

1. Поверхность, для любых точек которой разность потенциалов равна нулю, называется

---

2. Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряжённости которых  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_i$  и т. д., то результирующая напряжённость поля в этой точке равна:

---

3. Если имеется несколько точечных зарядов  $q_1, q_2, q_3$  и  $q_4$ , то потенциал поля в некоторой точке пространства равен:

---

4. Линия, касательная к которой в каждой её точке совпадает с направлением силы, действующей на положительный точечный заряд, находящийся в этой точке поля, называется

Ответы на тестовые задания (неделя 20)

---

1 — 4. 2 — 1. 3 — 3. 4 — 3. 5 — 1.

# НЕДЕЛЯ 21

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 3.1. Электрическое поле
- 3.1.10. Проводники в электрическом поле
- 3.1.11. Диэлектрики в электрическом поле
- 3.1.12. Электрическая ёмкость. Конденсатор
- 3.1.13. Энергия электрического поля конденсатора

## Проводники в электрическом поле

**Проводники** — тела, по которым электрические заряды перемещаются свободно. К ним в первую очередь относятся металлы. Положительные ионы участия в переносе заряда не принимают.

Кристаллическая решётка металла состоит из положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решётки, и электронов, свободно передвигающихся между узлами. Свободные электроны — это валентные электроны атомов металла, покинувшие свои атомы. Они совершают беспорядочное движение по кристаллу, «не помня», какому атому они принадлежали. Их называют электронным газом. Свободные электроны участвуют в тепловом движении и способны перемещаться под действием электрического поля.

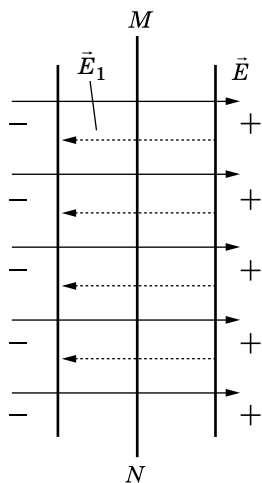


Рис. 88

Внутри проводника, помещённого во внешнее электрическое поле, электростатическое поле отсутствует. Объясняется это тем, что под действием внешнего поля свободные электроны, перемещаясь в направлении, противоположном внешнему полю  $\vec{E}$ , распределяются по поверхности проводника, в результате чего одна часть проводника заряжается отрицательно, противоположная — положительно. Разделённые заряды создают внутреннее поле  $\vec{E}_1$ , которое компенсирует внешнее поле  $\vec{E}$ , так что суммарное поле внутри проводника равно нулю (рис. 88). На этом основана электростатическая защита. Чтобы защитить приборы от влияния электрического поля, их помещают в металлический ящик.

Таким разделением заряда объясняется **электростатическая индукция**. Если пластину металла разрезать по линии  $MN$ , обе половины окажутся заряженными (рис. 88).

Линии напряжённости электрического поля вне проводника всегда перпендикулярны поверхности проводника. В противном случае составляющая поля, параллельная поверхности, приводила бы к постоянному перемещению зарядов (электрическому току).

Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. В противном случае внутри проводника имелось бы электрическое поле, что не соответствует действительности. Это относится как к заряженным, так и к незаряженным проводникам, помещённым в электрическое поле.

## Диэлектрики в электрическом поле

**Диэлектрики (или изоляторы)** — вещества, относительно плохо проводящие электрический ток.

Термин «диэлектрик» был введён М. Фарадеем для обозначения веществ, через которые передаются электромагнитные взаимодействия.

В диэлектриках все электроны связаны, т. е. принадлежат отдельным атомам, и электрическое поле не отрывает их, а лишь слегка смещает, т. е. поляризует. Поэтому внутри диэлектрика может существовать электрическое поле; диэлектрик оказывает на электрическое поле определённое влияние.

Диэлектрики делятся на полярные и неполярные.

**Полярные диэлектрики** состоят из молекул, в которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы можно представить в виде двух одинаковых по модулю разноименных точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называемых **диполем** (рис. 89).

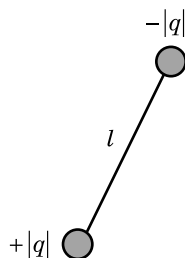


Рис. 89

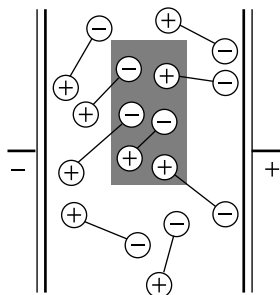


Рис. 90

**Неполярные диэлектрики** состоят из атомов и молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.

Помещение полярного диэлектрика в электростатическое поле приводит к развороту и смещению до этого хаотически ориентированных диполей вдоль поля (рис. 90). Разворот происходит под действием пары сил, приложенных со стороны поля к двум зарядам диполя (рис. 91). Смещение диполей называется **поляризацией**. Однако из-за теплового движения происходит лишь частичная поляризация. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды диполей компенсируют друг друга, а на поверхности диэлектрика появляется связанный заряд: отрицательный со стороны положительно заряженной пластины, и наоборот.

Неполярный диэлектрик в электрическом поле также поляризуется. Под действием электрического поля положительные и отрицательные заряды в молекуле смещаются в противоположные стороны, так что центры распределения зарядов смещаются, как у полярных молекул. Ось наведенного полем диполя ориентирована

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Металлическому шару радиусом 5 см сообщили заряд 50 нКл. Найти поверхностную плотность заряда.
  - 1,59 мкКл/м<sup>2</sup>
  - 2 мкКл/м<sup>2</sup>
  - 1,75 мкКл/м<sup>2</sup>
  - 2,3 мкКл/м<sup>2</sup>
- Сосуд, наполненный маслом, внесли в однородное поле, напряжённость которого 50 кВ/м. Какова напряжённость поля в масле?
  - 20 кВ/м
  - 10 кВ/м
  - 30 кВ/м
  - 60 кВ/м
- Какой заряд необходимо сообщить конденсатору ёмкостью 1 мкФ, чтобы разница потенциалов между его пластинами была равна 40 В?
  - 20 мкКл
  - 40 мкКл
  - 10 мкКл
  - 5 мкКл
- Электроёмкость плоского конденсатора в вакууме равна 0,3 мкФ. Чему будет равна электроёмкость того же конденсатора, если между его обкладками вставить диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 6$ ?
  - $1,8 \cdot 10^{-6}$  Ф
  - $3,2 \cdot 10^{-6}$  Ф
  - $2,2 \cdot 10^{-6}$  Ф
  - $3,6 \cdot 10^{-6}$  Ф
- Определить энергию электрического поля плоского конденсатора ёмкостью 20 мкФ, если напряжение, приложенное к конденсатору, 220 В.
  - 484 мДж
  - 242 мДж
  - 484 мДж
  - 242 мДж
- Заряд конденсатора  $4 \cdot 10^{-3}$  Кл, напряжение между его обкладками 500 В. Определить энергию электрического поля конденсатора.
  - 0,5 Дж
  - 2 Дж
  - 1 Дж
  - 1,5 Дж

вдоль поля. На поверхностях, примыкающих к заряженным пластинам, появляются связанные заряды.

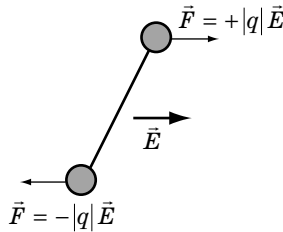


Рис. 91

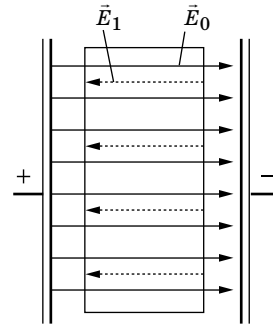


Рис. 92

Поляризованный диэлектрик сам создаёт электрическое поле ( $\vec{E}_1$ , рис. 92). Это поле ослабляет внутри диэлектрика внешнее электрическое поле  $\vec{E}_0$ . Степень этого ослабления зависит от свойств диэлектрика. Уменьшение напряжённости электростатического поля в веществе по сравнению с полем в вакууме характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью среды.

**Относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon$**  — это физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль напряжённости электростатического поля  $E$  внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряжённости поля  $E_0$  в вакууме:

$$\varepsilon = E_0/E.$$

В соответствии с этим сила взаимодействия зарядов в среде в  $\varepsilon$  раз меньше, чем в вакууме:

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

## Электрическая ёмкость конденсатора

**Электроёмкостью** проводника  $C$  называют численную величину заряда, которую нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

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

Ёмкость характеризует способность проводника накапливать заряд. Она зависит от формы проводника, его линейных размеров и свойств среды, окружающей проводник.

Единицей ёмкости в СИ является **фарада (Ф)** — ёмкость проводника, в котором изменение заряда на 1 кулон меняет его потенциал на 1 вольт.

**Электрический конденсатор** — устройство, предназначенное для получения электрической ёмкости заданной величины, способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды.

Конденсатор — это система из двух или нескольких равномерно заряженных проводников с равными по величине зарядами, разделённых слоем диэлектрика. Проводники называются обкладками конденсатора. Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, намного меньше размеров самих обкладок, так что поле в конденсаторе практически все сосредоточено между его обкладками. Если обкладки являются плоскими пластинами, поле между ними однородно. Электроёмкость плоского конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (3.7)$$

где  $q$  — заряд конденсатора,  $U$  — напряжение между его обкладками,  $S$  — площадь пластины,  $d$  — расстояние между пластинами,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды.

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из пластин.

Емкость батареи конденсаторов при параллельном соединении равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Очевидно, что емкость батареи из последовательно соединенных конденсаторов меньше емкости любого из конденсаторов, а при параллельном — больше.

## Энергия поля конденсатора

Энергия заряженного конденсатора выражается формулами

$$E_n = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2},$$

которые выводятся с учетом выражений для связи работы и напряжения (3.3) и для емкости плоского конденсатора (3.6).

Объемная плотность энергии электрического поля (энергия поля в единице объема) напряженностью  $E$  выражается формулой:

$$\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните таблицу.

Соединение двух конденсаторов	
Параллельное	Последовательное
	
$C =$	$C =$

Ответы на тестовые задания (неделя 21)

1 — 1. 2 — 1. 3 — 2. 4 — 1. 5 — 1. 6 — 3.



- 3.2. Законы постоянного тока
- 3.2.1. Постоянный электрический ток. Сила тока
- 3.2.2. Постоянный электрический ток. Напряжение
- 3.2.3. Закон Ома для участка цепи
- 3.2.4. Электрическое сопротивление. Удельное сопротивление вещества

## ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Электрическим током** называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц. Для того чтобы такое движение происходило, необходимо:

- 1) наличие в теле свободных заряженных частиц — носителей тока;
- 2) наличие силы, заставляющей носители заряда двигаться в заданном направлении (её может обеспечить электрическое поле внутри проводника, которое создаёт между концами проводника разность потенциалов).

Этим условиям соответствует металлический проводник, помещённый в электрическое поле. Для существования в проводнике постоянного тока его необходимо соединить с источником тока, поддерживающим разность потенциалов в проводнике. **Если разность потенциалов не меняется со временем, ток называется постоянным.**

Направление тока — направление движения положительно заряженных частиц.

Действия электрического тока:

- 1) тепловое — нагрев проводника; используется в электронагревательных приборах;
- 2) химическое — при пропускании тока через растворы кислот, щелочей и солей на электродах наблюдается выделение атомов (молекул), входящих в состав растворов;
- 3) магнитное — проводник с током становится подобен магниту.

## Сила тока

**Сила электрического тока** — это величина ( $I$ ), характеризующая упорядоченное движение электрических зарядов и численно равная количеству заряда  $\Delta q$ , протекающего через определённую поверхность  $S$  (поперечное сечение проводника) за единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Итак, чтобы найти силу тока  $I$ , надо электрический заряд  $\Delta q$ , прошедший через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$ , разделить на это время.

Сила тока зависит от заряда, переносимого каждой частицей, скорости их направленного движения и площади поперечного сечения проводника.

Рассмотрим проводник (рис. 93) с площадью поперечного сечения  $S$ . Заряд каждой частицы  $q_0$ . В объёме проводника, ограниченном сечениями 1 и 2, содержится  $nS\Delta l$  частиц, где  $n$  — концентрация частиц. Их общий заряд  $q = q_0 nS\Delta l$ . Если частицы

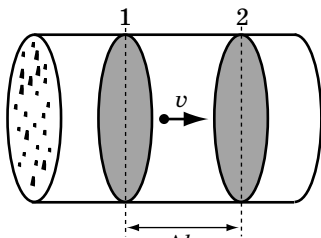


Рис. 93

движутся со средней скоростью  $v$ , то за время  $\Delta t = \Delta l/v$  все частицы, заключённые в рассматриваемом объёме, пройдут через поперечное сечение 2. Сила тока, следовательно, равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l \cdot v}{\Delta l} = q_0 n v S.$$

В СИ единица силы тока является основной и носит название **ампер** (А) в честь французского учёного А. М. Ампера (1775–1836).

Силу тока измеряют амперметром. Принцип устройства амперметра основан на магнитном действии тока.

## Закон Ома для участка цепи

**Сила тока на участке цепи равна отношению напряжения на этом участке к его сопротивлению.**

Закон Ома выражает связь между тремя величинами, характеризующими протекание электрического тока в цепи, — силой тока  $I$ , напряжением  $U$  и сопротивлением  $R$ .

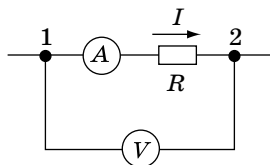


Рис. 94

Он был установлен в 1826 г. немецким учёным Г. Омом. В приведённой формулировке он называется также законом Ома для участка цепи (рис. 94). Математически закон Ома записывается в виде следующей формулы:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.8)$$

Зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника называется **вольт-амперной характеристикой (ВАХ)** проводника.

Для любого проводника существует своя ВАХ. Наиболее простой вид имеет ВАХ металлических проводников, заданная законом Ома (3.8), и растворов электролитов. Знание ВАХ играет большую роль при изучении тока.

Закон Ома — это основа всей электротехники. Из закона Ома (3.8) следует:

- 1) сила тока на участке цепи с постоянным сопротивлением пропорциональна напряжению на концах участка;
- 2) сила тока на участке цепи с неизменным напряжением обратно пропорциональна сопротивлению.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника в течение 15 с, если за этот промежуток времени ток равномерно возрастает от нуля до 10 А?  
1) 150 Кл                      3) 1,5 Кл  
2) 10 Кл                      4) 5 Кл
2. Как изменится сила электрического тока при увеличении концентрации носителей тока в проводнике в 2 раза, увеличении их скорости в 2 раза и одновременном увеличении площади поперечного сечения проводника в 1,5 раза?  
1) увеличится в 1,5 раза  
2) увеличится в 3 раза  
3) уменьшится в 2 раза  
4) увеличится в 6 раз
3. Какое напряжение необходимо подать на концы проводника сопротивлением 10 Ом, чтобы в нём возникла сила тока 2 А?  
1) 5 В                      3) 20 В  
2) 2 В                      4) 0,2 В
4. Найти силу тока в алюминиевом проводнике длиной 5 м и сечением 2 мм<sup>2</sup>, на который подано напряжение 24 мВ.  
1) 0,15 А                      3) 0,36 А  
2) 0,24 А                      4) 0,45 А
5. Сопротивление проводника длиной 2,5 м и сечением 0,5 мм<sup>2</sup> равно 5,47 Ом. Найти удельное сопротивление.  
1)  $109,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$   
2)  $78,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$   
3)  $104,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$   
4)  $97 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$
6. Закон Ома для участка цепи выражается формулой  
1)  $I = \frac{U}{R}$   
2)  $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$   
3)  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$   
4)  $I = q_0 n v S$

Эти зависимости легко проверить экспериментально. Полученные с использованием схемы, представленной на рис. 94, графики зависимости силы тока от напряжения при постоянном сопротивлении (см. формулу (3.8)) и силы тока от сопротивления представлены на рис. 95 и 96 соответственно. В первом случае использован источник тока с регулируемым выходным напряжением и постоянное сопротивление  $R$ , во втором — аккумулятор и переменное сопротивление.

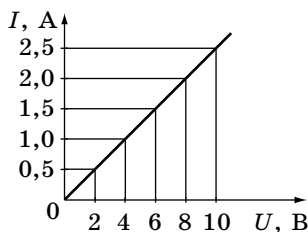


Рис. 95

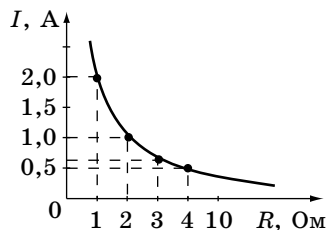


Рис. 96

## Электрическое сопротивление

**Электрическое сопротивление** — это физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току.

Электрическое сопротивление определяется как коэффициент пропорциональности  $R$  между напряжением  $U$  и силой постоянного тока  $I$  в законе Ома для участка цепи.

Единица сопротивления носит название **ом** (Ом) в честь немецкого учёного Г. Ома, который ввёл это понятие в физику. 1 Ом — это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В сила тока равна 1 А.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от материала проводника, его длины  $l$  и поперечного сечения  $S$  и может быть определено по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.9)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление вещества, из которого изготовлен проводник.

**Удельное сопротивление вещества** — это физическая величина, показывающая, каким сопротивлением обладает изготовленный из этого вещества проводник единичной длины и единичной площади поперечного сечения.

Из формулы (3.9) следует, что

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Величина, обратная  $\rho$ , называется **удельной проводимостью**  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Так как в СИ единицей сопротивления является 1 Ом, единицей площади — 1 м<sup>2</sup>, а единицей длины — 1 м, то единицей удельного сопротивления в СИ будет 1 Ом · м<sup>2</sup>/м, или 1 Ом · м. Единица удельной проводимости в СИ — Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>.

На практике площадь сечения тонких проводов часто выражают в квадратных миллиметрах (мм<sup>2</sup>). В этом случае более удобной единицей удельного сопротивления является Ом · мм<sup>2</sup>/м. Так как 1 мм<sup>2</sup> = 0,000001 м<sup>2</sup>, то 1 Ом · мм<sup>2</sup>/м = 10<sup>-6</sup> Ом · м. Металлы обладают очень малым удельным сопротивлением — порядка (1 · 10<sup>-2</sup>) Ом · мм<sup>2</sup>/м, диэлектрики — в 10<sup>15</sup>–10<sup>20</sup> раз бóльшим.

С повышением температуры сопротивление металлов возрастает. Однако существуют сплавы, сопротивление которых почти не меняется при повышении температуры (например, константан, манганин и др.). Сопротивление же электролитов с повышением температуры уменьшается.

**Температурным коэффициентом сопротивления** проводника называется отношение величины изменения сопротивления проводника при нагревании на  $1^\circ \text{C}$  к величине его сопротивления при  $0^\circ \text{C}$ :

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры выражается формулой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

В общем случае  $\alpha$  зависит от температуры, но если интервал температур невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным. Для чистых металлов  $\alpha = (1/273)\text{K}^{-1}$ . Для растворов электролитов  $\alpha < 0$ . Например, для 10%-ного раствора поваренной соли  $\alpha = -0,02 \text{ K}^{-1}$ . Для константана (сплава меди с никелем)  $\alpha = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Зависимость сопротивления проводника от температуры используется в термометрах сопротивления.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните схему.



♦ Запишите закон Ома для участка цепи.

Для силы тока:  $I =$  \_\_\_\_\_

Для сопротивления:  $R =$  \_\_\_\_\_

Для напряжения:  $U =$  \_\_\_\_\_

Ответы на тестовые задания (неделя 22) \_\_\_\_\_

1 — 1. 2 — 4. 3 — 3. 4 — 3. 5 — 1. 6 — 1.

# НЕДЕЛЯ 23

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 3.2. Законы постоянного тока
- 3.2.5. Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока
- 3.2.6. Закон Ома для полной электрической цепи
- 3.2.7. Параллельное и последовательное соединение проводников
- 3.2.8. Смешанное соединение проводников

## Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока

**Сторонними силами** называются любые силы, действующие на электрически заряженные частицы в цепи, за исключением электростатических (т.е. кулоновских).

При замыкании цепи создаётся электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием сторонних сил против кулоновских сил (электроны движутся от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во всей остальной цепи их приводит в движение электрическое поле.

В источниках тока в процессе работы по разделению заряженных частиц происходит превращение разных видов энергии в электрическую.

Таблица 2

Виды электродвижущей силы (ЭДС) по типу преобразования энергии

Вид ЭДС	Где происходит	Тип преобразования энергии
Электростатическая	Электрофорная машина	Механическая при трении в электрическую
Термоэлектрическая	Термоэлемент	Внутренняя при нагревании в электрическую
Фотоэлектрическая	Фотоэлемент	Энергия света в электрическую
Химическая	Гальванический элемент, аккумулятор	Химическая энергия в электрическую

Электродвижущая сила (ЭДС) — характеристика источников тока. Понятие ЭДС было введено Г. Омом в 1827 г. для цепей постоянного тока. В 1857 г. Кирхгоф определил ЭДС как работу сторонних сил при переносе единичного электрического заряда вдоль замкнутого контура:

$$\mathcal{E} = A_{\text{ст}}/q,$$

где  $\mathcal{E}$  — ЭДС источника тока,  $A_{\text{ст}}$  — работа сторонних сил,  $q$  — количество перемещённого заряда.

Электродвижущую силу выражают в вольтах.

Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил не во всем контуре, а только на данном участке.

Пусть имеется простая замкнутая цепь, состоящая из источника тока и резистора с сопротивлением  $R$ . Ток в замкнутой цепи не прерывается нигде, следовательно, он существует и внутри источника тока. Любой источник представляет собой некоторое

сопротивление для тока. Оно называется **внутренним сопротивлением источника тока** и обозначается буквой  $r$ .

В генераторе  $r$  — это сопротивление обмотки, в гальваническом элементе — сопротивление раствора электролита и электродов.

Таким образом, источник тока характеризуется величинами ЭДС и внутреннего сопротивления. Например, электростатические машины имеют очень большую ЭДС (до десятков тысяч вольт), но при этом их внутреннее сопротивление огромно (до сотни МОм). Поэтому они непригодны для получения сильных токов. У гальванических элементов ЭДС всего лишь приблизительно 1 В, но зато и внутреннее сопротивление мало (приблизительно 1 Ом и меньше). Это позволяет с их помощью получать токи, измеряемые амперами.

## Закон Ома для полной электрической цепи

Источник электрического тока, соединённый проводами с различными электроприборами и потребителями электрической энергии, образует электрическую цепь.

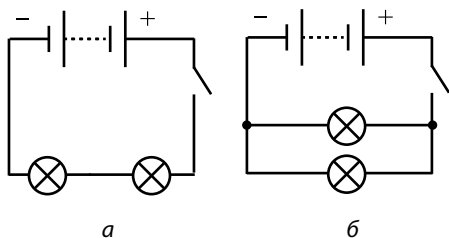


Рис. 97

Электрическую цепь принято изображать с помощью схем (рис. 97), в которых элементы (сопротивления, источники тока, выключатели, лампы, приборы и т. д.) обозначены специальными значками.

**Направление тока в цепи** — направление от положительного полюса источника тока к отрицательному.

Перемещение реальных зарядов может не совпадать с условным направлением тока. Так, в металлах носителями тока являются электроны, и движутся они от отрицательного полюса к положительному, т. е. в обратном направлении. В электролитах перемещение зарядов может совпадать или быть противоположным направлению тока, в зависимости от того, положительные или отрицательные ионы являются носителями заряда.

Включение элементов в электрическую цепь может быть последовательным или параллельным.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Какова ЭДС источника, если сторонние силы совершают 40 Дж работы при перемещении 10 Кл электричества внутри источника от одного полюса к другому?

1) 50 В                      3) 30 В  
2) 4 В                      4) 3 В

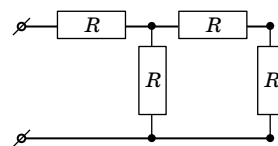
- Сторонние силы при перемещении электрического заряда в 5 Кл от одного полюса к другому внутри источника тока совершают работу, равную 10 Дж. ЭДС источника составляет

1) 50 В                      3) 2 В  
2) 0,5 В                    4) 5 В

- Каково внутреннее сопротивление элемента, если его ЭДС равна 2 В и при внешнем сопротивлении 7 Ом сила тока равна 0,2 А?

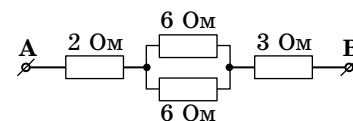
1) 2 Ом  
2) 3 Ом  
3) 1 Ом  
4) 9 Ом

- Определить сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, состоящего из одинаковых резисторов с сопротивлением  $R$ , выразив его в «единицах  $R$ ».



1) 1,7 R  
2) 2,3 R  
3) 4,2 R  
4) 5,4 R

- Определите сопротивление между точками А и В электрической цепи, изображённой на рисунке.



1) 5 Ом  
2) 8 Ом  
3) 11 Ом  
4) 17 Ом

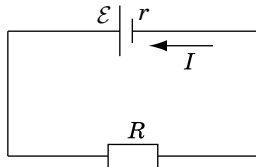


Рис. 98

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока и резистора  $R$  (рис. 98).

**Закон Ома для полной цепи** устанавливает связь между силой тока в цепи, ЭДС и полным сопротивлением цепи, состоящим из внешнего сопротивления  $R$  и внутреннего сопротивления источника тока  $r$ .

Работа сторонних сил  $A_{\text{ст}}$  источника тока, согласно определению ЭДС ( $\mathcal{E}$ ) равна  $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q$ , где  $q$  — заряд, перемещённый ЭДС. Согласно определению тока  $q = It$ , где  $t$  — время, в течение которого переносился заряд. Отсюда имеем:

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}It. \quad (3.10)$$

Тепло, выделяемое при совершении работы в цепи, согласно *закону Джоуля — Ленца*, равно:

$$Q = I^2 R t + I^2 r t. \quad (3.11)$$

Согласно закону сохранения энергии,  $A = Q$ . Приравнявая (3.10) и (3.11), получим:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (3.12)$$

Закон Ома для замкнутой цепи обычно записывается в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (3.13)$$

Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС цепи к её полному сопротивлению.

Если цепь содержит несколько последовательно соединённых источников с ЭДС  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  и т. д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников. Знак ЭДС источника определяется по отношению к направлению обхода контура, который выбирается произвольно, например, на рис. 99 — против часовой стрелки. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу. Для цепи справедливо следующее уравнение:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

В соответствии с (3.13) сила тока положительна при положительной ЭДС — направление тока во внешней цепи совпадает с направлением обхода контура. Полное сопротивление цепи с несколькими источниками равно сумме внешнего и внутренних сопротивлений всех источников ЭДС, например для рис. 99:

$$R_n = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Для **параллельного соединения** проводников (рис. 100) справедливы следующие соотношения:

а) электрический ток, поступающий в точку  $A$  разветвления проводников (она называется также *узлом*), равен сумме токов в каждом из элементов цепи:

$$I = I_1 + I_2;$$

б) напряжение  $U$  на концах проводников, соединённых параллельно, одно и то же:

$$U = U_1 = U_2;$$

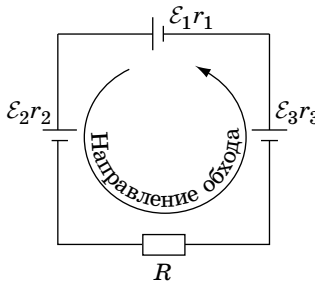


Рис. 99

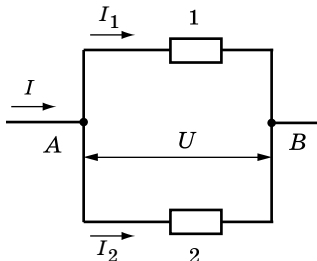


Рис. 100

в) при параллельном соединении проводников складываются их обратные сопротивления:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

г) сила тока и сопротивление в проводниках связаны соотношением:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Для последовательного соединения проводников в цепи (рис. 101) справедливы следующие соотношения:

а) для общего тока  $I$ :

$$I = I_1 = I_2,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — ток в проводниках 1 и 2 соответственно; т. е. при последовательном соединении проводников сила тока на отдельных участках цепи одинакова;

б) общее напряжение  $U$  на концах всего рассматриваемого участка равно сумме напряжений на отдельных его участках:

$$U = U_1 + U_2;$$

в) полное сопротивление  $R$  всего участка цепи равно сумме последовательно соединённых сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2;$$

г) также справедливо соотношение:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

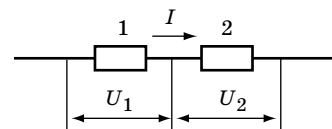


Рис. 101

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните таблицу.

	Соединение проводников	
	Последовательное	Параллельное
Схема соединения		
$U$		
$I$		
$R$		

Ответы на тестовые задания (неделя 23)

1 — 2. 2 — 3. 3 — 2. 4 — 1. 5 — 2.



- 3.2. Законы постоянного тока
  - 3.2.9. Работа электрического тока. Закон Джоуля — Ленца
  - 3.2.10. Мощность электрического тока
  - 3.2.11. Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях и газах
  - 3.2.12. Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковый диод
- 

### Работа электрического тока. Закон Джоуля — Ленца

Для определения работы, совершаемой током, проходящим по некоторому участку цепи, следует воспользоваться определением напряжения:  $U = \frac{A}{q}$ . Отсюда следует, что

$$A = qU,$$

где  $A$  — работа тока;  $q$  — электрический заряд, прошедший за данное время через рассматриваемый участок цепи. Подставляя в последнее равенство формулу  $q = It$ , получаем:

$$A = IUt. \quad (3.14)$$

**Работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения на концах этого участка на силу тока и на время, в течение которого совершалась работа.**

**Закон Джоуля — Ленца гласит: Количество теплоты, выделяемое в проводнике на участке электрической цепи с сопротивлением  $R$  при протекании по нему постоянного тока  $I$  в течение времени  $t$  равно произведению квадрата тока на сопротивление и время:**

$$Q = I^2 R t. \quad (3.15)$$

Закон был установлен в 1841 г. английским физиком Дж. П. Джоулем, а в 1842 г. подтвержден точными опытами русского учёного Э. Х. Ленца. Само же явление нагрева проводника при прохождении по нему тока было открыто ещё в 1800 г. французским учёным А. Фуркруа, которому удалось раскалить железную спираль, пропустив через неё электрический ток.

Из закона Джоуля — Ленца следует, что при последовательном соединении проводников, поскольку ток в цепи всюду одинаков, максимальное количество тепла будет выделяться на проводнике с наибольшим сопротивлением. Это используется в технике, например для распыления металлов.

При параллельном соединении все проводники находятся под одинаковым напряжением, но токи в них разные. Согласно закону Ома  $I = \frac{U}{R}$ , из формулы (3.15) следует

$$Q = \frac{U^2 t}{R}. \quad (3.16)$$

Следовательно, на проводнике с меньшим сопротивлением будет выделяться больше тепла. Если в формуле (3.14) выразить  $U$  через  $IR$ , воспользовавшись законом Ома, получим

Закон Джоуля — Ленца. Это лишний раз подтверждает тот факт, что работа тока расходуется на выделение тепла на активном сопротивлении в цепи.

## Мощность электрического тока

Действие тока характеризуют не только работой  $A$ , но и мощностью  $P$ . Мощность тока показывает, какую работу совершает ток за единицу времени. Если за время  $t$  была совершена работа  $A$ , то мощность тока

$P = \frac{A}{t}$ . Подставляя в это равенство выражение (3.14), получаем:  $P = IU$ .

Это выражение можно переписать в разных формах, воспользовавшись законом Ома для участка цепи:

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

В СИ работу выражают в джоулях (Дж), мощность — в ваттах (Вт), а время — в секундах (с). При этом

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}, 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем наибольшую допустимую мощность потребителей электроэнергии, которые могут одновременно работать в квартире. Так как в жилых зданиях сила тока в проводке не должна превышать  $I = 10 \text{ А}$ , то при напряжении  $U = 220 \text{ В}$  соответствующая электрическая мощность оказывается равной:

$$P = 10 \text{ А} \cdot 220 \text{ В} = 2200 \text{ Вт} = 2,2 \text{ кВт}.$$

Одновременное включение в сеть приборов с большей суммарной мощностью приведёт к увеличению силы тока, и потому недопустимо.

В быту работу тока (или израсходованную на совершение этой работы электроэнергию) измеряют с помощью специального прибора, называемого счётчиком электроэнергии. При прохождении тока через этот счётчик внутри его начинает вращаться лёгкий алюминиевый диск. По числу оборотов, сделанных им за данное время, можно судить о работе, совершённой током за это время. Работа тока при этом выражается обычно в **киловатт-часах** (кВт · ч).

1 кВт · ч — это работа, совершаемая электрическим током мощностью 1 кВт в течение 1 ч. Так как 1 кВт = 1000 Вт, а 1 ч = 3600 с, то

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж}.$$

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Найти работу тока в течение 2 мин, если сопротивление в цепи 4 Ом, а сила тока 2 А?  
1) 3,56 кДж  
2) 16 кДж  
3) 1,92 кДж  
4) 1,56 кДж
- Найти работу тока в течение 3 мин, если сопротивление цепи 0,1 кОм, а напряжение 100 В.  
1) 18 кДж  
2) 30 кДж  
3) 10 кДж  
4) 12 кДж
- Мощность электрической лампы 60 Вт. Какую работу совершает электрический ток, перемещаясь через лампу за 5 мин?  
1) 18 кДж  
2) 24 кДж  
3) 180 кДж  
4) 240 кДж
- Сила тока в электрической лампе, рассчитанной на напряжение 110 В, равна 0,5 А. Какова мощность тока в этой лампе?  
1) 35 Вт  
2) 45 Вт  
3) 65 Вт  
4) 55 Вт
- Какова сила тока в алюминиевом проводе сечением 2 мм<sup>2</sup>, если напряжённость электрического поля в нём равна 1 В/м?  
1) 52,6 А  
2) 75,5 А  
3) 68,5 А  
4) 81,2 А
- Сколько пар ионов возникает под действием ионизатора каждую секунду в 1 см<sup>3</sup> разрядной трубки, в которой течёт ток насыщения  $2 \cdot 10^{-7} \text{ мА}$ ? Объём трубки 600 см<sup>3</sup>.  
1)  $2 \cdot 10^6$   
2)  $3 \cdot 10^6$   
3)  $4 \cdot 10^6$   
4)  $5 \cdot 10^6$

## Свободные носители электрического заряда в металлах, жидкостях и газах

### Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах обусловлен упорядоченным движением свободных электронов (электронов проводимости).

Положительные ионы участия в переносе заряда не принимают.

Электронная природа носителей тока в металлах объясняется следующим образом. Кристаллическая решётка металла состоит из положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решётки, и электронов, свободно передвигающихся между узлами. Эти электроны — валентные электроны атомов металла, покинувшие свои атомы. Свободные электроны совершают беспорядочное движение по кристаллу, «не помня» уже, какому атому они принадлежали. Их называют также электронным газом. Конечно, при этом сумма всех положительных зарядов ионов решётки равна суммарному отрицательному заряду всех свободных электронов, так что металл остаётся незаряженным, или электро-нейтральным.

Не следует думать, что под действием электрического тока все электроны в проводнике устремляются в одном направлении. У них просто появляется преимущественное направление движения (вдоль поля), которое накладывается на хаотическое движение в отсутствие поля. При этом средняя скорость их движения составляет несколько миллиметров в секунду. А вот скорость распространения самого электрического поля — порядка  $3 \cdot 10^8$  м/с. С этой же скоростью распространяется электрический ток.

Объяснение многих свойств металлов, в частности их электрических свойств (закон Ома), даёт электронная теория металлов. Классическая электронная теория металлов основывается на представлении об электронах проводимости как об электронном газе, подобном идеальному атомарному газу молекулярной физики. В этой теории считается, что движение электронов подчиняется законам Ньютона, взаимодействием электронов между собой пренебрегают, а взаимодействие с положительными ионами решётки сводят только к соударениям.

Для объяснения закона Ома на основе классической электронной теории металлов необходимо найти выражение для средней скорости  $v$  направленного упорядоченного движения электронов в электрическом поле напряжённостью  $E$  и подставить в известную формулу для силы тока  $I$ :

$$I = q_0 n v S,$$

где  $q_0 = e$  — заряд электрона,  $n$  — концентрация электронов,  $S$  — площадь поперечного сечения проводника.

Электроны в металле, участвуя в тепловом движении, постоянно сталкиваются с ионами решётки. Так как масса электрона во много раз меньше массы иона, то после очередного столкновения все направления скорости равновероятны. Это означает, что начальная скорость после очередного столкновения может иметь любое направление, и значит, среднее значение вектора начальной скорости равно нулю, и начальная скорость не оказывает влияния на среднюю скорость направленного движения электронов. Это позволяет считать, что средняя скорость упорядоченного движения электронов  $v$  равна произведению ускорения на среднее время  $\tau$  движения электрона между двумя соударениями с ионами:  $v = a \cdot \tau$ . Используя второй закон Ньютона и выражение для напряжённости электрического поля, получим:

$$v = a\tau = \frac{F\tau}{m} = \frac{eE\tau}{m} = \frac{eU\tau}{mL},$$

где  $F$  — сила, действующая на электрон со стороны поля,  $U$  — напряжение на концах проводника длиной  $L$ .

Далее, подставляя полученное уравнение в выражение  $I = q_0 n v S$ , получим:

$$I = envS = \frac{e^2 n \tau S U}{m L}.$$

Как видно из полученного выражения, сила тока пропорциональна напряжению, как это и следует из закона Ома. Это является следствием того, что средняя скорость направленного движения электронов прямо пропорциональна напряжённости электрического поля в металле.

Однако классическая электронная теория не в состоянии объяснить многие экспериментальные зависимости, например, зависимость сопротивления от температуры. Связано это с тем, что движение электронов в металле подчиняется законам квантовой механики, а не классической механики Ньютона.

## Электрический ток в газах

Процесс протекания электрического тока через газ называется **газовым разрядом**.

При комнатных температурах газы практически не проводят электрический ток, так как состоят из нейтральных атомов, т. е. являются диэлектриками.

При нагреве или облучении ультрафиолетовым светом, рентгеновскими лучами либо другим видом излучения атомы газа получают дополнительную энергию, которая может привести к ионизации. Так, например, при нагреве за счёт увеличения скорости молекул часть из них при столкновениях друг с другом распадается на положительно заряженные ионы и электроны.

Проводимость газов обеспечивается как электронами, так и положительно заряженными ионами.

**Рекомбинация** — процесс воссоединения электрона с положительным ионом — наблюдается, если прекратить действие ионизатора. Если внешнее поле отсутствует, то при действии ионизатора устанавливается динамическое равновесие между количеством исчезающих и вновь образующихся пар заряженных частиц.

Несамостоятельный разряд в газе, ионизованном каким-либо ионизатором, возникает в постоянном поле и существует до тех пор, пока существует ионизирующий агент. ВАХ несамостоятельного разряда представляет собой кривую, выходящую на насыщение.

При некотором напряжении, зависящем от рода газа, давления и расстояния между электродами, происходит пробой и зажигается самостоятельный разряд, который не нуждается больше во внешнем ионизаторе. Ток через трубку при этом резко возрастает.

Причиной возникновения самостоятельного разряда является **ионизация электронным ударом**. При соударении атома с электроном, который разгоняется электрическим полем  $E$  до энергии, достаточной для ионизации атома, образуются два электрона, которые при своём движении к аноду также разгоняются и, сталкиваясь на своём пути с другими атомами, ионизуют их, в результате возникает электронная лавина.

Для обеспечения длительного самостоятельного разряда кроме **ионизации электронным ударом** необходима ещё **эмиссия** (испускание) электронов с катода. Такая эмиссия может быть обеспечена либо за счёт термоэлектронной эмиссии из катода (испускания электронов из металла при нагреве), либо за счёт выбивания электронов из катода положительными ионами с большой кинетической энергией.

## Электрический ток в электролитах

**Электролитами**, или **проводниками второго рода**, называются вещества, в которых прохождение электрического тока сопровождается электролизом.

**Электролиз** — это выделение на электродах составных частей растворённых веществ или продуктов вторичной реакции.

В электролитах, являющихся водными растворами (или расплавами) кислот, щелочей, солей, перенос заряда осуществляется ионами. Такая проводимость называется ионной.

Закон электролиза установлен опытным путём М. Фарадеем.

**Масса вещества, выделившегося на электроде за время  $\Delta t$  при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени:**

$$m = kI\Delta t.$$

Величину  $k$  называют **электрохимическим эквивалентом** данного вещества и выражают в кг/Кл. Электрохимический эквивалент численно равен массе вещества, выделившегося на электродах при переносе ионами заряда  $\Delta q = I \cdot \Delta t = 1$  Кл.

Можно показать, что

$$k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n},$$

где  $e$  — заряд электрона,  $N_A$  — число Авогадро,  $M$  — молярная (или атомная) масса вещества,  $n$  — валентность иона, т. е.  $k = \frac{m_{0i}}{q_{0i}}$  — электрохимический эквивалент равен отношению массы иона к его заряду.

Таким образом, измеряя величины  $m$  и  $\Delta q$ , можно определить электрохимические эквиваленты различных веществ.

Формулы могут быть использованы для определения заряда электрона:

$$e = \frac{M}{mnN_A} I\Delta t.$$

Все входящие в эту формулу величины либо известны ( $M$ ,  $n$ ,  $N_A$ ), либо измеряются ( $m$ ,  $I$ ,  $\Delta t$ ). Именно таким образом в 1874 г. было определено значение  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

## Полупроводники. Собственная проводимость полупроводников

К полупроводникам относят широкий класс веществ, которые отличаются от металлов тем, что:

- концентрация подвижных носителей заряда в них существенно ниже, чем концентрация атомов;
- эта концентрация (а с ней и электропроводность) может меняться под влиянием температуры, освещения, небольшого количества примесей;
- электрическое сопротивление уменьшается с ростом температуры (рис. 102).

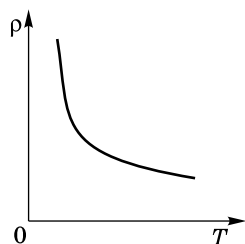


Рис. 102

Отличие полупроводников от диэлектриков условно. К диэлектрикам обычно относят вещества с удельным сопротивлением  $\rho \geq 10^{11} - 10^{12}$  Ом·см (при комнатной температуре); к полупроводникам, соответственно, с  $\rho \leq 10^{11}$  Ом·см.

Полупроводники по своему строению делятся на кристаллические, амфорные и стеклообразные, жидкие. По химическому составу полупроводники делятся на элементарные, т. е. состоящие из атомов одного сорта (Ge, Si, Se, Te), двойные, тройные, четверные соединения. Полупроводниковые соединения принято классифицировать по номерам групп периодической таблицы элементов, к которым принадлежат входящие в соединение элементы. Например, GaAs и InSb относятся к соединениям типа  $A^{III}B^V$  (существуют также и органические полупроводники).

Строение полупроводников рассмотрим на примере кремния (рис. 103, а).

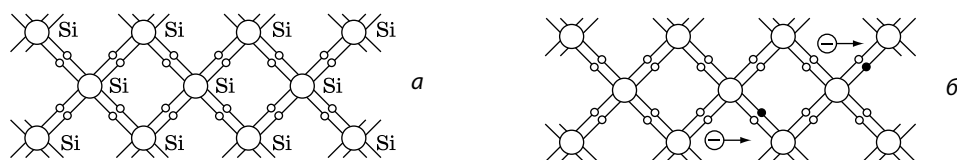


Рис. 103

В кристаллической решётке кремния (Si) каждый атом имеет четыре ближайших соседа. Кремний является четырёхвалентным элементом, и взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью ковалентной, или парноэлектронной, связи, когда в каждой связи участвует по одному электрону от каждого атома. Это так называемые коллективизированные электроны; большую часть времени они проводят в пространстве между соседними ионами кремния, удерживая их друг возле друга.

При низких температурах парноэлектронные связи достаточно прочны, они не разрываются, поэтому кремний не проводит электрический ток.

Увеличение температуры приводит к увеличению кинетической энергии валентных электронов и разрыву валентных связей. Часть электронов становятся свободными (подобно электронам в металле), кристаллы под действием электрического поля начинают проводить ток (рис. 103, б). Проводимость полупроводников, обусловленная свободными электронами, называется **электронной проводимостью**. При увеличении температуры от 300 до 700°K концентрация носителей заряда, например в Ge, увеличивается примерно в  $10^6$ , а в Si —  $10^9$  раз, что и приводит к падению сопротивления (рис. 102).

Разрыв валентных связей при увеличении температуры приводит к образованию вакантного места с недостающим электроном, которое имеет эффективный положительный заряд и называется **дыркой**. Становится возможным переход валентных электронов из соседних связей на освободившееся место. Такое движение отрицательного заряда (электрона) в одном направлении эквивалентно движению положительного заряда (дырки) в противоположном.

Перемещение дырок по кристаллу происходит хаотически, но если к нему приложить разность потенциалов, начнётся их направленное движение вдоль электрического поля. Проводимость кристалла, обусловленная дырками, называется **дырочной проводимостью**.

Электронная и дырочная проводимость чистых (беспримесных) полупроводников называется **собственной проводимостью полупроводников**.

Собственная проводимость полупроводников невелика. Так, в Ge число носителей заряда (электронов) составляет всего одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

Отличительной особенностью полупроводников, как упоминалось выше, является их способность существенно увеличивать проводимость при добавлении примесей в кристалл. Эта проводимость, в отличие от собственной, так и называется — **примесная проводимость**. Именно благодаря этому свойству полупроводники нашли столь широкое практическое применение.

Примесная проводимость полупроводника, в зависимости от вида примеси, может быть электронной (её создают *донорные* примеси) либо дырочной (её создают **акцепторные** примеси). Полупроводники с электронной проводимостью называются **полупроводниками *n*-типа** (*negative* — отрицательный). Полупроводники с дырочной примесной проводимостью называются **полупроводниками *p*-типа** (*positive* — положительный).

Донорными примесями являются такие, добавление которых приводит к существенному увеличению концентрации свободных электронов в кристалле. Для того чтобы примесь была донором электронов, необходимо, чтобы валентность элементов, её составляющих, была больше валентности атомов решётки. Для кремния такой донорной примесью являются атомы пятивалентного мышьяка (As). Четыре электрона As участвуют в образовании парноэлектронной связи, а пятый электрон оказывается очень слабо связанным с атомом As и легко становится свободным.

Акцепторные примеси приводят к увеличению концентрации дырок. В соответствии с вышесказанным валентность атомов акцепторной примеси ниже валентности атомов решётки кристалла. Для кремния такой примесью является трёхвалентный индий (In). Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями не хватает одного электрона. В результате образуется дырка. При наличии поля возникает дырочная проводимость.

В полупроводнике *n*-типа электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными. В полупроводнике *p*-типа дырки являются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

### ***p-n*-Переход**

***p-n*-Переход** — это простейшая полупроводниковая структура, которая используется в большинстве полупроводниковых приборов. Для получения *p-n*-перехода полупроводниковый образец легируют (вводят в него примеси) таким образом, чтобы в одной его части преобладали донорные примеси, а в другой — акцепторные, в результате получают контакт полупроводника *n*-типа с полупроводником *p*-типа (рис. 104). Основным свойством *p-n*-перехода является его способность пропускать ток только в одном направлении, если напряжение приложено к образцу так, что проводимость осуществляется основными носителями тока, как это показано на рис. 104: «—» со стороны полупроводника *n*-типа, «+» — со стороны *p*-типа (электроны из *n*-области переходят в *p*-область, и наоборот). Если теперь поменять полярность приложенного напряжения  $U$ , то ток через *p-n*-переход практически не идёт, т. к. переход через контакт осуществляется неосновными носителями, которых мало. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода изображена на рис. 105. Здесь правая часть графика — это прямой переход (осуществляемый основными носителями), левая, пунктирная часть — обратный переход (осуществляемый неосновными носителями). Свойства *p-n*-перехода используются для выпрямления переменного тока в устройствах, которые называются полупроводниковыми диодами.

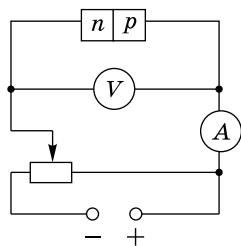


Рис. 104

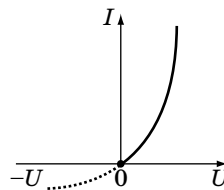


Рис. 105

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

- ♦ Заполните пропуски в выражении для мощности тока.

$$P = \underline{\hspace{1cm}} U = I^2 \underline{\hspace{1cm}} = \frac{\hspace{1cm}}{R}.$$

- ♦ Закончите предложение.

Вакантное место с недостающим электроном, которое имеет эффективный положительный заряд, называется \_\_\_\_\_.

- ♦ Заполните таблицу.

	Соединение проводников	
	Последовательное	Параллельное
Схема соединения		
$U$		
$I$		
$R$		
$Q$		

Ответы на тестовые задания (неделя 24)

1 — 3. 2 — 1. 3 — 1. 4 — 4. 5 — 2. 6 — 1.



- 3.3. Магнитное поле
- 3.3.1. Взаимодействие магнитов
- 3.3.2. Магнитное поле проводника с током
- 3.3.3. Сила Ампера
- 3.3.4. Сила Лоренца

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### Магнитное поле. Взаимодействие токов

**Магнитное поле** — одна из форм материи (отличная от вещества), существующая в пространстве, окружающем постоянные магниты, проводники с током и движущиеся заряды. Магнитное поле вместе с электрическим полем образует единое электромагнитное поле.

Магнитное поле не только создаётся постоянными магнитами, движущимися зарядами и токами в проводниках, но и действует на них же.

Термин «магнитное поле» был введён в 1845 г. М. Фарадеем. К тому времени был уже известен ряд явлений электродинамики, требующих объяснения. К ним относятся, в частности, следующие.

1. Явление взаимодействия постоянных магнитов (установление магнитной стрелки вдоль магнитного меридиана Земли, притяжение разноименных полюсов, отталкивание одноименных), известное с древних времен и систематически исследованное У. Гильбертом (результаты опубликованы в 1600 г. в его трактате «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле»).

2. В 1820 г. датский учёный Г. Х. Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, помещённая вблизи проводника, по которому течёт ток, поворачивается, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику.

3. В том же году французский физик Ампер, которого заинтересовали опыты Эрстеда, обнаружил взаимодействие двух прямолинейных проводников с током. Оказалось, что если токи в проводниках текут в одну сторону, т. е. параллельны, то проводники притягиваются (рис. 106, а), если в противоположные стороны (т. е. антипараллельны), то отталкиваются (рис. 106, б).

*Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между движущимися электрическими зарядами, называют магнитными, а силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, — магнитными силами.*

Согласно теории близкодействия, которой придерживался М. Фарадей, ток в одном из проводников не может непосредственно влиять на ток в другом проводнике. Аналогично случаю с неподвижными электрическими зарядами, вокруг которых существует электрическое поле, был сделан вывод, что в пространстве, окружающем токи, существует магнитное поле,

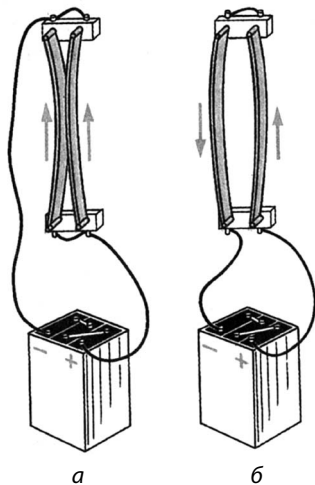


Рис. 106

которое действует с некоторой силой на другой проводник с током, помещённый в это поле, либо на постоянный магнит. В свою очередь, магнитное поле, создаваемое вторым проводником с током, действует на ток в первом проводнике.

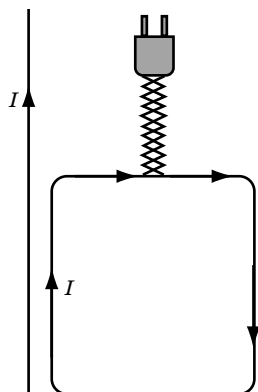


Рис. 107

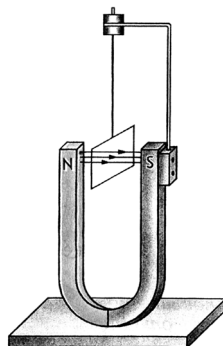


Рис. 108

Подобно тому как электрическое поле обнаруживается по его воздействию на пробный заряд, внесенный в это поле, магнитное поле можно обнаружить по ориентирующему действию магнитного поля на рамку с током малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно меняется) размеров (рис. 107). Провода, подводящие ток к рамке, следует сплести (или расположить близко друг к другу), тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти провода, будет равна нулю. Силы же, действующие на такую рамку с током, будут её поворачивать, так что её плоскость установится перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. В примере, приведённом на рис. 107, рамка повернётся так, чтобы проводник с током оказался в плоскости рамки. При изменении направления тока в проводнике рамка повернётся на  $180^\circ$ . В поле между полюсами постоянного магнита рамка повернётся плоскостью перпендикулярно магнитным силовым линиям магнита (рис. 108).

## Взаимодействие магнитов

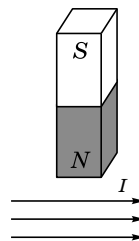
**Постоянный магнит** — это изделие из материала, являющегося автономным (самостоятельным, изолированным) источником постоянного магнитного поля.

Магнитные свойства некоторых природных минералов были известны уже в древности. Так, имеются письменные свидетельства более чем 2000-летней давности об использовании в Китае естественных постоянных

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Где находится северный магнитный полюс Земли?
  - вблизи Северного географического полюса Земли
  - вблизи Южного географического полюса Земли
  - вблизи экватора, в районе нулевого меридиана
  - вблизи экватора, в районе  $180^\circ$  меридиан

- К горизонтальному пучку положительных ионов сверху подносят магнит (см. рисунок). При этом пучок отклонится
  - вниз
  - вверх
  - от читателя
  - к читателю



- На проводнике длиной 50 см с током 2 А однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,1 Тл действует с силой 0,05 Н. Вычислить угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.
  - $30^\circ$ ;
  - $45^\circ$ ;
  - $60^\circ$ ;
  - $90^\circ$

- Какая сила действует на провод длиной 10 см в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,05 Тл, если ток в проводе 5 А, а угол между направлением тока и линиями магнитной индукции  $90^\circ$ ?
  - 5 мН
  - 14 мН
  - 35 мН
  - 25 мН

- Протон и  $\alpha$ -частица влетают в однородное магнитное поле. Скорость обеих частиц направлена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Каково отношение периода обращения протона к периоду обращения  $\alpha$ -частицы?
  - 4;
  - 2;
  - 0,5;
  - 1

- Электрон движется со скоростью 3000 км/с в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,1 Тл. Направление скорости электрона и линий магнитной индукции составляет прямой угол. Определите силу, действующую на электрон.
  - $4,2 \cdot 10^{-12}$  Н
  - $4,8 \cdot 10^{-14}$  Н
  - $3,6 \cdot 10^{-13}$  Н
  - $3,8 \cdot 10^{-15}$  Н

магнитов в качестве компасов. О притяжении и отталкивании магнитов и намагничивании ими железных опилок упоминается в трудах древнегреческих и римских учёных (например, в поэме «О природе вещей» Тита Лукреция Кара).

Природные магниты представляют собой куски магнитного железняка (магнетита), состоящего из  $\text{FeO}$  (31 %) и  $\text{Fe}_2\text{O}$  (69 %). Если такой кусок минерала поднести к мелким железным предметам — гвоздям, опилкам, тонкому лезвию и т. д., они к нему притянутся (рис. 109, а).

Искусственные постоянные магниты изготавливают из специальных сплавов, в которые входят железо, никель, кобальт и др. Эти металлы приобретают магнитные свойства (намагничиваются), если их поднести к постоянным магнитам. Поэтому чтобы изготовить из них постоянные магниты, их специально держат в сильных магнитных полях, после чего они сами становятся источниками постоянного магнитного поля и способны длительное время сохранять магнитные свойства.

На рис. 109, б изображены дугообразный и полосовой магниты. На рис. 110, а, б даны картины магнитных полей этих магнитов, полученных методом, который впервые применил в своих исследованиях М. Фарадей: с помощью железных опилок, рассыпанных на листе бумаги, на котором лежит магнит. У каждого магнита есть два полюса — это места наибольшего сгущения магнитных силовых линий (их называют также линиями магнитного поля, или линиями магнитной индукции поля). Это места, к которым сильнее всего притягиваются железные опилки (рис. 109, в). Один из полюсов принято называть *северным* (N), другой — *южным* (S). Если поднести два магнита друг к другу одноименными полюсами, можно увидеть, что они отталкиваются, а если разноименными — притягиваются.

На рис. 110 наглядно видно, что магнитные линии магнита — замкнутые линии (точно такие, как магнитные линии магнитного поля постоянного тока). На рис. 111 а, б показаны силовые линии магнитного поля двух магнитов, обращённых друг к другу одноимёнными и разноименными полюсами. Центральная часть этих картин напоминает картины электрических полей двух зарядов (разноименных и одноименных). Однако существенным различием электрического и магнитного полей является то, что линии электрического поля начинаются на зарядах и заканчиваются на них. Магнитных же зарядов в природе не

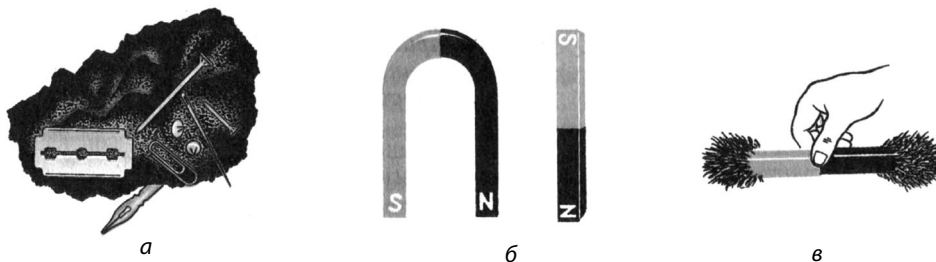


Рис. 109

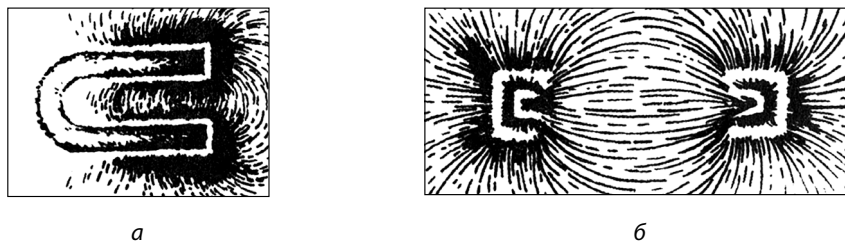
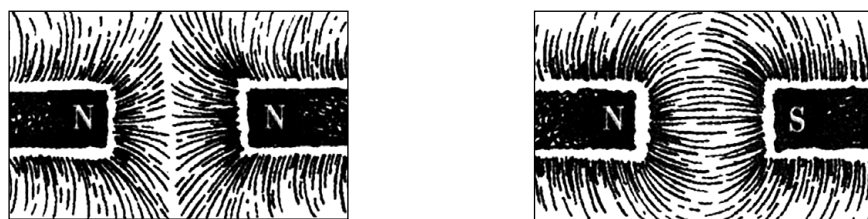


Рис. 110

существует. Линии магнитного поля выходят из северного полюса магнита и входят в южный, они продолжаются и в теле магнита, т. е., как было сказано выше, являются замкнутыми линиями. Поля, силовые линии которых замкнуты, называются **вихревыми**. Магнитное поле — это вихревое поле (в этом его отличие от электрического).



а

б

Рис. 111

Самым древним магнитным прибором является всем хорошо известный компас. В современной технике магниты используются очень широко: в электродвигателях, в радиотехнике, в электроизмерительной аппаратуре и т. д.

Земной шар является магнитом. Как у всякого магнита, у него есть своё магнитное поле и свои магнитные полюсы (рис. 112).

Магнитные полюсы Земли не совпадают с её географическими полюсами. Поэтому направление магнитной стрелки не совпадает с направлением географического меридиана, и магнитная стрелка компаса лишь приблизительно показывает направление на север.

На стрелку компаса могут влиять также некоторые природные явления — например, *магнитные бури*, которые являются временными изменениями магнитного поля Земли, связанными с солнечной активностью. Солнечная активность сопровождается выбросом с поверхности Солнца потоков заряженных частиц, в частности электронов и протонов. Эти потоки, движущиеся с большой скоростью, создают своё магнитное поле, взаимодействующее с магнитным полем Земли.

На земном шаре (кроме кратковременных изменений магнитного поля) встречаются области, в которых наблюдается постоянное отклонение направления магнитной стрелки от направления магнитной линии Земли. Это области *магнитной аномалии* (в переводе с греч. «отклонение, ненормальность»). Одной из самых больших таких областей является Курская магнитная аномалия. Причиной аномалий являются огромные залежи железной руды на сравнительно небольшой глубине.

Земное магнитное поле надёжно защищает поверхность Земли от космического излучения, действие которого на живые организмы разрушительно.

Полёты межпланетных космических станций и кораблей позволили установить, что у Луны и планеты Венера отсутствует магнитное поле, а у планеты Марс оно очень слабое.

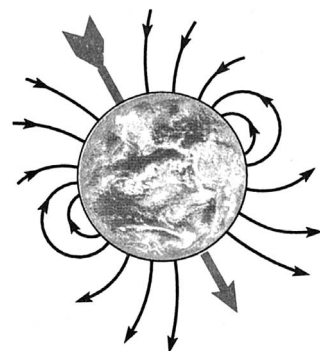


Рис. 112

## Индукция магнитного поля

**Магнитная индукция** ( $\vec{B}$ ) — это векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле. За направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  принимается или направление

от южного полюса  $S$  к северному полюсу  $N$  магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 113), или направление положительной нормали к замкнутому контуру с током на гибком подвесе, свободно устанавливающемуся в магнитном поле.

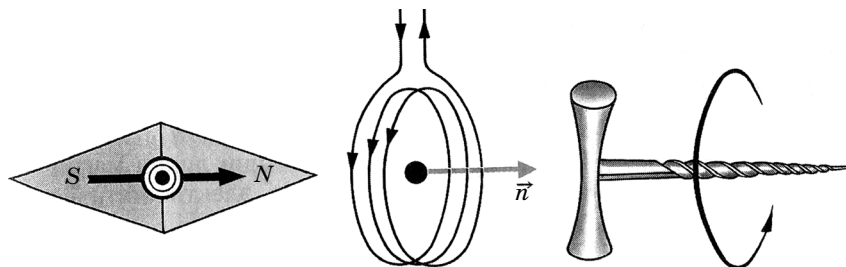


Рис. 113

Положительной считается нормаль, направленная в сторону перемещения острия буравчика (с правой нарезкой), рукоятку которого вращают по направлению тока в рамке.

Ясно, что направления 1) и 2) совпадают, что было установлено ещё опытами Ампера.

Что касается величины магнитной индукции (т.е. её модуля)  $B$ , которая могла бы характеризовать силу действия поля, то экспериментами было установлено, что максимальная сила  $F$ , с которой поле действует на проводник с током (помещённый перпендикулярно линиям индукции магнитного поля), зависит от силы тока  $I$  в проводнике и от его длины  $\Delta l$  (пропорциональна им). Однако сила, действующая на элемент тока (единичной длины и силы тока), зависит только от самого поля, т.е. отношение  $\frac{F}{I\Delta l}$  для данного поля является величиной постоянной (аналогично отношению силы к заряду для электрического поля). Эту величину и определяют как **магнитную индукцию**:

$$B = \frac{F}{I\Delta l}.$$

Индукция магнитного поля в данной точке равна отношению максимальной силы, действующей на проводник с током, к длине проводника и силе тока в проводнике, помещённом в эту точку.

Чем больше магнитная индукция в данной точке поля, тем с большей силой будет действовать поле в этой точке на магнитную стрелку или движущийся электрический заряд.

Единицей магнитной индукции в СИ является **тесла (Тл)**, названная в честь хорватского электротехника Николы Теслы. Как видно из формулы,  $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ .

Для наглядного представления магнитного поля М. Фарадей ввёл понятие магнитных силовых линий, которые он неоднократно демонстрировал в своих опытах. Картина силовых линий легко может быть получена с помощью железных стружек, насыпанных на картон (рис. 114–117). На рис. 114 представлены линии магнитной индукции прямого тока, на рис. 115 — соленоида, на рис. 116 — кругового тока, на рис. 117 — прямого магнита.

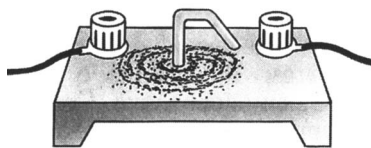


Рис. 114

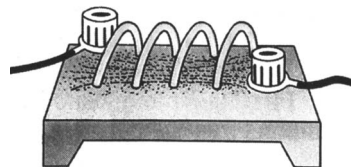


Рис. 115

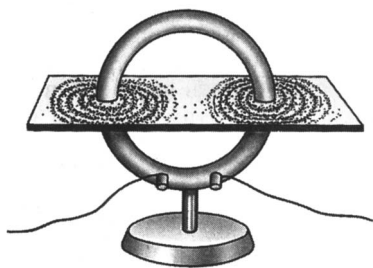


Рис. 116

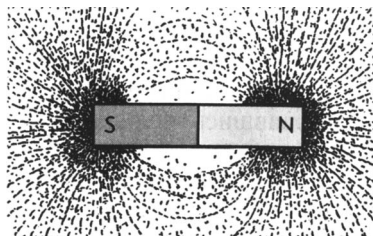


Рис. 117

Линиями магнитной индукции, или магнитными силовыми линиями, или просто магнитными линиями, называют линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в этой точке поля.

Направление магнитного поля прямого тока можно определить по правилу правого буравчика:

Если вращать рукоятку буравчика так, чтобы поступательное движение острия буравчика указывало направление тока, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление силовых линий магнитного поля тока.

Направление магнитного поля прямого тока можно определять также и с помощью первого правила правой руки:

Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в каждой точке покажут направление вектора индукции в этой точке.

Линии магнитной индукции являются замкнутыми, это свидетельствует о том, что в природе нет магнитных зарядов. Поля, силовые линии которых замкнуты, называют вихревыми полями. То есть магнитное поле — это вихревое поле. Этим оно отличается от электрического поля, создаваемого зарядами.

**Соленоид** — это проволочная спираль с током.

Соленоид характеризуется числом витков на единицу длины  $n$ , длиной  $l$  и диаметром  $d$ . Толщина провода в соленоиде и шаг спирали (винтовой линии) малы по сравнению с его диаметром  $d$  и длиной  $l$ . Термин «соленоид» применяют и в более широком значении — так называют катушки с произвольным сечением (квадратный соленоид, прямоугольный соленоид), и не обязательно цилиндрической формы (тороидальный соленоид). Различают длинный соленоид ( $l \gg d$ ) и короткий ( $l \ll d$ ). В тех случаях, когда соотношение между  $d$  и  $l$  специально не оговаривается, подразумевается длинный соленоид.

Силовые линии магнитного поля соленоида изображены на рис. 118, а. Направление этих линий определяют с помощью второго правила правой руки:

Если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по току в витках, то отставленный большой палец укажет направление магнитных линий внутри соленоида.

Сравнив магнитное поле соленоида с полем постоянного магнита (рис. 118, б), можно заметить, что они очень похожи. Как и у магнита, у соленоида есть два полюса — северный (N) и южный (S). Северным полюсом называют тот, из которого магнитные линии выходят; южным полюсом — тот, в который они входят. Северный полюс у соленоида всегда располагается с той стороны, на которую указывает большой палец ладони при её расположении в соответствии со вторым правилом правой руки.

Соленоид в виде катушки с большим числом витков используют в качестве магнита.

Исследования магнитного поля соленоида показывают, что магнитное действие соленоида увеличивается с увеличением силы тока и числа витков в соленоиде. Кроме того,

магнитное действие соленоида или катушки с током усиливается при введении в него железного стержня, который называют сердечником.

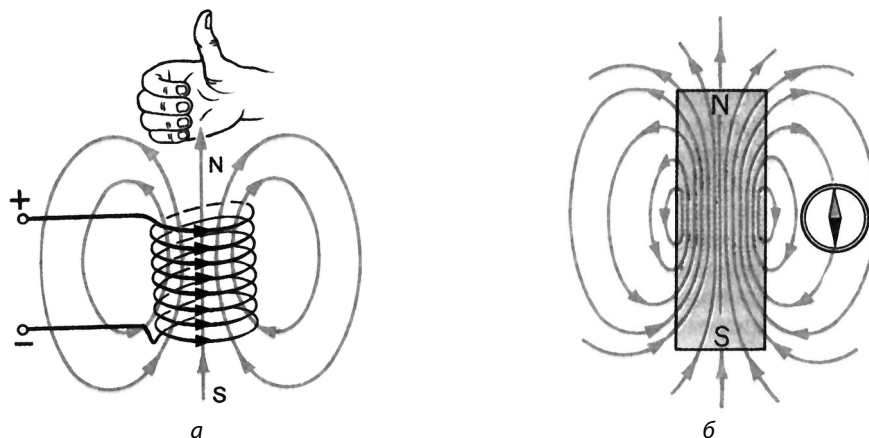


Рис. 118

Соленоид с железным сердечником внутри называется электромагнитом.

Электромагниты могут содержать не одну, а несколько катушек (обмоток) и иметь при этом разные по форме сердечники.

## Закон Ампера

На прямолинейный участок проводника  $\Delta l$ , по которому течёт ток  $I$ , в магнитном поле с индукцией  $B$  действует сила  $F$ .

Для вычисления этой силы используют выражение:

$$F_A = BI\Delta l \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и направлением отрезка проводника с током (элементом тока); за направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику течёт ток (рис. 119). Сила  $F$  называется **силой Ампера** в честь французского физика А. М. Ампера, который первым обнаружил действие магнитного поля на проводник с током. (На самом деле Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя элементами проводников с током. Он был сторонником теории дальнего действия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах учёного выражение для силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.)

Направление силы Ампера определяется с помощью правила левой руки:

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в неё перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током (рис. 119). Таким образом, сила Ампера всегда перпендикулярна как вектору индукции магнитного поля, так и направлению тока в проводнике, т. е. перпендикулярна плоскости, в которой лежат эти два вектора.

Следствием действия силы Ампера является вращение рамки с током в постоянном магнитном поле (рис. 120). Это находит практическое применение во многих устройствах, например в электроизмерительных приборах — гальванометрах, амперметрах, где подвижная рамка с током вращается в поле постоянного магнита и по углу отклонения стрелки, неподвижно связанной с рамкой, можно судить о величине тока, протекающего в цепи.

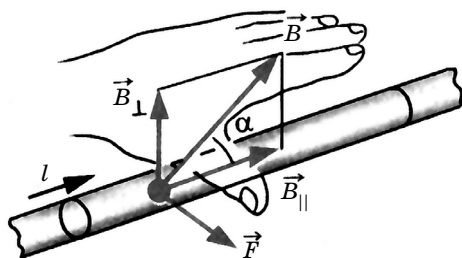


Рис. 119

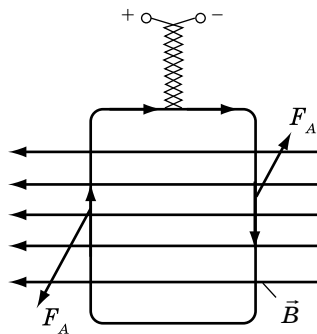


Рис. 120

Благодаря вращающему действию магнитного поля на рамку с током возможным стало также создание и использование электродвигателей — машин, в которых электрическая энергия превращается в механическую.

## Сила Лоренца

**Сила Лоренца** — это сила, действующая на движущийся точечный электрический заряд во внешнем магнитном поле.

Нидерландский физик Х. А. Лоренц в конце XIX в. установил, что сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, всегда перпендикулярна направлению движения частицы и силовым линиям магнитного поля, в котором эта частица движется.

Направление силы Лоренца можно определить с помощью правила левой руки:

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы четыре вытянутых пальца указывали направление движения заряда, а вектор магнитной индукции поля входил в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд (рис. 121).

Если заряд частицы отрицательный, то сила Лоренца будет направлена в противоположную сторону.

Модуль силы Лоренца легко определяется из закона Ампера и составляет:

$$F_{\text{Л}} = |q|vB \sin \alpha, \quad (3.17)$$

где  $q$  — заряд частицы,  $v$  — скорость её движения,  $\alpha$  — угол между векторами скорости и индукции магнитного поля.

Если кроме магнитного поля есть ещё и электрическое поле, которое действует на заряд с силой  $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$ , то полная сила, действующая на заряд, равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{эл}} + \vec{F}_{\text{Л}}.$$

Часто именно эту полную силу называют силой Лоренца, а силу, выраженную формулой (3.17), называют **магнитной частью силы Лоренца**.

Поскольку сила Лоренца перпендикулярна направлению движения частицы, она не может изменить её скорость (она не совершает работы), а может изменить лишь направление её движения, т. е. искривить траекторию.

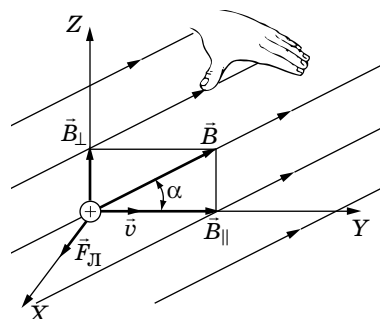


Рис. 121



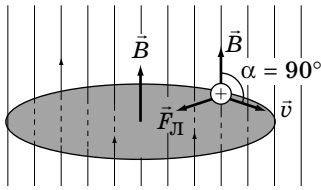


Рис. 122

Такое искривление траектории электронов в кинескопе телевизора легко наблюдать, если поднести к его экрану постоянный магнит: изображение исказится.

**Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.** Пусть заряженная частица влетает со скоростью  $v$  в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям напряжённости (рис. 122). Сила, действующая со стороны магнитного поля на частицу, заставит её равномерно вращаться по окружности радиусом  $r$ , который легко найти, воспользовавшись вторым законом Ньютона, выражением для центростремительного ускорения и формулой (3.17):

$$\frac{mv^2}{r} = |q| v B.$$

Отсюда получим

$$r = \frac{mv}{|q| B},$$

где  $m$  — масса частицы.

## Магнитные свойства веществ

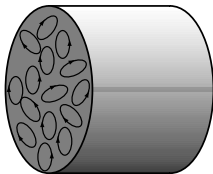


Рис. 123

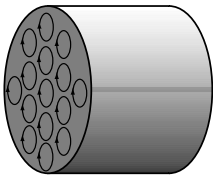


Рис. 124

Для того чтобы объяснить существование магнитного поля постоянных магнитов, Ампер предположил, что в веществе, обладающем магнитными свойствами, существуют микроскопические круговые токи (они были названы молекулярными). Идея эта впоследствии, после открытия электрона и строения атома, блестяще подтвердилась: эти токи создаются движением электронов вокруг ядра и, будучи ориентированы одинаково, в сумме создают поле вокруг и внутри магнита. На рис. 123 плоскости, в которых расположены элементарные электрические токи, ориентированы беспорядочно вследствие хаотического теплового движения атомов, и вещество не проявляет магнитных свойств. В намагниченном состоянии (под действием, например, внешнего магнитного поля) (рис. 124) эти плоскости ориентированы одинаково, и их действия складываются.

**Магнитная проницаемость.** Реакция среды на воздействие внешнего магнитного поля с индукцией  $B_0$  (поле в вакууме) определяется магнитной восприимчивостью  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где  $B$  — индукция магнитного поля в веществе. Магнитная проницаемость аналогична диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

По своим магнитным свойствам вещества делятся на **диамагнетики**, **парамагнетики** и **ферромагнетики**. У диамагнетиков коэффициент  $\mu$ , характеризующий магнитные свойства среды, меньше 1 (например, у висмута  $\mu = 0,999824$ ); у парамагнетиков  $\mu > 1$  (у платины  $\mu = 1,00036$ ); у ферромагнетиков  $\mu \gg 1$  (железо, никель, кобальт).

Диамагнетики отталкиваются от магнита, парамагнетики — притягиваются. По этим признакам их можно отличить друг от друга. У большинства веществ магнитная проницаемость практически не отличается от единицы, только у ферромагнетиков намного превосходит её, достигая нескольких десятков тысяч единиц.

**Ферромагнетики.** Наиболее сильные магнитные свойства проявляют ферромагнетики. Магнитные поля, создаваемые ферромагнетиками, намного сильнее внешнего намагничивающего поля. Правда, магнитные поля ферромагнетиков создаются не вследствие обращения электронов вокруг ядер — орбитального магнитного момента, а вследствие собственного вращения электрона — собственного магнитного момента, называемого спином.

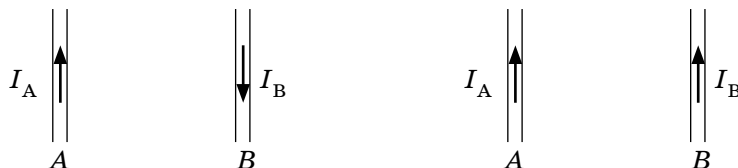
**Температура Кюри ( $T_c$ )** — это температура, выше которой ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства. Для каждого ферромагнетика она своя. Например, для железа  $T_c = 753\text{ }^\circ\text{C}$ , для никеля  $T_c = 365\text{ }^\circ\text{C}$ , для кобальта  $T_c = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Существуют ферромагнитные сплавы, у которых  $T_c < 100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839–1896).

Применяются ферромагнетики очень широко: в качестве постоянных магнитов (в электроизмерительных приборах, громкоговорителях, телефонах и т. д.), стальных сердечников в трансформаторах, генераторах, электродвигателях (для усиления магнитного поля и экономии электроэнергии). На тонкие магнитные пленки производится запись информации для запоминающих устройств в электронно-вычислительных машинах.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

- ♦ Нарисуйте силу Ампера, с которой проводник  $A$  действует на проводник  $B$ .



- ♦ Заполните пропуск в выражении для магнитной индукции.

$$B = \frac{F}{I \underline{\hspace{1cm}}}.$$

- ♦ Заполните схему.

Виды веществ по магнитным свойствам			

Ответы на тестовые задания (неделя 25) \_\_\_\_\_

1 — 2. 2 — 3. 3 — 1. 4 — 4. 5 — 3. 6 — 2.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

## Электромагнитная индукция. Магнитный поток

Явление электромагнитной индукции было открыто английским учёным М. Фарадеем 29 августа 1831 г.

Заключается оно в том, что при любом изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

Под магнитным потоком понимают поток  $\Phi$  вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через какую-либо поверхность  $S$ .

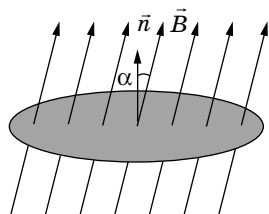


Рис. 125

Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, равен произведению модуля вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  на площадь  $S$ , ограниченную этим контуром, и на косинус угла  $\alpha$  между нормалью к плоскости контура  $\vec{n}$  и вектором  $\vec{B}$  (рис. 125).

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Произведение  $B \cos \alpha = B_n$  является проекцией вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура, поэтому

$$\Phi = B_n S.$$

Магнитный поток пропорционален числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность контура, и характеризует распределение магнитного поля на поверхности, ограниченной замкнутым контуром.

Единицей магнитного потока в СИ является **вебер (Вб)**. Магнитный поток в 1 Вб создаётся однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Явление электромагнитной индукции можно обнаружить:

- 1) при относительном движении катушки и магнита (рис. 126, а, б);

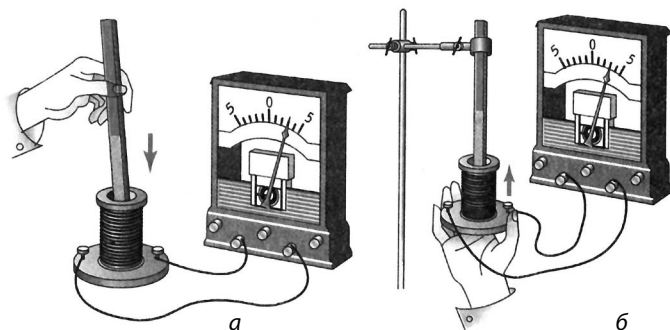


Рис. 126

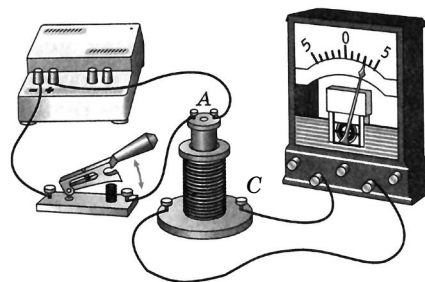


Рис. 127

2) при изменении индукции магнитного поля в контуре, расположенном перпендикулярно линиям магнитного поля (рис. 127). На этом рисунке катушка А, включённая в цепь источника тока, вставлена в другую катушку С, подключённую к гальванометру. При замыкании и размыкании цепи катушки А в катушке С возникает индукционный ток. Индукционный ток возникает также при изменении тока в катушке С или при движении катушек друг относительно друга;

3) при изменении положения контура, расположенного в постоянном магнитном поле (рис. 128). Ток в контуре появляется как при вращении контура в поле постоянного магнита (рис. 128, а), так и при вращении самого магнита внутри контура (рис. 128, б).

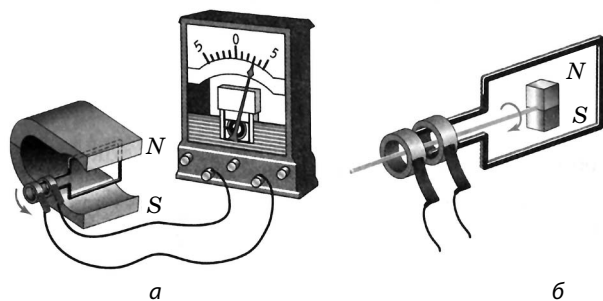


Рис. 128

## Закон электромагнитной индукции

М. Фарадеем было установлено, что **сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:**

$$I_i \sim \Delta\Phi/\Delta t.$$

Возникновение тока в замкнутом контуре означает наличие сторонних сил, работа которых по перемещению единичного заряда в контуре называется электродвижущей силой (ЭДС). Это означает, что при изменении потока через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, в контуре возникает ЭДС  $\mathcal{E}_i$ , которую называют ЭДС индукции. Согласно закону Ома для замкнутой цепи  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ . Следовательно, ЭДС индукции пропорциональна  $\Delta\Phi/\Delta t$ , поскольку сопротивление  $R$  не зависит от изменения магнитного потока. Закон электромагнитной индукции формулируется так:

ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

### 1. Явление электромагнитной индукции заключается

- 1) в изменении магнитного потока в контуре при движении последнего в магнитном поле
- 2) в повороте магнитной стрелки вдоль линий магнитной индукции
- 3) в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур
- 4) в протекании тока в электрической цепи при подключении источника тока

### 2. Определить магнитный поток, пронизывающий плоскую прямоугольную площадку со сторонами 10 см и 40 см, если магнитная индукция во всех точках площадки равна 2 Тл, а вектор магнитной индукции образует с нормалью к этой площадке угол $45^\circ$ .

- 1) 56 мВб
- 2) 38 мВб
- 3) 36 мВб
- 4) 24 мВб

### 3. Магнитный поток внутри контура, площадь поперечного сечения которого $20 \text{ см}^2$ , равен 0,4 мВб. Найти индукцию поля внутри контура. Поле считать однородным.

- 1) 0,1 Тл
- 2) 0,2 Тл
- 3) 0,3 Тл
- 4) 0,4 Тл

### 4. Магнитный поток через контур проводника с сопротивлением 0,05 Ом за 2 с равномерно изменился на 0,02 Вб. Сила тока в проводнике вследствие этого составила

- 1) 0,1 А
- 2) 0,2 А
- 3) 0,5 А
- 4) 0,05 А

Применение правила Ленца к замкнутому контуру с положительной нормалью приводит к выражению:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3.18)$$

Формула (3.18) выражает *основной закон электромагнитной индукции*. На рис. 129 внешнее магнитное поле индукции  $B$  возрастает со временем и направлено вдоль положительной нормали к контуру с током. Индуцированный ток противоположен выбранному направлению обхода в соответствии с индуцированным магнитным полем  $B'$ .

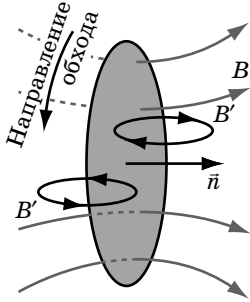


Рис. 129

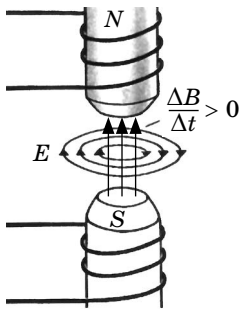


Рис. 130

Описанные выше опыты свидетельствуют о том, что электромагнитная индукция — это возникновение электрического поля и электрического тока при изменении во времени магнитного поля или при движении проводника в магнитном поле. Эти два типа эффектов электромагнитной индукции отличаются физической природой процессов, отвечающих за их возникновение. Первый тип обусловлен наведением вихревого электрического поля переменным магнитным полем, второй — действием сил Лоренца на движущиеся заряды в стационарном магнитном поле. В обоих случаях выполняется основной закон индукции, выраженный формулой (3.18).

В первом типе электромагнитной индукции ЭДС возникает в неподвижном замкнутом проводнике при любом изменении магнитного поля. С другой стороны, известно, что возникновение электродвижущей силы в любой цепи связано со сторонними силами, действующими на заряды в этой цепи. Под сторонними силами имеются в виду силы неэлектростатического характера. Какова же природа этих сил в данном случае?

Результаты различных экспериментов по электромагнитной индукции показали, что ЭДС индукции не зависит ни от материала проводника (металл, электролит и т. д.), ни от его состояния (например, величины и распределения температуры). Отсюда следует вывод, что сторонние силы связаны с самим магнитным полем.

Анализ явления электромагнитной индукции привел Дж. Максвелла к заключению, что причиной появления ЭДС индукции является электрическое поле (рис. 130), отличающееся от электростатического поля следующими особенностями.

1. Возникновение поля никак не связано с наличием проводников; оно существует в пространстве, окружающем переменное магнитное поле, независимо от наличия в нём проводников; проводники являются лишь индикаторами поля (если проводник замкнут, по нему течёт ток).
2. Это поле не является электростатическим, поскольку силовые линии электростатического поля всегда разомкнуты, они начинаются и заканчиваются на зарядах, и напряжение по замкнутому контуру в электростатическом поле равно нулю; электростатическое поле не может поддерживать движение зарядов в замкнутом контуре, т. е. привести к возникновению ЭДС.
3. В противоположность последнему индуцированное переменным магнитным полем электрическое поле является вихревым (как и магнитное поле); оно имеет замкнутые силовые линии, приводит к возникновению ЭДС индукции, приводящей в движение заряды по замкнутым проводам (рис. 130).
4. В отличие от электростатического поля, работа сил вихревого электрического поля и электрическое напряжение по замкнутому контуру не равны нулю, а значение напряжения между двумя точками определяется не только их взаимным положением, но и формой контура, соединяющего эти точки.

Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод, который выражает первое основное положение теории Максвелла: **любое изменение магнитного поля вызывает появление вихревого электрического поля.**

Направление силовых линий напряжённости  $\vec{E}$  совпадает с направлением индукционного тока. Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике. Чем быстрее меняется индукция магнитного поля, тем больше напряжённость индуцированного электрического поля.

ЭДС индукции в проводниках, движущихся в постоянном магнитном поле, соответствует второму типу электромагнитной индукции, обусловленному не переменным внешним магнитным полем, а действием сил Лоренца на свободные заряды проводника.

ЭДС индукции, возникающая на концах проводника длиной  $l$ , движущегося с постоянной скоростью  $\vec{v}$  под некоторым углом  $\alpha$  к вектору индукции  $\vec{B}$  однородного магнитного поля, равна:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{|q|} = \frac{F_{\text{Л}} l}{|q|} = \frac{|q| v B l \sin \alpha}{|q|} = v B l \sin \alpha,$$

где  $A$  — работа силы Лоренца по перемещению заряда  $q$  на пути  $l$ ,  $F_{\text{Л}}$  — сила Лоренца, действующая на движущийся заряд.

Если такой проводник входит в состав замкнутой цепи, остальные части которой неподвижны (рис. 131), то в цепи возникает электрический ток. Сила тока равна:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R + r} = \frac{v B l \sin \alpha}{R + r},$$

где  $R$  — сопротивление нагрузки (лампочки);  $r$  — сопротивление проводника, играющего роль внутреннего сопротивления источника тока (сопротивлением соединяющих проводников пренебрегаем).

С другой стороны, ту же ЭДС индукции можно получить, используя основной закон электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{B S \sin \alpha}{\Delta t}.$$

В данном случае изменение потока осуществляется не за счёт изменения индукции поля, а за счёт изменения площади контура, равного  $\Delta S = -lv\Delta t$ . В результате получим:

$$\mathcal{E}_i = v B l \sin \alpha.$$

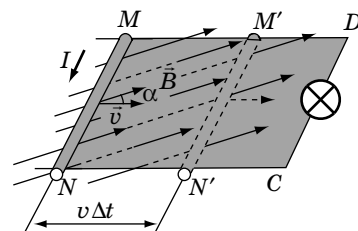


Рис. 131

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните пропуск в выражении для магнитного потока.

$$\Phi = B S \underline{\hspace{2cm}}$$

Ответы на тестовые задания (неделя 26)

1 — 3. 2 — 1. 3 — 2. 4 — 2.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

- 3.4. Электромагнитная индукция
- 3.4.4. Правило Ленца
- 3.4.5. Самоиндукция
- 3.4.6. Индуктивность
- 3.4.7. Энергия магнитного поля

### Правило Ленца

Правило Ленца (закон Ленца) было установлено Э. Х. Ленцем в 1834 г. Оно уточняет закон электромагнитной индукции, открытый в 1831 г. М. Фарадеем. Правило Ленца определяет направление индукционного тока в замкнутом контуре при его движении во внешнем магнитном поле.

**Направление индукционного тока всегда таково, что испытываемые им со стороны магнитного поля силы противодействуют движению контура, а создаваемый этим током магнитный поток  $\Phi_i$  стремится компенсировать изменения внешнего магнитного потока  $\Phi_e$ .**

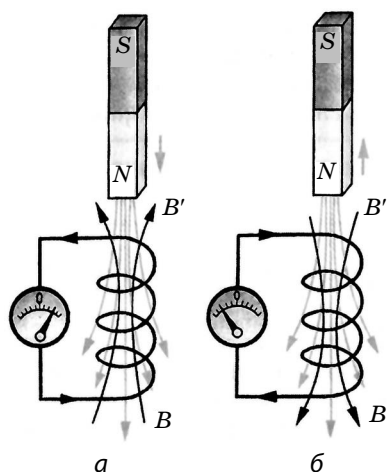


Рис. 132

Закон Ленца является выражением закона сохранения энергии для электромагнитных явлений. Действительно, при движении замкнутого контура в магнитном поле за счёт внешних сил необходимо выполнить некоторую работу против сил, возникающих в результате взаимодействия индуцированного тока с магнитным полем и направленных в сторону, противоположную движению.

Правило Ленца иллюстрируют рис. 132, а и рис. 132, б. Если постоянный магнит вдвигать в катушку, замкнутую на гальванометр, индукционный ток в катушке будет иметь такое направление, которое создаст магнитное поле с вектором  $B'$ , направленным противоположно вектору индукции поля магнита  $B$ , т. е. будет выталкивать магнит из катушки или препятствовать его движению. При вытягивании магнита из катушки, наоборот, поле, создаваемое индукционным током, будет притягивать катушку, т. е. опять препятствовать его движению.

Для применения правила Ленца с целью определения направления индукционного тока  $I_i$  в контуре необходимо следовать таким рекомендациям.

1. Установить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается поток магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ( $\Delta\Phi > 0$ ), или уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ).
3. Установить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля индукционного тока  $I_i$ . Эти линии должны быть направлены, согласно правилу Ленца, противоположно линиям  $\vec{B}$ , если  $\Delta\Phi > 0$ , и иметь одинаковое с ними направление, если  $\Delta\Phi < 0$ .
4. Зная направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$ , определить направление индукционного тока  $I_i$ , пользуясь правилом буравчика.

## Самоиндукция. Индуктивность

**Индуктивность**, или коэффициент самоиндукции, — это параметр электрической цепи, который определяет ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока или (и) её деформации.

Термином «индуктивность» обозначают также катушку самоиндукции, которая определяет индуктивные свойства цепи.

*Самоиндукция* — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока.

Самоиндукция была открыта в 1832 г. американским учёным Дж. Генри. Независимо от него в 1835 г. это явление открыл М. Фарадей.

ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока. Если это изменение вызывается собственным током, то говорят об ЭДС самоиндукции:

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

где  $L$  — индуктивность контура, или его *коэффициент самоиндукции*.

Индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с.

Индуктивность, как и электроёмкость, зависит от геометрии проводника — его размеров и формы, но не зависит от силы тока в проводнике. Так, индуктивность прямого провода гораздо меньше индуктивности того же провода, свёрнутого в спираль.

Расчёты показывают, что индуктивность описанного выше соленоида в воздухе определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $N$  — число витков соленоида,  $l$  — длина соленоида,  $S$  — площадь поперечного сечения.

Кроме того, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник, а именно — от его магнитной проницаемости, которая определяется по формуле:

$$\frac{L}{L_0} = \mu,$$

где  $L_0$  — индуктивность контура в вакууме,  $L$  — индуктивность контура в однородном веществе, заполняющем магнитное поле.

Единицей индуктивности в СИ является *генри* (Гн):  
1 Гн = 1 В · с/А.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. В какой-то момент переменное внешнее магнитное поле приводит к увеличению магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который согласно правилу Ленца:

- 1) индуцирует магнитное поле, противоположное внешнему
- 2) индуцирует магнитное поле, параллельное внешнему
- 3) индуцирует магнитное поле, перпендикулярное внешнему
- 4) не индуцирует магнитное поле

2. Найти ЭДС индукции в проводнике длиной 1 м, перемещающемся в однородном магнитном поле с  $B = 6$  Тл со скоростью 3 м/с под углом  $45^\circ$  к вектору магнитной индукции.

- 1) 24,3 В
- 2) 13,4 В
- 3) 36,2 В
- 4) 12,6 В

3. Найти скорость изменения магнитного потока в соленоиде из 1000 витков при возбуждении в нём ЭДС индукции 10 В.

- 1) 0,1 Вб/с
- 2) 0,01 Вб/с
- 3) 0,03 Вб/с
- 4) 0,2 Вб/с

4. При равномерном изменении в течение 2 с силы тока в катушке от нуля до 5 А в ней возникла ЭДС самоиндукции 100 В. Определить индуктивность катушки.

- 1) 20 Гн
- 2) 40 Гн
- 3) 10 Гн
- 4) 80 Гн

5. Найти энергию магнитного поля катушки, если её индуктивность 2 Гн, а сила тока в ней 10 А.

- 1) 10 Дж
- 2) 20 Дж
- 3) 50 Дж
- 4) 100 Дж

6. Сила тока в катушке уменьшилась с 10 А до 4 А. При этом энергия магнитного поля катушки уменьшилась на 2 Дж. Какова индуктивность катушки?

- 1) 10 Гн
- 2) 2 Гн
- 3) 0,05 Гн
- 4) 0,15 Гн



При любом включении и выключении тока в цепи наблюдаются так называемые *экстратоки самоиндукции* (*экстратоки замыкания и размыкания*), возникающие в цепи вследствие явления самоиндукции и препятствующие, согласно правилу Ленца, нарастанию либо убыванию тока в цепи. На рис. 133 показана схема соединения двух одинаковых ламп. Одна из них подключена к источнику через резистор  $R$ , а другая — последовательно соединена с катушкой  $L$  с железным сердечником. При замыкании цепи первая лампа вспыхивает практически мгновенно, а вторая — с заметным опозданием. Это вызвано тем, что ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 134).

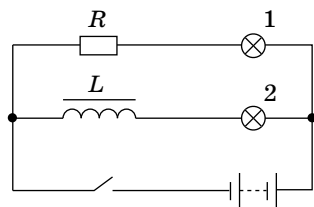


Рис. 133

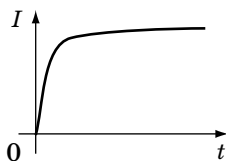


Рис. 134

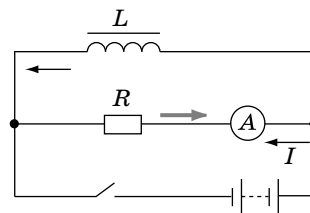


Рис. 135

При размыкании ключа (рис. 135) в катушке  $L$  возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр течёт ток (светлая стрелка), направленный против начального тока до размыкания (чёрная стрелка). При этом ЭДС самоиндукции может быть гораздо больше ЭДС батареи элементов, что будет проявляться в том, что экстраток размыкания будет существенно превышать стационарный ток при замкнутом ключе.

Индуктивность характеризует инерционность цепи по отношению к изменению в ней тока, и её можно рассматривать как электродинамический аналог массы тела в механике, являющейся мерой инертности тела. При этом ток  $I$  играет роль скорости тела.

## Энергия магнитного поля

По аналогии с кинетической энергией тела для цепей постоянного тока **энергия магнитного поля**  $W_m$  записывается в форме, аналогичной выражению для кинетической энергии  $\frac{mv^2}{2}$ :

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

При этом индуктивность включает часть, связанную с энергией магнитного поля, сосредоточенную в проводниках, внутреннюю индуктивность  $L_i$  и внешнюю  $L_e$ , связанную с внешним магнитным полем:  $L = L_i + L_e$ .

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

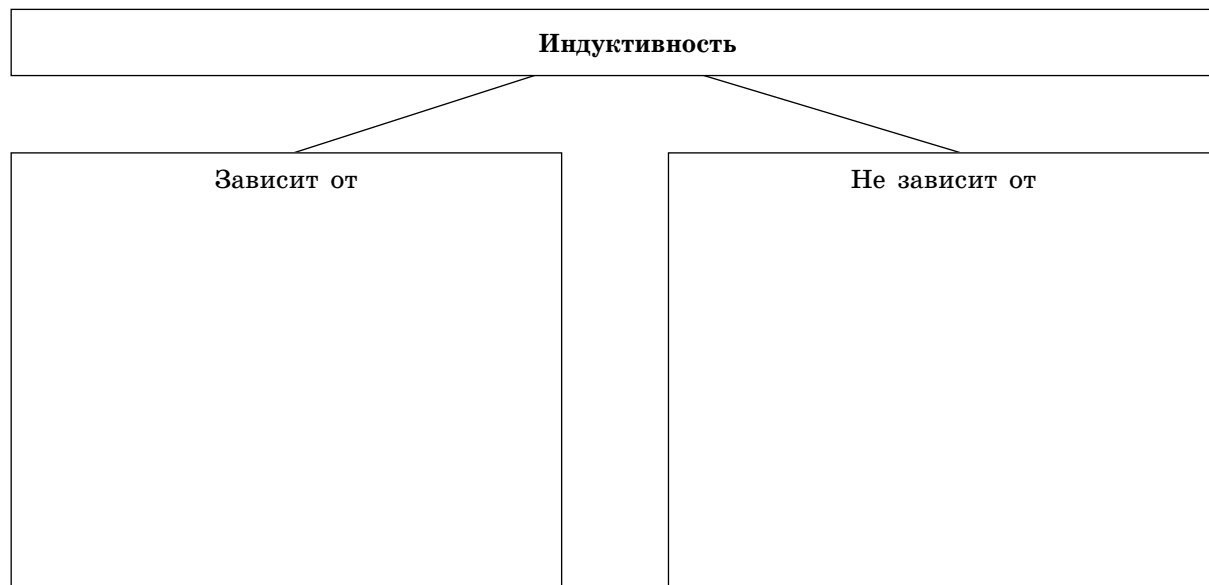
### ♦ Заполните пропуски.

Направления индукционного потока зависит от изменения  
и от направления \_\_\_\_\_

♦ Закончите предложение.

Физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с, называется

♦ Заполните схему.



♦ Заполните пропуск в выражении для энергии магнитного поля.

$$W_{\text{м}} = \frac{I^2}{2}.$$

Ответы на тестовые задания (неделя 27) \_\_\_\_\_

1 — 1. 2 — 4. 3 — 2. 4 — 2. 5 — 4. 6 — 3.

- 3.5. Электромагнитные колебания и волны
- 3.5.1. Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур
- 3.5.2. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс
- 3.5.3. Гармонические электромагнитные колебания

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре

В физике существуют колебания двух типов — механические и электромагнитные, которые подчиняются одинаковым количественным законам.

**Колебательный контур** — это электрическая цепь, содержащая индуктивность  $L$ , ёмкость  $C$  и сопротивление  $R$ , в которой могут возбуждаться электрические колебания.

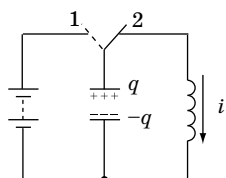


Рис. 136

Различают линейные и нелинейные колебательные контуры. Параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$  линейного колебательного контура не зависят от интенсивности колебаний, а период колебаний не зависит от амплитуды. При отсутствии потерь ( $R = 0$ ) в линейном колебательном контуре происходят свободные гармонические колебания.

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор предварительно заряжают от батареи аккумуляторов, сообщив ему энергию  $W_p$ , и переводят переключатель в положение 2 (рис. 136). После замыкания цепи конденсатор начнёт разряжаться через катушку индуктивности, теряя энергию. В цепи появится ток, вызывающий переменное магнитное поле.

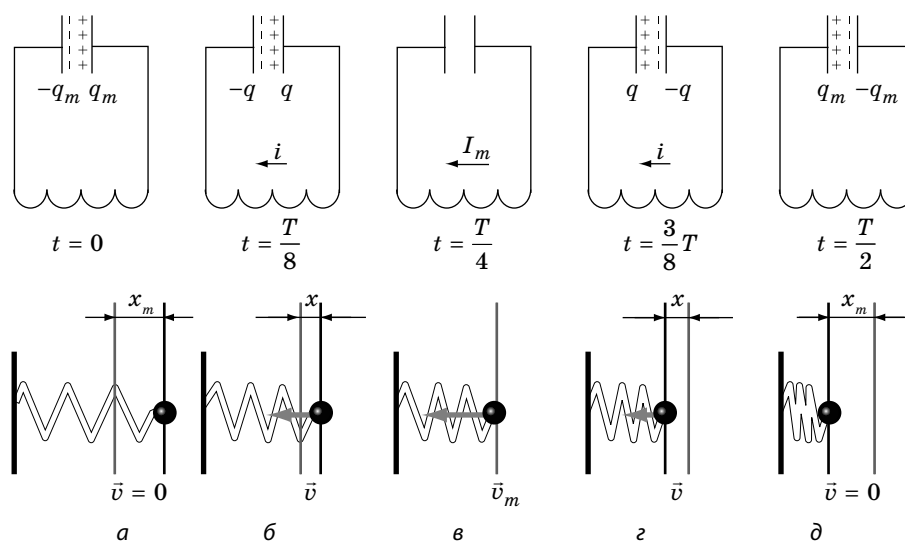


Рис. 137

Переменное магнитное поле, в свою очередь, приводит к созданию вихревого электрического поля, препятствующего току, в результате чего изменение тока происходит постепенно. По мере увеличения тока через катушку возрастает энергия магнитного поля  $W_m$ . Полная энергия  $W$  электромагнитного поля контура остаётся постоянной (при отсутствии сопротивления) и равной сумме энергий магнитного и электрического полей. Полная энергия, в силу закона сохранения энергии, равна максимальной энергии электрического или магнитного поля:

$$E = \frac{LI^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (3.19)$$

где  $L$  — индуктивность катушки,  $I$  и  $I_m$  — сила тока и её максимальное значение,  $q$  и  $q_m$  — заряд конденсатора и его максимальное значение,  $C$  — ёмкость конденсатора.

Процесс перекачки энергии в колебательном контуре между электрическим полем конденсатора при его разрядке и магнитным полем, сосредоточенным в катушке, полностью аналогичен процессу превращения потенциальной энергии растянутой пружины или поднятого груза математического маятника в кинетическую энергию при механических колебаниях последних. Рис. 137 иллюстрирует сказанное.

Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре, можно получить, приравняв производную по полной энергии контура (3.19) к нулю (поскольку полная энергия постоянна) и заменив в полученном уравнении ток на производную заряда по времени.

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \quad (3.20)$$

Как видно, уравнение (3.20) ничем не отличается по форме от соответствующего дифференциального уравнения (1.54) для свободных механических колебаний шарика на пружине. Заменив механические параметры системы на электрические, мы в точности получим уравнение (3.20).

По аналогии с дифференциальным уравнением для механической колебательной системы циклическая частота свободных электрических колебаний равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.21)$$

Период свободных колебаний в контуре равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.22)$$

Формула (3.22) называется формулой Томсона в честь английского физика У. Томсона (Кельвина), который её вывел.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- В электрическом колебательном контуре одной из колеблющихся величин является
  - заряд конденсатора
  - сопротивление проводов
  - индуктивность катушки
  - ёмкость конденсатора
- В колебательном контуре ёмкость конденсатора 20 мкФ и индуктивность катушки 4 мГн. Каков период собственных колебаний контура?
  - 34 мкс
  - 56 мкс
  - 42 мкс
  - 64 мкс
- Какой ёмкости конденсатор надо включить в цепь, чтобы осуществился резонанс? Частота переменного тока равна 2 Гц, а индуктивность катушки 1 Гн.
  - 6,3 мФ
  - 0,55 мФ
  - 0,35 мФ
  - 0,45 мФ
- В цепь включены последовательно катушка с индуктивностью 50 мГн и конденсатор ёмкостью 20 мкФ. При какой частоте тока в этой цепи будет резонанс?
  - 200 Гц
  - 159 Гц
  - 311 Гц
  - 400 Гц
- Циклическая частота колебаний электрического контура при введении железного сердечника в катушку индуктивности
  - увеличится
  - не изменится
  - уменьшится
  - уменьшится, затем увеличится
- Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью  $C = 0,9$  нФ и катушки с индуктивностью  $L = 0,002$  Гн. На какую длину волн настроен контур (сопротивлением контура можно пренебречь)?
  - 1500 м
  - 3500 м
  - 4500 м
  - 2500 м

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

Увеличение периода свободных колебаний с возрастанием  $L$  и  $C$  объясняется тем, что при увеличении индуктивности ток медленнее нарастает и медленнее падает до нуля, а чем больше ёмкость, тем больше времени требуется для перезарядки конденсатора.

## Гармонические колебания заряда и тока

Гармонические колебания заряда и тока описываются теми же уравнениями, что и их механические аналоги:

$$q = q_m \cos \omega_0 t,$$

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos(\omega_0 t + \pi/2),$$

где  $q_m$  — амплитуда колебаний заряда,  $I_m = \omega_0 q_m$  — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока опережают по фазе на  $\pi/2$  колебания заряда.

## Вынужденные электромагнитные колебания

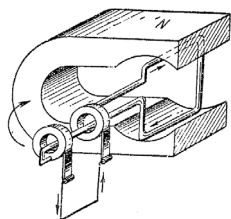


Рис. 138

Как и в случае механических колебаний, вынужденные электромагнитные колебания проявляются при наличии внешней периодически изменяющейся силы. Такие колебания проявляются, например, при наличии в цепи периодической электродвижущей силы. Переменная ЭДС индукции возникает в проводочной рамке из нескольких витков, вращающейся в поле постоянного магнита (рис. 138). При этом магнитный поток, пронизывающий рамку, периодически меняется. В соответствии с законом электромагнитной индукции периодически меняется и возникающая ЭДС индукции. Если рамку замкнуть на гальванометр, его стрелка начнёт колебаться около положения равновесия, показывая, что в цепи идёт переменный ток.

Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы.

### Резонанс в электрической цепи

Явление резонанса заключается в том, что амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает наибольшего значения, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте колебательной системы.

Если активное сопротивление  $R$  в колебательном контуре мало, то по аналогии с механической колебательной системой с малым коэффициентом трения  $\mu$  в нём возможен вполне отчётливый резонанс (рис. 139). Сила тока при вынужденных колебаниях в контуре достигнет максимального значения, когда частота вынуждающих колебаний  $\omega$  (частота приложенного к контуру переменного напряжения) сравняется с собственной частотой электрического колебательного контура  $\omega_0$ :

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

Амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе равна:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

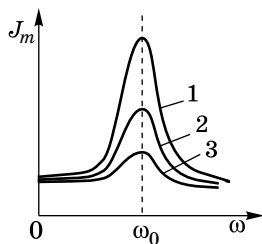


Рис. 139

При  $R \rightarrow 0$  резонансное значение силы тока неограниченно возрастает:  $(I_m)_{\text{рез}} \rightarrow \infty$ . Наоборот, при больших  $R$  говорить о резонансе не имеет смысла. Зависимости амплитуды силы тока от частоты (резонансные кривые) представлены на рис. 139. Они подобны резонансным кривым колебаний пружинного маятника, где  $X_m = I_m$ , а номерам кривых 1, 2, 3 соответствуют сопротивления контура  $R_1 < R_2 < R_3$ .

Амплитуда напряжения при резонансе растёт одновременно с ростом силы тока. Напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности становятся одинаковыми и во много раз превосходят внешнее напряжение. Так как

$$U_{Cm} = U_{Lm} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}},$$

а внешнее напряжение связано с резонансным током соотношением  $U_m = I_m R$ , то при  $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$  получим:

$$U_{Cm} = U_{Lm} \gg U_m.$$

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

- ♦ Заполните таблицу «Соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах».

Механические величины	Электрические величины
Координата $x$	
	Сила тока $i$
Масса $m$	
Жёсткость пружины $k$	
Потенциальная энергия $kx^2/2$	
	Энергия магнитного поля $Li^2/2$

Ответы на тестовые задания (неделя 28)

1 — 1. 2 — 2. 3 — 1. 4 — 2. 5 — 3. 6 — 4.

- 3.5. Электромагнитные колебания и волны
- 3.5.4. Переменный ток. Производство, передача и потребление электрической энергии
- 3.5.5. Электромагнитное поле
- 3.5.6. Свойства электромагнитных волн
- 3.5.7. Различные виды электромагнитных излучений и их применение

## Электромагнитное поле

**Электромагнитное поле** — это та часть пространства, которая содержит в себе или окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии.

Таково определение электромагнитного поля, впервые данное Дж.К. Максвеллом.

В настоящее время электромагнитное поле определяется как **особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрически заряженных тел.**

Термин «электромагнитное поле» ввёл М. Фарадей, причём для него это был реальный физический объект, распределённый в пространстве. Описание электромагнитных явлений с помощью представления об электромагнитном поле было альтернативой теории дальнего действия. Впоследствии Дж. Максвелл облёк идеи М. Фарадея в математическую форму. Он определил электромагнитное поле как совокупность взаимосвязанных векторных полей и установил законы, которым они подчиняются. В своей теории Максвелл показал, что:

- 1) электрическое поле может быть создано неподвижными зарядами;
- 2) электрическое поле может быть создано переменным магнитным полем, и в этом случае его силовые линии являются замкнутыми; они охватывают изменяющийся магнитный поток (переменное электрическое поле называется вихревым);
- 3) магнитное поле не имеет источников (нет магнитных зарядов), его силовые линии всегда замкнуты;
- 4) переменное электрическое поле (переменный поток электрических силовых линий) создаёт переменное магнитное поле. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряжённости электрического поля (рис. 140) аналогично случаю создания переменным магнитным полем вихревого электрического поля.

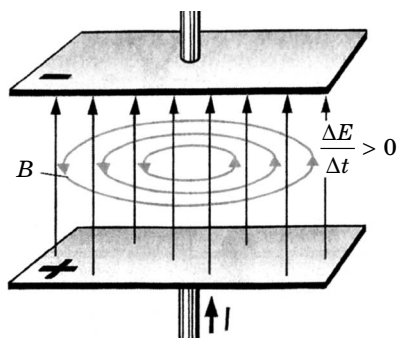


Рис. 140

Однако теперь при возрастании напряжённости электрического поля  $\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0\right)$  направление вектора индукции  $\vec{B}$  образует правый винт с направлением вектора  $\vec{E}$ . При убывании напряжённости магнитного поля вектор магнитной индукции образует с направлением вектора  $\vec{E}$  левый винт.

Источником переменного магнитного поля служат ускоренно движущиеся заряды. Оно, в свою очередь, создаёт переменное электрическое поле, которое вызывает переменное магнитное поле. Эти порождающие друг друга переменные магнитные и электрические поля и представляют собой электромагнитное поле.

Таким образом, источником электромагнитного поля являются ускоренно движущиеся заряды.

Переменные электрическое и магнитное поля существуют в пространстве независимо от наличия в них проводников. Проводник, замкнутый на гальванометр, в опытах Фарадея по электромагнитной индукции явился лишь индикатором, с помощью которого было обнаружено переменное электрическое поле, индуцированное переменным магнитным полем.

Согласно законам Максвелла, переменное электрическое поле не может существовать без переменного магнитного, а переменное магнитное — без переменного электрического.

Электрическое поле может существовать без магнитного или магнитное без электрического лишь по отношению к определённой системе отсчёта. Так, покоящийся в данной системе отсчёта заряд создаёт только электрическое поле. Однако относительно любой другой движущейся (относительно данной) системы отсчёта он создаёт магнитное поле. То же самое можно сказать относительно неподвижного магнитного поля (например, постоянного магнита). Относительно движущегося к нему наблюдателя магнитное поле будет переменным и, следовательно, будет порождать вихревое электрическое поле.

Таким образом, электромагнитное поле — это единое целое: в зависимости от системы отсчёта проявляются те или иные свойства поля.

Теорию Максвелла по своей значимости можно сравнить с законами Ньютона.

Предсказания теории Максвелла в полной мере были подтверждены экспериментально и явились основой для всей современной электротехники и радиотехники.

## Электромагнитные волны

**Электромагнитные волны** — это электромагнитные колебания, которые распространяются в пространстве.

Существование электромагнитных волн было предсказано М. Фарадеем в 1832 г. Оно следует из теории электромагнитного поля Максвелла, который показал, что электромагнитные колебания распространяются в вакууме со скоростью света, равной  $3 \cdot 10^8$  м/с.

Электромагнитные колебания представляют собой колебания (периодические изменения абсолютных величин и направлений) вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$  во времени и пространстве.

На рис. 141 представлено распределение электрического и магнитного полей в пространстве в некоторый

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Как изменится ёмкостное сопротивление цепи переменного тока, если ёмкость конденсатора уменьшить в 2 раза, а частоту генерируемого тока уменьшить в 4 раза?
  - увеличится в 8 раз
  - уменьшится в 2 раза
  - увеличится в 4 раза
  - уменьшится в 2 раза
- Напряжение в сети изменяется по закону  $U = 310 \sin \omega t$ . Какое количество теплоты отдаёт в 1 мин электрическая плитка с активным сопротивлением 60 Ом, включённая в эту сеть?
  - 32 кДж
  - 48 кДж
  - 36 кДж
  - 44 кДж
- Каково индуктивное сопротивление катушки, если её индуктивность 2 Гн, а частота переменного тока 20 Гц?
  - 342,1 Ом
  - 251,2 Ом
  - 453,2 Ом
  - 156,4 Ом
- Определить период колебаний в колебательном контуре, излучающем электромагнитные волны длиной 600 м.
  - 6 мкс
  - 2 мкс
  - 18 мкс
  - 1 мкс
- Длина принятых радиоприёмником радиоволн равна 300 м. Найти индуктивность входного колебательного контура, если ёмкость контура равна 100 пФ?
  - 150 мкГн
  - 240 мкГн
  - 400 мкГн
  - 300 мкГн
- Радиоприёмник настроен на приём радиоволн длиной 15 м. Найти ёмкость конденсатора входного колебательного контура, если индуктивность равна 0,42 мкГн.
  - 125 пФ
  - 225 пФ
  - 250 пФ
  - 150 пФ

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36



момент времени для электромагнитной волны, движущейся в направлении оси  $Z$ . Как видно из рисунка (и это следует из теории Максвелла), электромагнитная волна — поперечная волна, т. е. колебания электрического и магнитного векторов поля перпендикулярны направлению распространения волны:  $\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$ , где  $\vec{v}$  — скорость волны.

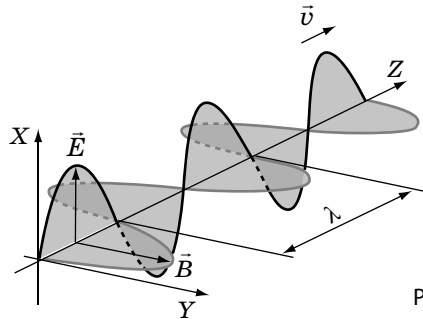


Рис. 141

Из теории Максвелла следует, что электромагнитная волна может порождаться периодически колеблющимися в проводнике электронами (ускоренно движущимися зарядами). Поскольку движущиеся с ускорением заряды создают электромагнитное поле, то, раз возникнув, это периодически меняющееся электромагнитное поле распространяется в пространстве (во все стороны от источника волн), создавая электромагнитную волну.

В 1888 г. немецкий физик Г. Герц своими опытами подтвердил теорию электромагнитных волн Максвелла. Ему удалось получить и зарегистрировать электромагнитные волны.

Также из теории Максвелла следует, что радиоволны, свет, рентгеновское излучение представляют собой электромагнитные волны с различными длинами волн, причём между соседними диапазонами длин волн нет чётких границ.

Длина световой волны (как и любых других волн) связана с частотой  $\nu$  и скоростью распространения  $v$  соотношением:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

Скорость света в вакууме (или в воздухе, поскольку они мало отличаются друг от друга) принято обозначать буквой  $c$ , тогда:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Скорость света в различных средах меньше скорости в вакууме и зависит от конкретного вещества. При переходе из одной среды в другую меняется также и длина волны. Частота колебаний (электрического вектора  $\vec{E}$ ) и период ( $T = 1/\nu$ ) остаются неизменными.

Электромагнитные волны, подобно всем другим видам волн, испытывают **отражение** и **преломление** на границе двух сред с разной диэлектрической проницаемостью, а также **поглощение**.

## Переменный ток

**Переменный ток** — это электрический ток, изменяющийся во времени.

К переменному току относят различные виды импульсных, пульсирующих, периодических и квазипериодических токов. В технике под переменным током обычно подразумеваются периодические или почти периодические токи переменного направления.

Наиболее часто используют периодический ток, сила которого меняется во времени по гармоническому закону (гармонический, или синусоидальный переменный ток). Это ток, применяемый на заводах и фабриках и в осветительной сети квартир. Он представляет собой *вынужденные электромагнитные колебания*. Частота промышленного переменного

тока составляет 50 Гц. Переменное напряжение в гнездах розеток осветительной сети создаётся генераторами на электростанциях. Простейшей моделью такого генератора является проводочная рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле (рис. 142). Поток магнитной индукции  $\Phi$ , пронизывающий проводочную рамку площадью  $S$ , пропорционален косинусу угла  $\alpha$  между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

При равномерном вращении рамки угол  $\alpha$  увеличивается пропорционально времени  $t$ :  $\alpha = 2\pi n t$ , где  $n$  — частота вращения. Поэтому поток магнитной индукции меняется гармонически с циклической частотой колебаний  $\omega = 2\pi n$ :

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в рамке равна:

$$\mathcal{E} = -\Phi' = -BS(\cos \omega t)' = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

где  $\mathcal{E}_m = BS\omega$  — амплитуда ЭДС индукции.

Таким образом, напряжение в сети переменного тока изменяется по синусоидальному (или косинусоидальному) закону:

$$u = U_m \sin \omega t \text{ (или } u = U_m \cos \omega t),$$

где  $u$  — мгновенное значение напряжения,  $U_m$  — амплитуда напряжения.

Сила тока в цепи будет изменяться с той же частотой, что и напряжение, но между ними возможен сдвиг фаз  $\varphi_c$ . Поэтому в общем случае мгновенное значение силы тока  $i$  определяется по формуле:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_c),$$

где  $I_m$  — амплитуда силы тока.

**Сила тока в цепи переменного тока с резистором.** Если электрическая цепь состоит из активного сопротивления  $R$  и проводов с пренебрежимо малой индуктивностью (рис. 143), а напряжение на зажимах меняется по гармоническому закону  $u = U_m \cos \omega t$ , то сила тока в нём, как и в случае с постоянным током, определяется по закону Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t.$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 144), а амплитуда силы тока определяется равенством:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

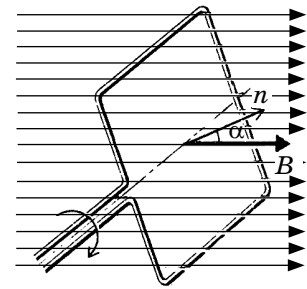


Рис. 142

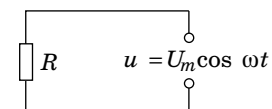


Рис. 143

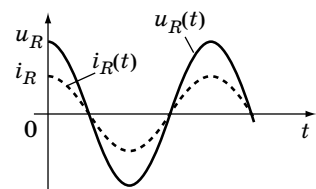


Рис. 144

## Эффективные (действующие) значения напряжения и силы тока

В цепи переменного тока его направление и амплитуда меняются с частотой 50 Гц. Однако выделяемая на нагрузке энергия зависит не от направления тока в цепи, а лишь от его абсолютного значения. Всегда можно подобрать такое значение силы постоянного тока, чтобы энергия, выделяемая за некоторое время этим током на участке цепи с сопротивлением  $R$ , равнялась энергии, выделяемой за то же время переменным током.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время. Оно определяется по формуле:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,71 I_m.$$

Действующее значение напряжения определяется аналогично:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,71 U_m.$$

Мощность, определяемая с использованием действующих значений силы тока и напряжения  $P = IU$ , равна средней мощности переменного тока при совпадении фаз колебаний тока и напряжения:

$$\overline{P} = \frac{I_m U_m}{2}.$$

Последнюю определяют усреднением мгновенной мощности за период колебаний:

$$\overline{P} = \overline{i u} = I_m U_m \overline{\cos^2(\omega t)}.$$

### Ёмкостное сопротивление

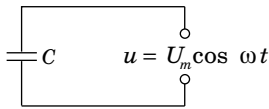


Рис. 145

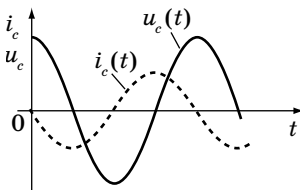


Рис. 146

**Ёмкостное сопротивление в цепи переменного тока** — это та часть сопротивления, которая создаётся конденсатором, включённым в цепь переменного тока (при пренебрежимо малой ёмкости подводящих проводов).

Для получения формулы ёмкостного сопротивления определим, как меняется сила тока в цепи, содержащей только конденсатор (рис. 145). Напряжение на обкладках конденсатора  $u = \varphi_1 - \varphi_2 = q / C$  равно напряжению на входе цепи, поэтому

$$q = C U_m \cos \omega t. \quad (3.23)$$

Для силы тока, которая определяется как производная заряда  $q$  по времени, из (3.23) получим:

$$i = C \omega U_m \cos(\omega t + \pi/2). \quad (3.24)$$

Между напряжением и силой тока в цепи с конденсатором наблюдается сдвиг фаз на  $\pi/2$  (см. (3.21)), причём ток опережает напряжение. Когда конденсатор разряжается (напряжение на нём равно нулю), ток максимален (рис. 146).

Амплитуда силы тока равна

$$I_m = U_m C \omega. \quad (3.25)$$

Величина

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.26)$$

называется **ёмкостным сопротивлением**. Если вместо амплитуд силы тока и напряжения в (3.25) использовать их действующие значения, то, учитывая (3.26), получим:

$$I = \frac{U}{X_C}.$$

Это означает, что действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе связаны так же, как и сила постоянного тока и напряжение согласно закону Ома, причём роль активного сопротивления  $R$  играет ёмкостное сопротивление  $X_C$ .

Чем больше ёмкость конденсатора и частота напряжения, тем меньше ёмкостное сопротивление и тем больше ток перезарядки.

Благодаря сдвигу фаз между током и напряжением в среднем за период не происходит ни накопления энергии на конденсаторе, ни её диссипации (рассеяния). За четверть периода, когда конденсатор заряжается до максимального значения, на нём происходит накопление энергии электрического поля; в следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

## Индуктивное сопротивление

**Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока** — это реактивная часть сопротивления, определяемая индуктивностью элементов цепи.

Считается, что элементы цепи, для которых средняя мощность переменного тока равна нулю, обладают реактивным сопротивлением (в отличие от обычного активного сопротивления  $R$ , на котором происходит выделение энергии).

Если пренебречь сопротивлением проводов, из которых сделана катушка индуктивности (соленоид), то сопротивление катушки будет только индуктивным.

Для определения формулы индуктивного сопротивления найдём ЭДС самоиндукции такой катушки в цепи переменного тока, меняющегося по гармоническому синусоидальному закону  $I = I_m \sin \omega t$  (рис. 147). ЭДС самоиндукции катушки  $\mathcal{E}_i$  равна по величине и противоположна по направлению напряжению  $u$  на её концах, взятому с обратным знаком:

$$\mathcal{E}_i = -Li' = -L \omega I_m \cos \omega t.$$

Учитывая, что  $u = -\mathcal{E}_i$ , из данного равенства получим:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2),$$

где  $U_m = L \omega I_m$  — амплитуда напряжения.

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на  $\pi/2$  (рис. 148). Вследствие этого в среднем за период не происходит ни накопления, ни диссипации энергии в катушке. Дважды за период энергия накачивается внутрь катушки (это энергия магнитного поля) и дважды возвращается обратно источнику. Амплитуда силы тока равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Величина  $\omega L = X_L$  и есть индуктивное сопротивление. Как и в случае с ёмкостным сопротивлением, индуктивное сопротивление  $X_L$ , действующее значение силы тока и действующее значение напряжения связаны соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока:

$$I = \frac{U}{X_L}.$$

Индуктивное сопротивление зависит от частоты. Чем больше частота, тем больше индуктивное сопротивление, тем меньше ток.

## Производство, передача и потребление электрической энергии

**Производство электроэнергии.** Электроэнергия производится на электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов. Два основных типа электростанций — тепловые (ТЭС) и гидроэлектрические (ГЭС) — различаются характером двигателей, вращающих роторы генераторов.

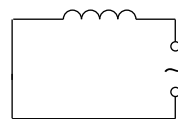


Рис. 147

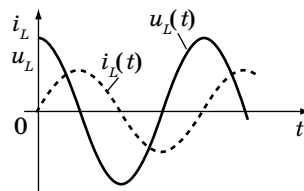


Рис. 148

На ТЭС источником энергии служит топливо: нефть, мазут, горючие сланцы, угольная пыль. Роторы электрогенераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Как известно, КПД тепловых двигателей увеличивается с ростом начальной температуры рабочего тела. Поэтому поступающий в турбину пар доводят до температуры порядка 550 °С при давлении около 25 МПа. КПД ТЭС достигает 40 %. Превращения энергии показаны на рис. 149.

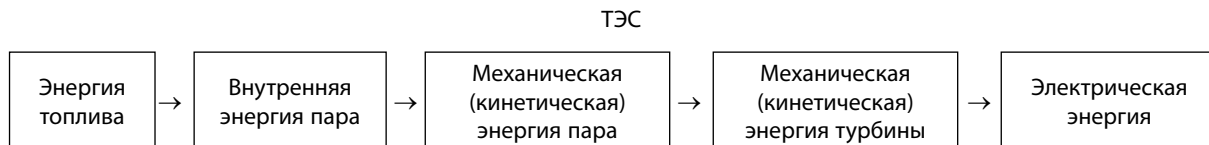


Рис. 149

На тепловых электростанциях (ТЭЦ) значительная часть энергии отработанного пара используется на промышленных предприятиях и для бытовых нужд. КПД ТЭЦ достигает 60–70 %.

На ГЭС для вращения роторов генераторов используется потенциальная энергия воды.

Часть электроэнергии, потребляемой в нашей стране (около 10 %), производится на атомных электростанциях (АЭС).

**Передача электроэнергии.** Как правило, этот процесс сопровождается заметными потерями, связанными с нагревом проводов линий электропередачи током. Согласно закону Джоуля – Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов, пропорциональна квадрату силы тока и сопротивлению линии, так что при большой длине линии передача электроэнергии может стать экономически невыгодной. Поэтому необходимо уменьшать силу тока, что при данной передаваемой мощности приводит к необходимости увеличения напряжения. Чем длиннее линия электропередачи, тем выгоднее использовать большие напряжения (на некоторых из них напряжение доходит до 500 кВ). Генераторы переменного тока, между тем, выдают напряжения, не превышающие 20 кВ (что связано со свойствами используемых изоляционных материалов).

Поэтому на электростанциях ставят повышающие трансформаторы, увеличивающие напряжение и во столько же раз уменьшающие силу тока. Для подачи потребителю электроэнергии нужного (низкого) напряжения на концах линии электропередачи ставят понижающие трансформаторы. Понижение напряжения обычно осуществляется поэтапно (рис. 150).

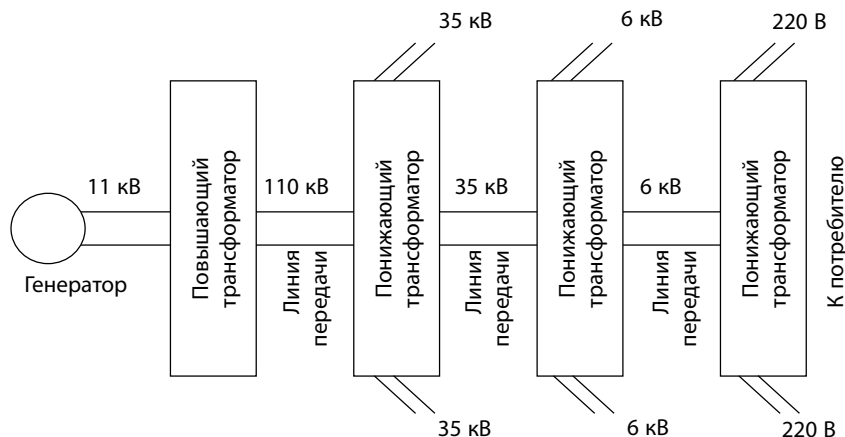


Рис. 150

**Использование электроэнергии.** Основными потребителями электроэнергии являются:

- 1) промышленность — 70%;
- 2) транспорт (электрическая тяга);
- 3) бытовые потребители (освещение жилищ, электроприборы).

Большая часть используемой электроэнергии превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электродвигателями.

Около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для технологических целей (электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т. д.).

## Трансформатор

**Трансформатор** (от лат. *transformare* — превращать, преобразовывать) — устройство для преобразования напряжения переменного тока, состоящее из двух катушек (обмоток) на общем ферромагнитном сердечнике.

Отношение количества витков в обмотках называется *коэффициентом трансформации*:

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

Сердечник концентрирует магнитное поле так, что все витки первичной и вторичной обмоток пронизываются практически одинаковым переменным магнитным потоком, соответственно, в каждом витке наводится одинаковая ЭДС индукции:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k.$$

Если  $k > 1$  — трансформатор *понижающий*, при  $k < 1$  — трансформатор *повышающий*.

Трансформаторы используются для повышения напряжения при передаче электроэнергии по линиям электропередач и для понижения напряжения при распределении электроэнергии потребителям.

## Различные виды электромагнитных излучений и их практическое применение

**Электромагнитное излучение** — это, во-первых, процесс образования свободного электромагнитного поля при неравномерном движении и взаимодействии электрических зарядов; во-вторых, это свободное электромагнитное поле (электромагнитные волны).

Существование поля излучения (т.е. электромагнитной волны) является следствием того, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме  $c$  конечна:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с (т.е. того, что верна теория близкогодействия, а не дальнегодействия). Изменение движения заряда изменяет поле на расстоянии  $r$  от него только через промежуток времени  $r/c$ . Поэтому даже если убрать источник излучения, поле продолжает существовать, а это означает, что электромагнитное поле обладает импульсом и энергией.

*Плотностью потока электромагнитного излучения*  $I$  называют отношение электромагнитной энергии  $\Delta W$ , проходящей за единицу времени  $\Delta t$  через единицу площади  $S$  поверхности, перпендикулярной лучу:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Другими словами, это мощность электромагнитного излучения на единицу площади. Плотность потока электромагнитного излучения измеряется в *ваттах на квадратный метр* (Вт/м<sup>2</sup>).

Легко показать, что плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии  $w$  (энергия в единице объёма) на скорость её распространения:  $I = wc$ .

Точечным источником излучения называется источник, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Это идеализация, подобная материальной точке. Хорошим приближением к точечному источнику являются звёзды.

Если поместить точечный источник в центр сферы радиусом  $R$ , то становится понятно, что плотность потока излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}.$$

Можно показать, что плотность потока излучения пропорциональна четвёртой степени частоты:

$$I \sim \omega^4. \quad (3.27)$$

Это следует из того, что напряжённость электромагнитного поля и магнитная индукция пропорциональны ускорению  $a$  излучающих частиц, которое, в свою очередь, пропорционально квадрату частоты:  $E \sim a \sim \omega^2$ ,  $B \sim a \sim \omega^2$ . Полная плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей:  $I \sim w \sim (E^2 + B^2)$ , откуда следует формула (3.27).

Таким образом, из вышеизложенного следует, что:

- 1) электромагнитное поле переносит энергию;
- 2) плотность потока излучения (интенсивность электромагнитной волны) равна произведению плотности энергии на скорость её распространения;
- 3) интенсивность волны пропорциональна четвёртой степени частоты и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

### Виды излучений

К **оптическому** излучению относятся электромагнитные волны, длины которых заключены в диапазоне с условными границами от нескольких нанометров до десятых долей миллиметра (диапазон частот  $\sim 3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{16}$  Гц).

К оптическому излучению помимо воспринимаемого глазом **видимого излучения** (обычно называемого светом), относятся **инфракрасное излучение** (диапазон частот —  $3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{14}$  Гц, диапазон длин волн 1 мм ... 0,8 мкм) и **ультрафиолетовое излучение** (диапазон частот  $3 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$  Гц, диапазон длин волн 380 нм ... 10 нм).

Все перечисленные ниже виды излучений объединяет следующее: электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц, входящих в состав атома, — электронов и ионов. Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать энергию, или возбудить. Излучая, атом теряет полученную энергию, а для непрерывного свечения вещества необходим приток энергии извне. Тепловое излучение — наиболее простой и распространённый вид излучения, при котором потеря атомами энергии на излучение света компенсируется за счёт энергии теплового движения атомов или молекул излучающего тела. Чем выше температура тела, тем больше кинетическая энергия его атомов или молекул, тем интенсивнее свечение тела.

Естественными тепловыми источниками света являются Солнце и звёзды. К искусственным тепловым источникам света относятся те приборы, в основе которых лежит излучение, вызванное нагревом рабочего тела, например электрические лампочки (нагрев спирали), пламя газовой горелки, свечи.

**Люминесценция** — это излучение, избыточное над тепловым излучением тела и по длительности значительно превышающее период световых колебаний. Другими словами, если нераскалённое тело, скажем, при комнатной температуре светится, это свечение называется люминесценцией. Причины, вызывающие такое свечение, могут быть разными — от

облучения ультрафиолетовым излучением, электронами, рентгеновскими лучами до механических воздействий (трение) или воздействия электрическим полем. Рассмотрим некоторые виды люминесценции.

**Фотолюминесценция** — свечение тел, вызванное облучением светом, как правило, ультрафиолетовыми лучами. Квант света поглощается атомом, переводит его на возбуждённый уровень. Через некоторое время атом возвращается на основной уровень, излучая квант света. Излучаемый при фотолюминесценции свет, как правило, имеет большую длину волны, чем возбуждающий фотолюминесценцию.

Явление фотолюминесценции плодотворно исследовалось советским физиком С. И. Вавиловым.

Это явление широко используется в осветительной технике, например, в люминесцентных и газосветных лампах.

**Катодолюминесценция** — это свечение твёрдых тел, вызванное бомбардировкой их электронами. Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизоров.

**Хемилюминесценция** — свечение, являющееся результатом возбуждения атомов или молекул энергией, выделяющейся при химических реакциях. Источник света остаётся холодным.

**Электролюминесценция** — свечение тела, вызванное электрическим разрядом. Например, при разряде в газах электроны получают большую кинетическую энергию. При столкновении с атомами газа они отдают часть своей кинетической энергии на возбуждение атомов газа, которые излучают её в виде световых волн.

Северное сияние — это проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Эти заряженные частицы возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоёв атмосферы, благодаря чему эти слои светятся. Электролюминесценция используется в неоновых лампах.

**Рентгеновское излучение** возникает в диапазоне  $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$  Гц ( $\lambda = 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-8}$  м).

Рентгеновское излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном. Изучая ускоренное движение заряженных частиц в закрытой чёрным картоном разрядной трубке, Рентген обнаружил свечение экрана, покрытого солью бария, находящегося на некотором расстоянии от трубки. Излучение высокой проникающей способности, испускаемое заряженными частицами в трубке, Рентген назвал X-лучами. *Источником рентгеновского излучения является изменение состояния электронов внутренних оболочек атомов или молекул, а также ускоренно движущиеся свободные электроны.* Подобно видимому свету, оставляющему тень за непрозрачными предметами, рентгеновское излучение (как его стали называть впоследствии) тоже оставляло такие тени. Однако проникающая способность этого излучения была столь велика, что Рентген мог рассматривать скелет собственной руки на экране. Рентгеновские лучи могут проникать через толстую книгу, деревянную доску толщиной несколько сантиметров, металлическую пластинку толщиной около сантиметра.

**Дифракция рентгеновских лучей.** Для доказательства волновой природы рентгеновских лучей немецкий физик Макс Лауэ направил узкий пучок этих лучей на кристалл, за которым была расположена фотопластинка. Целью эксперимента было наблюдение дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решётке, период которой — расстояние между атомами — составляет порядка  $10^{-8}$  см. Опыт блестяще удался. На рис. 151 представлена полученная картина дифракции — *лауэграмма*. Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли небольшие регулярно расположенные пятнышки

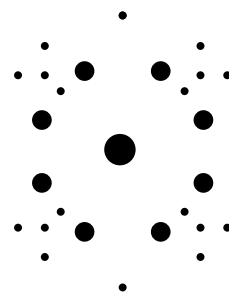


Рис. 151



вокруг центрального пятна, появление которых можно объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

Рентгеновское излучение применяется в рентгеноструктурном анализе (исследование структуры кристаллической решётки), при изучении структуры молекул, при обнаружении дефектов в образцах, в медицине, криминалистике.

Большая доза рентгеновского облучения приводит к ожогам и изменению структуры крови.

Создание приёмников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволило обнаружить излучение сотен звезд, а также оболочек сверхновых звезд и целых галактик.

## Применение радиоволн

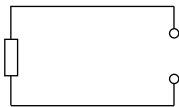


**Принципы радиосвязи.** Передача информации на расстоянии с помощью электромагнитных сигналов в случае радиотрансляционной, телеграфной, телефонной связи часто осуществляется по проводам. Это обеспечивает качество информации и энергетически выгодно, но не всегда возможно. Для информационного обмена между космическими и военными объектами единственно возможной является радиосвязь.

**Радиосвязь** — это передача и приём информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется *радиопередатчик*, излучающий радиоволны, переносящие кодированную информацию, и *радиоприёмник*, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) излучаемый передатчиком сигнал. Дополнительно используются ретрансляторы, которые улавливают радиосигнал и переизлучают его с большей мощностью (это необходимо при слабой мощности излучаемого сигнала и для УКВ-излучения или телевидения).

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

♦ Заполните таблицу «Закон Ома для энергетических цепей переменного тока».

Вид сопротивления	Схема	Напряжение	Ток	Сопротивление
Активное		$U =$	$I =$	$R =$
Индуктивное		$U =$	$I =$	$X_L =$
Ёмкостное		$U =$	$I =$	$X_C =$

♦ Заполните схему.



Ответы на тестовые задания (неделя 29)

1 — 1. 2 — 2. 3 — 2. 4 — 2. 5 — 2. 6 — 4

- 3.6. Оптика
  - 3.6.1. Прямолинейное распространение света
  - 3.6.2. Закон отражения света
  - 3.6.3. Построение изображений в плоском зеркале
  - 3.6.4. Закон преломления света
  - 3.6.5. Полное внутреннее отражение
- 

## ОПТИКА

**Оптика** — это раздел физики, изучающий законы излучения, распространения света и взаимодействия с веществом.

Практическое применение результатов исследований всех разделов оптики огромно. Пожалуй, нет отрасли науки или народного хозяйства, в которой не использовались бы достижения оптики или оптические методы исследования — от освещения улиц до новых систем хранения и записи информации для нужд вычислительной техники, до слежения за искусственными спутниками Земли и использования линий лазерной оптической связи для ведения телефонных переговоров и передачи изображений.

### Прямолинейное распространение света в однородной среде

#### Геометрическая оптика

Геометрическая оптика — это раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных веществах (средах) и построения изображений предметов с помощью оптических систем, в которые входят зеркала, линзы, призмы и другие оптические элементы.

Геометрическая оптика основывается на следующих основных законах, установленных опытным путём ещё в глубокой древности:

- 1) закон прямолинейного распространения света;
- 2) закон отражения света от зеркальной поверхности;
- 3) закон преломления света на границе двух прозрачных сред;
- 4) закон независимости световых пучков или световых лучей.

Законы геометрической оптики используются для расчёта оптических систем, например, микроскопов, телескопов, больших зеркал и объективов, используемых в астрономии, фотоаппаратах и др.

#### Скорость света и её измерение

Скорость света в свободном пространстве (вакууме) — это скорость распространения любых электромагнитных волн, в том числе световых. Это одна из фундаментальных физических постоянных. Скорость света представляет собой предельную скорость, с которой

распространяются любые физические воздействия; она инвариантна при переходе от одной системы отсчёта к другой.

Скорость света в среде  $c'$  зависит от показателя преломления среды  $n$ , различного для разных частот  $\nu$  излучения:

$$c'(\nu) = c/n(\nu).$$

В 1849 г. А. И. Л. Физо первым измерил скорость света по времени прохождения светом точно известного расстояния (базы). Поскольку показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы, то измерения в атмосфере Земли дают величину, весьма близкую к  $c$ . В опыте Физо пучок света от источника, отражённый полупрозрачным зеркалом, периодически прерывался вращающимся зубчатым диском, затем проходил расстояние в 8,6 км (базу) до зеркала и, отразившись от него, возвращался к диску (рис. 152). Попадая на зубец, свет не достигал глаза наблюдателя проходящий между зубцами свет можно было наблюдать. По известным скоростям вращения диска определялось время прохождения светом базы. Физо получил значение  $c = 313\,300$  км/с.

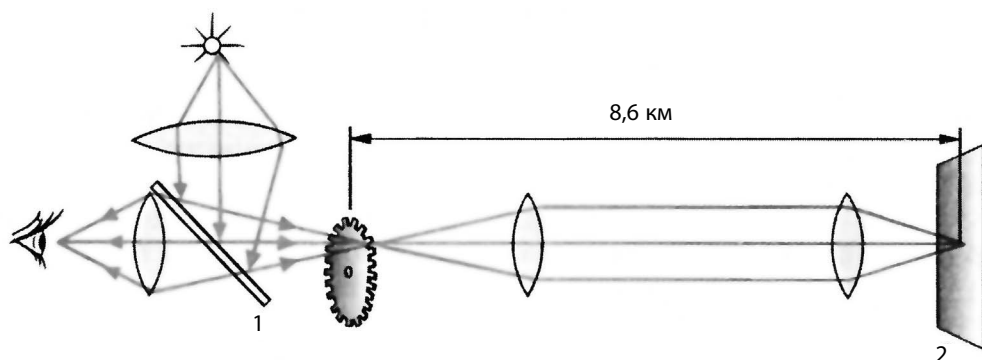


Рис. 152

Было разработано ещё много других, более точных методов измерения скорости света. Так, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость света в различных прозрачных веществах. Во всех веществах она меньше, чем в вакууме. В 1856 г. была определена скорость света в воде, она оказалась в  $4/3$  раза меньше, чем  $c$ .

По современным данным, скорость света в вакууме равна  $299\,792\,458 \pm 1,2$  м/с.

Определение скорости света с большой точностью важно не только из теоретических соображений и для определения других физических величин, но и в практическом смысле. Например, оно необходимо для точного определения расстояний в радиолокации, оптической локации, в системах слежения искусственных спутников Земли и др.

## Световой луч

**Световой луч** обозначает линию, вдоль которой распространяется поток энергии волны, испущенный в определённом направлении источником света.

В однородной среде луч — прямая линия. При переходе через границу, разделяющую две среды с разными показателями преломления, луч преломляется согласно закону преломления Снелля.

Под *световым лучом* в оптике понимают достаточно узкий пучок света, который на всем пути его распространения, подлежащем изучению, можно считать нерасходящимся.

Термин «луч» употребляется также для обозначения узкого пучка частиц (например, электронный луч).

**Распространение света в однородной среде.** Одним из первых и основных законов геометрической оптики является закон прямолинейного распространения света:

**В однородной среде свет распространяется прямолинейно.**

Этот закон был известен ещё Евклиду за 300 лет до н.э.

**Тень.** Одним из доказательств прямолинейного распространения света является образование тени при освещении предмета точечным источником света (рис. 153, а). Если бы лучи распространялись не прямолинейно, а, скажем, огибали бы предмет, тень могла бы не образоваться.

**Полутень.** Благодаря все тому же прямолинейному распространению света от источника больших размеров (сравнимых с размерами предмета и расстоянием до него и до экрана) образуются тень и полутень (рис. 153, б). Тень (чёрный круг на рис. 153, б) образуется в том месте на экране Э, куда не доходят лучи ни от одной из точек источника. Полутень (серый круг на рис. 153, б) образуется в местах, куда доходят лучи только от некоторых точек источника (протяжённый источник света всегда можно представить себе состоящим из множества точечных источников).

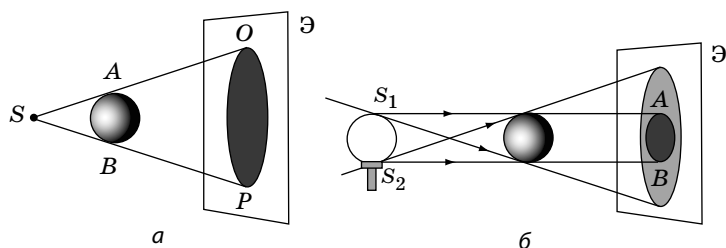


Рис. 153

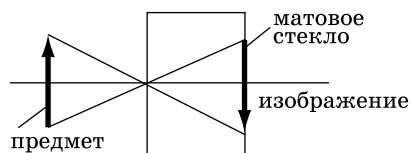


Рис. 154

Доказательством прямолинейного распространения света является также получение чётких изображений предмета при помощи маленьких отверстий в камере-обскуре, в которой (перевернутое) изображение предмета на задней стенке камеры получается проектированием предмета при помощи *прямолинейных лучей* (рис. 154).

В природе демонстрацией прямолинейного распространения света являются лунные и солнечные затмения. Они наступают тогда, когда Луна, Земля и Солнце лежат на одной линии и Луна попадает в тень, отбрасываемую Землёй (лунное затмение), или Луна заслоняет собой на несколько минут Солнце.

## Закон отражения света

### Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса — Френеля

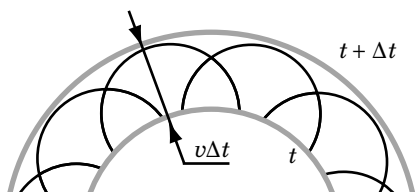


Рис. 155

**Принцип Гюйгенса.** Согласно принципу Гюйгенса каждая точка среды, до которой дошло световое возмущение, является, в свою очередь, центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.

Для того чтобы, зная положение волновой поверхности в момент времени  $t$ , найти её положение в следующий момент времени  $t + \Delta t$ , нужно каждую точку

волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 155). Этот принцип справедлив для распространения волн любой природы, хотя Гюйгенсом он был сформулирован именно для световых волн.

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

**Принцип Гюйгенса – Френеля** — основной постулат волновой теории, описывающий и объясняющий механизм распространения волн, в частности световых.

Принцип Гюйгенса – Френеля является развитием принципа, который ввёл современник Ньютона Х. Гюйгенс в 1678 г.

О. Френель объединил принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля, волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света сферической поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

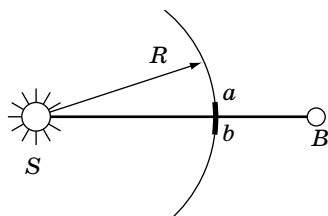


Рис. 156

Такого рода расчёты показали, что результат интерференции вторичных волн в точке B от источников, расположенных на сферической поверхности радиусом R (рис. 156), оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте ab посылали свет в точку B. Вторичные волны, испускаемые источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому всё происходит так, как если бы свет распространялся лишь вдоль прямой SB, то есть прямолинейно.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

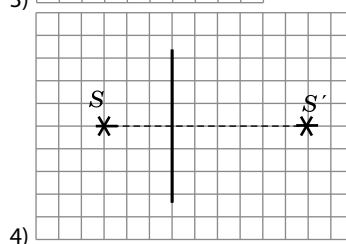
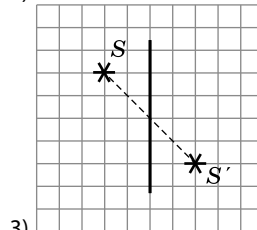
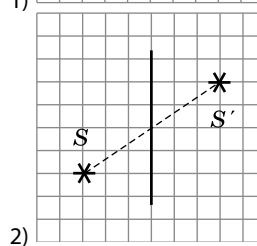
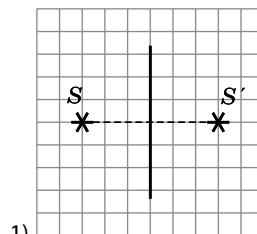
1. Длина тени дерева, освещённого солнцем, в некоторый момент времени оказалась равной 30 см; длина тени от человека высотой 180 см в тот же момент времени была 4,5 см. Какова высота дерева?

1) 14 м                      3) 12 м  
2) 15 м                      4) 9 м

2. Зимой в полдень угловая высота Солнца над горизонтом равна  $16,5^\circ$ . Какой будет в этот момент длина тени от вертикального столба высотой 2 м?

1) 2 м                      3) 6 м  
2) 5 м                      4) 7 м

3. На каком из рисунков изображение точки в плоском зеркале построено правильно?



ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

4. Предмет находится на расстоянии 30 см от плоского зеркала. На каком расстоянии от предмета окажется его изображение, если предмет передвинуть от зеркала ещё на 10 см?
  - 1) 20 см
  - 2) 40 см
  - 3) 60 см
  - 4) 80 см
5. Узкий пучок света переходит из воздуха в некоторую жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если угол падения  $60^\circ$ , а угол преломления  $30^\circ$ .
  - 1) 1,3
  - 2) 1,5
  - 3) 1,7
  - 4) 1,2
6. Какова скорость распространения света в стекле с показателем преломления  $n = 1,7$ ?
  - 1)  $1,76 \cdot 10^8$  м/с
  - 3)  $3 \cdot 10^8$  м/с
  - 2)  $2,63 \cdot 10^8$  м/с
  - 4)  $4,1 \cdot 10^8$  м/с

ДЛЯ ЗАМЕТОК

## Отражение света. Закон отражения света

Большинство окружающих нас предметов видимы глазу не потому, что излучают свет, а потому, что отражают его.

**Закон отражения света.** Пусть на зеркальную поверхность  $MN$  (рис. 157) падает луч света  $A_1A$ . Луч  $A_1A$  называется **падающим лучом**, точка  $A$  пересечения этого луча с поверхностью называется **точкой падения**. Восстановим из точки  $A$  перпендикуляр  $AE$  к поверхности  $MN$ . Угол  $\alpha$  между падающим лучом и перпендикуляром называется **углом падения**. Пусть луч  $A_1A$ , отразившись от поверхности, распространяется в направлении  $AA_2$  под некоторым углом  $\gamma$ . Луч  $AA_2$  называется **отражённым лучом**, а угол  $\gamma$  — **углом отражения**. Плоскость, в которой лежат луч  $A_1A$  и перпендикуляр  $AE$ , называется **плоскостью падения**.

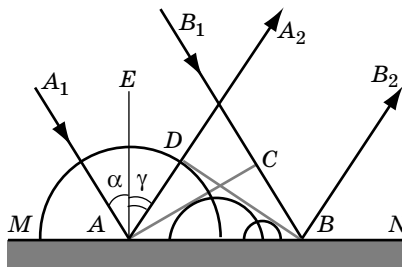


Рис. 157

Закон отражения света гласит:

1. **Отражённый луч лежит в плоскости падения.**
2. **Угол падения равен углу отражения ( $\alpha = \gamma$ ).**

**Обратимость направления световых лучей.** Если падающий луч на рис. 157 направить вдоль  $A_2A$ , то он отразится вдоль направления  $AA_1$ . В этом заключается принцип обратимости хода лучей света. Он также является одним из основных положений геометрической оптики и используется при построении оптических изображений.

Закон отражения можно вывести с помощью принципа Гюйгенса.

Пусть плоская волна, обозначенная лучами  $A_1A$  и  $B_1B$  и плоской волновой поверхностью  $AC$ , падает на зеркальную плоскость  $MN$  под некоторым углом  $\alpha$  (рис. 157). Различные участки волновой поверхности  $AC$  достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке  $A$  начнётся на время  $\Delta t = CB/v$  (где  $v$  — скорость волны) раньше, чем в точке  $B$ .

В момент, когда волна достигнет точки  $B$  и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке  $A$  будет представлять собой полусферу радиусом  $r = AD = v\Delta t = CB$ . Изменение радиусов вторичных волн от точек, лежащих между точками  $A$  и  $B$ , показано на рис. 157. Плоскость  $DB$  — огибающая вторичных волн, касательная к сферическим поверхностям.  $DB$  — волновая поверхность отражённой волны. Отражённые лучи  $AA_2$  и  $BB_2$  перпендикулярны волновой поверхности  $DB$ ;  $\gamma$  — угол отражения.

Так как  $AD = CB$  и треугольники  $ADB$  и  $ACB$  прямоугольные, то  $\angle DBA = \angle CAB$ . Но  $\alpha = \angle CAB$  и  $\gamma = \angle DBA$  как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \gamma.$$

Кроме того, из построения Гюйгенса вытекает, что падающий луч, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости, что и требовалось доказать.

## Построение изображений в плоском зеркале

### Оптическое изображение

**Оптическое изображение** — это картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему лучей, распространяющихся от объекта, и воспроизводящая его контуры и детали.

Под *оптической системой* понимают совокупность оптических деталей — линз, призм, зеркал, плоскопараллельных пластинок, скомбинированных определённым образом для получения оптического изображения или для преобразования светового потока, идущего от источника света.

*Оптический объект* (предмет, который мы хотим изобразить с помощью оптической системы) представляет собой совокупность точек, светящихся собственным светом (т.е. излучающих) либо отражённым светом.

Для того чтобы изображение максимально соответствовало объекту (было качественным), необходимо, чтобы лучи света, исходящие из какой-либо точки объекта, после преломлений и отражений в оптической системе вновь сходились в одной точке, которая и является изображением точки объекта. Это возможно лишь тогда, когда точка объекта находится на небольшом расстоянии от оси оптической системы, например линзы, так, что лучи, исходящие из предмета и участвующие в его изображении, находятся в так называемой *параксиальной* (приосевой) *области* оптической системы. Оптическая система, в которой точка изображается точкой, т.е. без искажений, и все пропорции предмета передаются правильно, называется *идеальной оптической системой*.

Применение законов геометрической оптики даёт возможность получить изображение любой точки, находящейся в параксиальной области, без искажений.

Оптические изображения делятся на *действительные* и *мнимые*.

Под **действительным изображением** понимают такое, которое получается в результате пересечения реальных (действительных) лучей, вышедших из оптической системы (т.е. сходящихся лучей, пересекающихся в точке изображения). Примером такого изображения является изображение, получающееся на фотопленке.

**Мнимым изображением** называется изображение, получающееся в результате воображаемого пересечения расходящихся лучей, вышедших из оптической системы. Такое изображение нельзя получить на экране либо фотопленке. Глаз тем не менее увидит его в месте



мнимого пересечения лучей. Мнимое изображение может служить источником света для дальнейшего построения действительного изображения другой оптической системой, которое затем можно зафиксировать, например, на фотоплёнке.

Примером мнимого изображения является всем знакомое изображение предметов в зеркале.

### Построение изображения в плоском зеркале

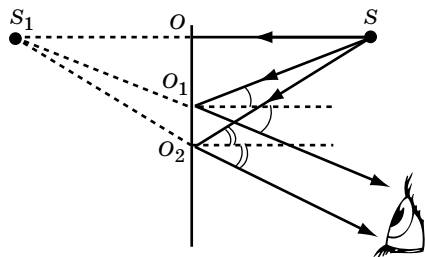


Рис. 158

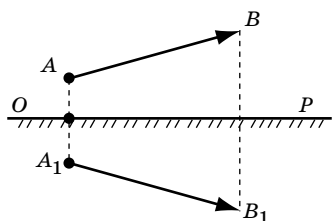


Рис. 159

Пусть на плоское зеркало падает пучок лучей  $SO$ ,  $SO_1$ ,  $SO_2$  из точечного источника  $S$  (рис. 158). После отражения в зеркале в глаз человека попадает расходящийся пучок лучей. Если теперь продолжить каждый из отражённых лучей за зеркало, то они пересекутся в одной точке  $S_1$ , которая и является мнимым изображением точки  $S$ . То, что лучи действительно пересекутся в одной точке, легко доказать, используя закон отражения света и теоремы геометрии, как и то, что  $S_1O = SO$ ,  $S_1O_1 = SO_1$ ,  $S_1O_2 = SO_2$ .

Отсюда следует, что правила построения предмета в зеркале сводятся к следующему (рис. 159): из точки  $A$  предмета (в данном случае это стрелка  $AB$ ) опускают перпендикуляр на плоскость зеркала; на продолжении этого перпендикуляра за зеркалом на таком же расстоянии откладывают точку  $A_1$ ; точно так же поступают с точкой  $B$ . Затем соединяют точки  $A_1$  и  $B_1$ . Стрелка  $A_1B_1$  и будет мнимым изображением стрелки  $AB$ .

Из вышеизложенного следует, что **изображение предмета в плоском зеркале симметрично предмету относительно плоскости зеркала**. Последнее означает, что оно является мнимым, прямым (т.е. не перевернутым), равным по размеру самому предмету и находится на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним.

### Закон преломления света

**Преломление света** — это изменение направления распространения светового луча при его прохождении через границу раздела двух прозрачных сред.

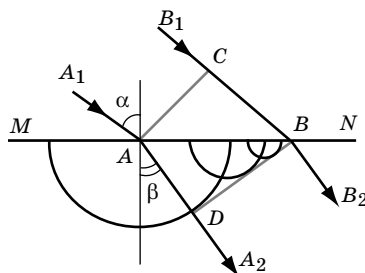


Рис. 160

На рис. 160 показаны: луч  $A_1A$ , падающий на границу раздела  $MN$  двух однородных сред; преломлённый луч  $AA_2$ ; перпендикуляр к плоскости раздела, проходящий через *точку падения луча*  $A$ .

Угол  $\alpha$  называется *углом падения*, угол  $\beta$  — *углом преломления*.

Преломление света подчиняется определённым законам.

1. Луч падающий и луч преломлённый лежат в одной плоскости с нормалью, проведённой к границе раздела двух сред в точке падения луча. Плоскость эта называется *плоскостью падения*.

2. Угол падения и угол преломления связаны соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (3.28)$$

где  $n$  — постоянная, не зависящая от углов  $\alpha$  и  $\beta$ .

Величина  $n$  называется **показателем преломления** и зависит лишь от свойств обеих сред, через границу раздела которых проходит свет.

Закон преломления, выраженный соотношением (3.28), называется **законом Снелля** (Снеллиуса).

Закон преломления света выводится с помощью принципа Гюйгенса. Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в этих средах. Пусть плоская волна, обозначенная лучами  $A_1A$  и  $B_1B$  и плоской волновой поверхностью  $AC$ , падает на зеркальную плоскость  $MN$  под некоторым углом  $\alpha$  (рис. 160). Различные участки волновой поверхности  $AC$  достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке  $A$  начнётся на время  $\Delta t = CB/v_1$  (где  $v_1$  — скорость волны в первой среде) раньше, чем в точке  $B$ . В момент времени, когда вторичная волна в точке  $B$  только начнёт возбуждаться, волна от точки  $A$  во второй среде уже имеет вид полусферы радиусом  $AD = v_2 \cdot \Delta t$ , где  $v_2$  — скорость света во второй среде. Волновая поверхность преломлённой волны (от центров, лежащих на границе раздела двух сред) в этот момент времени представлена плоскостью  $BD$  — касательной к волновым поверхностям всех вторичных волн во второй среде.

Угол падения  $\alpha$  луча равен  $\angle CAB$  в треугольнике  $ABC$  (стороны одного угла перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (3.29)$$

Угол преломления  $\beta$  равен углу  $ABD$  треугольника  $ABD$ . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (3.30)$$

Разделив почленно (3.29) на (3.30), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (3.31)$$

где  $n$  — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Из построения (рис. 160) видно, что луч падающий и луч преломлённый лежат в одной плоскости с нормалью, проведённой к границе раздела двух сред в точке падения луча. Это утверждение вместе с выражением (3.31) представляет собой закон преломления света.

Таким образом, из принципа Гюйгенса не только выводится закон преломления света, но и раскрывается физический смысл показателя преломления: он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление (см. (3.31)).

## Абсолютный и относительный показатели преломления

**Показатель преломления (коэффициент преломления)** — это оптическая характеристика среды, связанная с преломлением света на границе раздела двух прозрачных, оптически однородных и изотропных сред при переходе из одной среды в другую и связанная с различием скоростей распространения света  $v_1$  и  $v_2$  в этих средах.

Величина показателя преломления, равная отношению этих скоростей  $n_{21} = v_1/v_2$ , называется **относительным показателем преломления**. Если свет падает на первую или

вторую среду из вакуума, где скорость распространения света равна  $c$ , то показатель преломления называется **абсолютным показателем преломления** и равен  $n_1 = c/v_1$  или  $n_2 = c/v_2$  соответственно. Относительный показатель преломления при переходе из первой среды во вторую связан с абсолютными показателями преломления этих сред соотношением:  $n_{21} = n_2/n_1$ , и закон преломления  $\sin \alpha / \sin \beta = n$  может быть записан в виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — углы падения и преломления соответственно.

Среда, в которой **скорость света больше**, называется **оптически менее плотной**. Таким образом, при переходе из оптически менее плотной среды в оптически более плотную  $n > 1$ , т. е. угол преломления меньше угла падения, и наоборот.

Абсолютный показатель преломления зависит от природы и строения вещества, его агрегатного состояния, температуры, давления, наличия в нём упругих напряжений. Показатель преломления данной среды зависит от длины волны света. Для большинства прозрачных жидкостей и твёрдых тел показатель преломления в видимой области в среднем равен 1,5.

Абсолютный показатель преломления воздуха для жёлтого света при нормальных условиях равен  $\sim 1,000292$ . Поэтому показатели преломления различных веществ рассматривают относительно воздуха.

## Полное внутреннее отражение

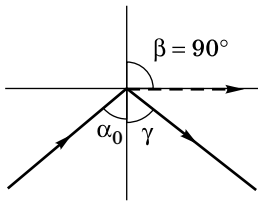


Рис. 161

Если пучок света переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (например, вакуум), то с увеличением угла падения  $\alpha$  возрастает угол преломления  $\beta$  ( $\beta > \alpha$ ) и интенсивность преломлённого света. При некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигает своего максимального значения  $\beta_{\max} = 90^\circ$  (рис. 161). В соответствии с законом преломления света

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \quad \alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right),$$

где  $n$  — абсолютный показатель преломления среды. При угле падения  $\alpha > \alpha_0$  свет полностью отражается от границы раздела, как от зеркала — возникает явление *полного внутреннего отражения*.

Минимальный угол падения ( $\alpha_0$ ), начиная с которого возникает явление *полного внутреннего отражения*, называется *углом полного внутреннего отражения*, или *критическим углом*, или *предельным углом*.

Для общего случая, когда вторая среда — не вакуум, критический угол  $\alpha_0$  определяется из условия:  $\sin \alpha_0 = n_{21} = n_2/n_1$ , где  $n_{21}$  — относительный показатель преломления двух сред ( $n_1 > n_2$ ;  $n_1, n_2$  — абсолютные показатели преломления первой и второй сред соответственно).

---

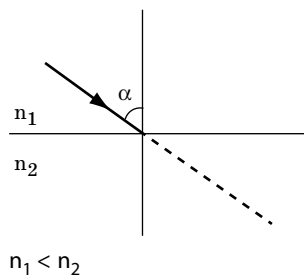
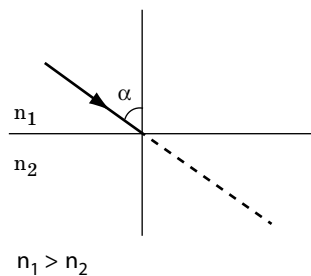
## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

- ♦ Заполните пропуски в выражении для предельного угла полного отражения.

$$\alpha_0 = \arcsin \text{ ————— } .$$

- ♦ Нарисуйте, как пойдёт преломлённый луч при переходе из одной среды в другую.



- ♦ Запишите положения закона отражения.

1. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
2. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Ответы на тестовые задания (неделя 30) \_\_\_\_\_

1 — 3. 2 — 4. 3 — 1. 4 — 4. 5 — 3. 6 — 1.

# НЕДЕЛЯ 31

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

3.6. Оптика

3.6.6. Линзы. Оптическая сила линзы

3.6.7. Формула тонкой линзы

3.6.8. Построение изображений в линзах

3.6.9. Оптические приборы. Глаз как оптическая система

## Линзы. Фокусное расстояние и оптическая сила линзы

**Линза** (нем. *linse* от лат. *lens* — чечевица) — это простейший оптический элемент, ограниченный с двух сторон сферическими поверхностями.

Обычно линзы изготавливаются из оптического стекла (стекло специального изготовления с минимальным количеством дефектов: пузырьков воздуха, включений посторонних микрочастиц).

Линзы бывают **выпуклые** и **вогнутые**. У выпуклых линз середина толще, чем края, у вогнутых — наоборот. В свою очередь, выпуклые линзы делятся на двояковыпуклые, плосковыпуклые и вогнуто-выпуклые (рис. 162, а). Вогнутые линзы делятся на двояковогнутые, плосковогнутые и выпукло-вогнутые (рис. 162, б). На рисунках 162, а, б рядом с изображениями линз (справа) даны их условные обозначения на оптических схемах.

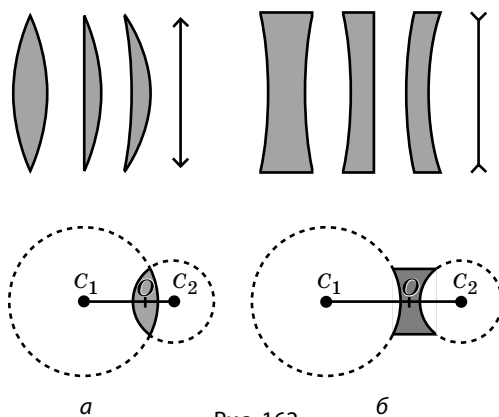


Рис. 162

**Тонкая линза.** Если толщина линзы пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны её поверхностей (см. нижние части рис. 162, а, б) и расстоянием от предмета до линзы, её называют **тонкой линзой**. Вершины сферических сегментов тонкой линзы расположены так близко, что их принимают за одну точку, называемую **центром линзы**, и обозначают буквой *O*. Луч света, проходящий через оптический центр линзы, практически не преломляется.

Прямая  $C_1C_2$ , проходящая через центры сферических поверхностей *O* (рис. 162), ограничивающих линзу, называется **главной оптической осью линзы**. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют **побочной оптической осью**.

## Фокусы линзы

**Выпуклая (положительная, или собирающая) линза.** Если на выпуклую линзу направить пучок света параллельно её главной оптической оси, то после преломления в линзе он соберётся в некоторой точке  $F$  на оси линзы, которая называется **главным фокусом линзы** (рис. 163, а). Поэтому такие линзы называются **положительными**, или **собирающими**. Расстояние от центра линзы  $O$  до точки  $F$  называется **фокусным расстоянием** линзы. У линзы имеется два главных фокуса, с каждой стороны по одному.

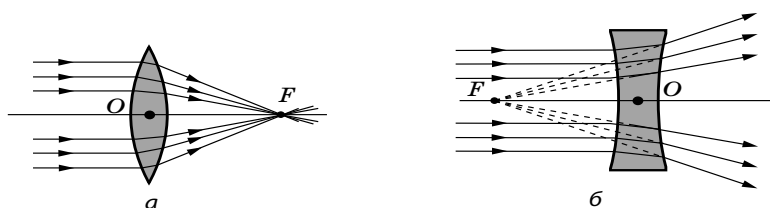


Рис. 163

Если на собирающую линзу направить пучок света, параллельный любой из её побочных оптических осей, он соберётся в точке, лежащей на плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через её главный фокус. Эта плоскость называется **фокальной плоскостью** линзы (рис. 164).

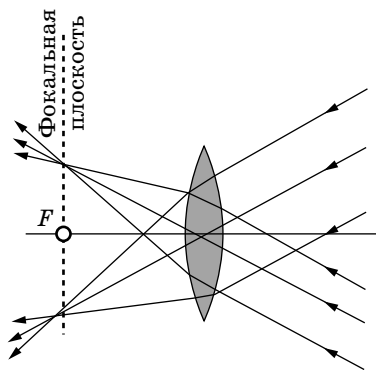


Рис. 164

**Вогнутая (отрицательная, или рассеивающая) линза.** Пучок света, направленный параллельно оптической оси вогнутой линзы, после преломления в ней расходится (рис. 163, б). Если эти расходящиеся лучи продолжить в обратную сторону, они соберутся на оптической оси линзы (со стороны падающего пучка) в точку, которая называется **мнимым фокусом** линзы. Глазу, расположенному с правой стороны, будет казаться, что пучок лучей исходит из точки  $F$ . Такая линза называется

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Фокусное расстояние линзы равно 130 мм. Найти оптическую силу линзы.
  - 0,0076 дптр
  - 7,69 дптр
  - 130 дптр
  - 0,13 дптр
- На сколько оптическая сила линзы с фокусным расстоянием  $F_1 = 0,5$  м больше оптической силы линзы с фокусным расстоянием  $F_2 = 100$  см?
  - 2
  - 200
  - 5
  - 0,5
- Предмет находится на расстоянии 15 см от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 30 см. На каком расстоянии от линзы будет изображение данного предмета?
  - 0,1 м
  - 0,2 м
  - 0,15 м
  - 0,25 м
- Оптическая сила линзы 4 дптр. На каком расстоянии от линзы необходимо разместить предмет, чтобы получить действительное изображение предмета в натуральную величину?
  - 1 м
  - 0,5 м
  - 0,6 м
  - 0,8 м
- Предмет находится на расстоянии 12 см от двояковогнутой линзы с фокусным расстоянием 10 см. Определить, на каком расстоянии от линзы находится изображение предмета.
  - 3 см
  - 4,5 см
  - 4 см
  - 5,5 см
- Оптическая сила линз в очках  $-3$  дптр. Какие недостатки зрения исправляют эти очки?
  - близорукость
  - дальнозоркость
  - глаукому
  - катаракту

**отрицательной, или рассеивающей.** Как и в случае собирающей линзы, фокусное расстояние измеряется от оптического центра до фокуса.

Фокусное расстояние линзы зависит от кривизны поверхностей, ограничивающих линзу. Чем больше кривизна поверхности линзы, тем меньше фокусное расстояние.

### Оптическая сила линзы

Оптической силой линзы называется физическая величина, обратная фокусному расстоянию:

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

Оптическая сила измеряется в **диоптриях** (дптр). В СИ единицей оптической силы является метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ).

Фокусное расстояние собирающей линзы (и, соответственно, её оптическую силу) условились считать положительной величиной, т. к. **собирающая линза обладает действительным фокусом.**

Фокусное расстояние рассеивающей линзы (и, соответственно, её оптическая сила) — отрицательная величина, т. к. у **рассеивающей линзы мнимый фокус.**

## Построение изображений в линзах

Любой предмет можно разбить на маленькие области, которые условно могут быть приняты за точки. Поэтому для построения изображения любого предмета необходимо знать, как строится изображение произвольной точки.

### Собирающая линза

Для образования оптического изображения точки в линзе достаточно двух лучей. В качестве таковых выбираются любые два из трёх лучей, ход которых известен: 1) луч, идущий параллельно оптической оси линзы, — луч  $AC$  (рис. 165), который после преломления пересекает оптическую ось в фокусе линзы  $F$ ; 2) луч, проходящий через оптический центр линзы, который не меняет своего направления (на рис. 165 это луч  $AA_1$ ); 3) луч, проходящий через фокус линзы, который после преломления пойдёт параллельно главной оптической оси, — луч  $AD$ . Точка  $A_1$  пересечения этих трёх лучей за линзой и будет изображением исходной точки  $A$  (рис. 165).

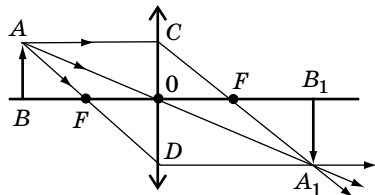


Рис. 165

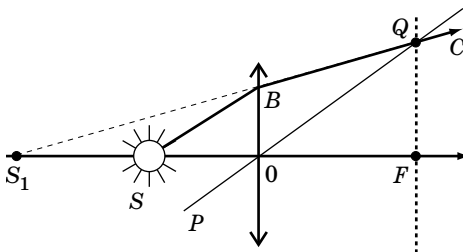


Рис. 166

Для построения изображения точки  $S$ , находящейся на главной оптической оси (рис. 166), все три упомянутых выше луча не подходят, т. к. сливаются в один, идущий вдоль главной оптической оси, и потому в этом случае пользуются следующим приёмом. Из точки  $S$  проводят произвольный луч  $SB$  до пересечения с линзой. Чтобы найти ход

этого луча после преломления в линзе, проводят через центр линзы  $O$  луч, параллельный  $SB$  и являющийся побочной оптической осью линзы, до пересечения с фокальной плоскостью линзы в точке  $Q$ . Через эту точку пройдет преломлённый луч  $BC$ . Таким образом, построен ход лучей, выходящих из точки  $S$ . После преломления эти лучи расходятся. Изображение  $S_1$  будет мнимым, т. к. источник расположен между главным фокусом и линзой.

### Рассеивающая линза

Построение изображения в рассеивающей линзе показано на рис. 167. Поскольку лучи после преломления в рассеивающей линзе не пересекаются, то в фокусе её собираются продолжения этих лучей. Получаемое изображение, следовательно, является мнимым и прямым. Изображение предмета расположено всегда между фокусом и оптическим центром линзы, и поэтому оно всегда уменьшенное.

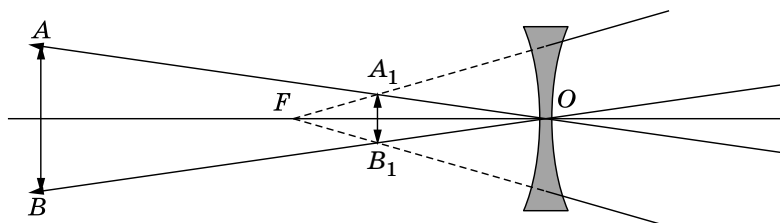


Рис. 167

### Увеличение линзы

Линейным увеличением  $\Gamma$  линзы называется отношение линейного размера изображения  $H$  к линейному размеру предмета  $h$ :  $\Gamma = \frac{H}{h}$ .

Как следует из рис. 165, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

$$\Gamma = \frac{|d_1|}{|d|}.$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа и телескопа. В глазу есть своя линза — хрусталик.

### Формула тонкой линзы

Используя законы геометрии, в частности, подобие треугольников (рис. 165), можно вывести формулу, связывающую расстояние  $d$  от предмета до линзы, расстояние  $d_1$  от изображения до линзы и фокусное расстояние линзы  $f$ :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f}, \quad (3.32)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_1} = D. \quad (3.33)$$

Уравнения (3.32) и (3.33) называют **формулой тонкой линзы**. Величины, входящие в формулу, могут быть как положительными, так и отрицательными. Фокусное расстояние  $f$  собирающей линзы считается положительным, а рассеивающей — отрицательным.



Расстояние  $d$  от линзы до предмета положительно, если это действительная светящаяся точка, и отрицательно, если мнимая (т.е. если на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжение которых сходится в одной точке). Расстояние  $d_1$  от изображения до линзы положительно, если изображение действительное, и отрицательно, если оно мнимое. Учитывая сказанное, перед каждым членом в формулах (3.32) и (3.33) ставят знак «+» или «-». Если знаки величин, входящих в формулы, неизвестны, ставят «+». Если в результате вычислений у какой-либо из величин получается знак «-», значит, эта величина — мнимая.

## Оптические приборы. Глаз как оптическая система

Законы оптики используются при создании разнообразных оптических приборов.

Простейшим из таких приборов является лупа. Лупа создаёт мнимое увеличенное изображение предмета, который находится от неё на расстоянии чуть ближе фокуса. Для увеличения изображений очень мелких объектов используется микроскоп. В качестве простейшего однолинзового микроскопа можно использовать обычную лупу. В качестве микроскопа можно также использовать трубу Галилея (состоящую из собирающего объектива и рассеивающего окуляра). В микроскопах собирающий объектив создаёт увеличенное изображение, которое рассматривается уже с помощью окуляра, работающего как лупа. Современные многолинзовые микроскопы позволяют увеличивать изображение в тысячи раз.

Сама труба Галилея послужила прообразом и подзорных труб, и телескопов. Телескопы состоят из собирающих оптических систем — объектива и окуляра. Объектив в своём фокусе создаёт перевёрнутое изображение очень далекого объекта. Это изображение, как и в микроскопе, рассматривается и увеличивается окуляром.

В подзорных трубах и биноклях для получения прямого изображения используют различные оптические устройства — системы призм или оборачивающие линзы.

Для создания действительных изображений, которые можно зафиксировать на пленке или в цифровом виде, а также рассматривать на экранах (например, в кинотеатрах), используют другие оптические приборы. Это фотоаппараты и проекционные аппараты.

Фотоаппараты содержат собирающий объектив, создающий уменьшенное действительное изображение. Фотоаппарат можно настраивать на резкость, перемещая объектив. Проекционные аппараты с помощью собирающего объектива позволяют получать увеличенное изображение на экранах. Резкость в них также настраивается путём перемещения объектива.

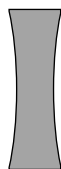
Самую сложную и самую эффективную оптическую систему создала природа. Это глаз человека и животных. Глаз так же, как и фотоаппарат, служит для создания изображений, которые проецируются на сетчатку глаза. Роль объектива играет хрусталик, который для настройки на резкость изменяет форму (явление **аккомодации**). Изменение формы приводит к изменению фокусного расстояния хрусталика.

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

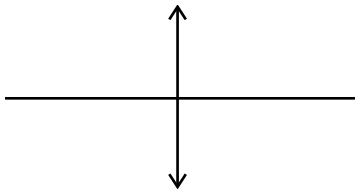
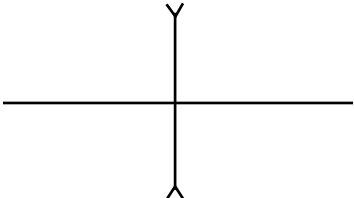
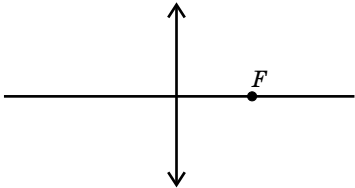
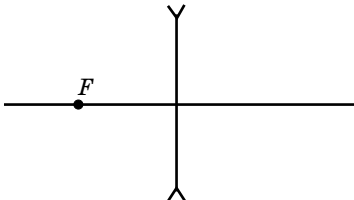
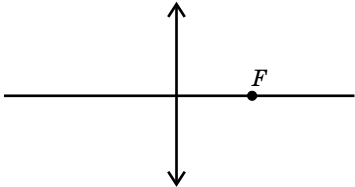
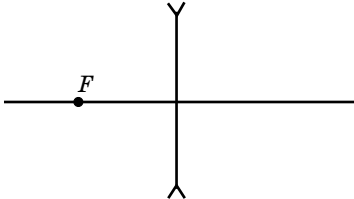
♦ Запишите формулу тонкой линзы.

[illegible]

♦ Нарисуйте рядом с рисунком линзы её графическое обозначение.



♦ Заполните таблицу, нарисовав ход лучей.

	Собирающая линза	Рассеивающая линза
Луч проходит через оптический центр		
Луч параллелен главной оптической оси		
Луч проходит через фокус		

## Ответы на тестовые задания (неделя 31)

**1 — 2. 2 — 1. 3 — 1. 4 — 2. 5 — 4. 6 — 1.**

- 3.6. Оптика
  - 3.6.10. Интерференция света
  - 3.6.11. Дифракция света
  - 3.6.12. Дифракционная решётка
  - 3.6.13. Дисперсия света
- 

## Интерференция света

**Интерференция света** — это пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн.

Ещё Ньютон в XVII в. исследовал некоторые явления интерференции, однако он не мог их объяснить с точки зрения своей корпускулярной теории (согласно которой свет представляет собой поток корпускул — частиц). Объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Юнгом и Френелем. Наиболее известна интерференция света, характеризующаяся образованием постоянной во времени интерференционной картины, представляющей собой регулярное чередование в пространстве областей повышенной и пониженной интенсивности света. Она получается в результате наложения когерентных световых пучков, т. е. в условиях постоянной или регулярно меняющейся разности фаз.

### Когерентность

**Когерентность** (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи) — согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких случайных колебательных или волновых процессов, позволяющее получить при их сложении чёткую интерференционную картину.

Первоначально понятие когерентности возникло в оптике, однако оно относится к волновым полям любой природы: электромагнитным волнам произвольного диапазона, упругим волнам, волнам в плазме.

Сказанное означает, что когерентными будут источники и созданные ими волны, если у них одинаковая частота и постоянная разность фаз колебаний.

В противном случае амплитуда результирующего колебания в данной точке с течением времени меняется, и устойчивой интерференционной картины не получится.

**Условие когерентности световых волн.** Световые волны двух независимых источников света некогерентны (за исключением лазеров). Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными обрывками (цугами) синусоидальных волн, имеющих длину около метра. Такие цуги волн от обоих источников накладываются друг на друга. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотически меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты друг относительно друга по фазе. Волны от различных источников некогерентны из-за того, что разность фаз волн не остаётся постоянной. Поэтому никакой устойчивой картины с распределением максимумов и минимумов освещённости не наблюдается. Для её достижения приходится прибегать к специальным ухищрениям.

Идеальными когерентными волнами являются две плоские линейно-поляризованные монохроматические волны одной частоты, электрические векторы которых параллельны.

## Монохроматическое излучение

**Монохроматическое излучение** — электромагнитное излучение одной определённой и строго постоянной частоты.

Происхождение термина «монохроматическое излучение» связано с тем, что различие в частоте световых волн воспринимается человеком как различие в цвете. Однако по своей природе электромагнитные волны видимого диапазона, лежащие в интервале длин волн 0,4–0,7 мкм, не отличаются от электромагнитных волн других диапазонов (инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и т. д.), хотя никакого ощущения цвета эти волны не дают.

Согласно теории электромагнитного излучения Максвелла, любое монохроматическое излучение — это гармоническое колебание, происходящее с неизменной амплитудой и частотой в течение бесконечно долгого времени. Плоская монохроматическая волна такого электромагнитного излучения представляет собой полностью когерентное поле, параметры которого неизменны в любой точке пространства и известен закон их изменения во времени.

Однако процессы излучения всегда ограничены во времени, поэтому понятие «монохроматическое излучение» является идеализацией. Реальное естественное излучение обычно является суммой определённого числа монохроматических волн со случайными амплитудами, частотами, фазами, поляризацией и направлением распространения. Чем уже интервал частот наблюдаемого излучения, тем оно монохроматичнее.

Так, излучение, соответствующее отдельным линиям спектров испускания свободных атомов (например, атомов разреженного газа), очень близко к монохроматическому излучению. Каждая из таких линий соответствует переходу атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Если бы энергии этих состояний имели строго фиксированное значение, атом излучал бы монохроматическое излучение вполне определённой частоты. Однако реально каждый атомный уровень имеет некоторую энергетическую ширину (интервал энергий, которые атом может занимать, находясь на данном энергетическом уровне; это следует из квантовой механики). Поэтому излучение каждой линии спектра соответствует некоторому интервалу частот  $\Delta\nu$ .

Так как идеальным монохроматическое излучение не может быть по своей природе, то монохроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом, который можно приближенно считать одной частотой (или длиной волны).

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Часто наблюдаемые в лужах воды цветные пятна тонких плёнок (как правило, разлитого машинного масла, керосина, бензина) являются результатом
  - 1) дифракции света на тонких плёнках
  - 2) интерференции света на тонких плёнках
  - 3) преломления света на тонких плёнках
  - 4) рассеяния света на тонких плёнках
2. На дифракционную решётку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Количество максимумов, которое можно наблюдать с помощью такой решётки, составляет
  - 1) 5
  - 2) 1
  - 3) 9
  - 4) 4
3. Глядя на Солнце через ресницы полузакрытых век, можно наблюдать радужную картинку. Она является результатом
  - 1) дифракции света
  - 2) интерференции света
  - 3) преломления света
  - 4) рассеяния света
4. Длина волны красного света в воздухе равна 700 нм. Найти длину волны в воде.
  - 1) 546 нм
  - 2) 456 нм
  - 3) 526 нм
  - 4) 631 нм
5. Скорость распространения луча жёлтого света в воде 225 000 км/с, а в стекле — 198 200 км/с. Определить показатель преломления стекла относительно воды.
  - 1) 1
  - 2) 0,09
  - 3) 1,34
  - 4) 1,14
6. Свет длиной волны 600 нм распространяется в воздухе. Найти длину волны в воде.
  - 1)  $4,5 \cdot 10^{-7}$  м
  - 2)  $6,5 \cdot 10^{-6}$  м
  - 3)  $4,8 \cdot 10^{-8}$  м
  - 4)  $5,6 \cdot 10^{-5}$  м

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

## Опыт Юнга

Естественные источники света некогерентны, поэтому от них невозможно наблюдать интерференционную картину. Однако если световой поток от естественного источника разделить на два, а затем свести вместе, то можно наблюдать устойчивую интерференционную картину. Впервые это удалось осуществить английскому учёному Томасу Юнгу (рис. 168).

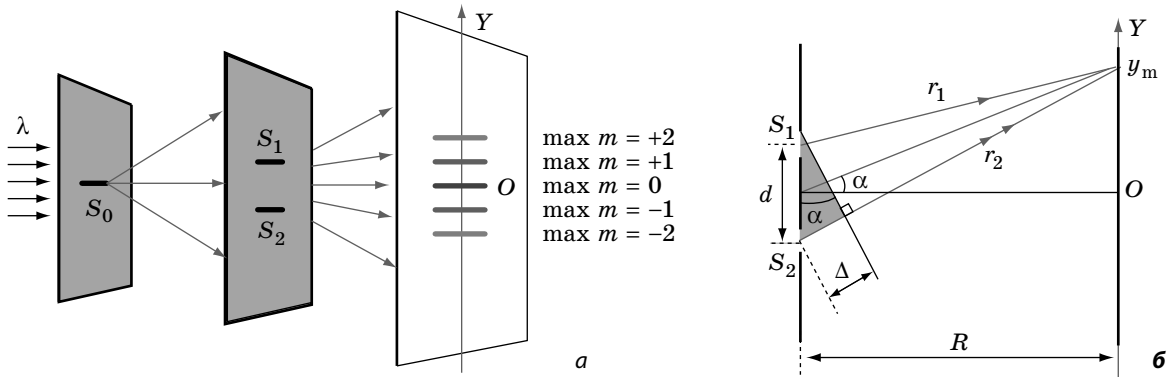


Рис. 168

Солнечный свет падал на экран с узкой щелью. Световая волна, прошедшая через эту щель, падала на экран с двумя щелями такой же ширины, находящимися на расстоянии  $d$  порядка нескольких микрон (рис. 168, а). В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей, были когерентными и создавали на экране устойчивую интерференционную картину. Ход лучей изображён на рис. 168, б. При условии, что  $d \ll R$ , и поэтому лучи  $S_1$   $S_2$  практически параллельны, а угол  $\alpha$  мал, и поэтому  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ , из рассмотрения хода лучей можно получить условия интерференционных максимумов и минимумов на экране:

$$\Delta_{\max} = dy_m/R = m\lambda, \quad \Delta_{\min} = (2m + 1)\lambda/2, \quad (3.34)$$

где  $m = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$ ;  $y_m$  — координата точки на экране,  $\Delta$  — оптическая разность хода.

В свою очередь,  $\Delta$  равно геометрической разности пути, умноженной на показатель преломления  $n$ :

$$\Delta = n(y_m S_1 - y_m S_2).$$

В данном случае  $n \approx 1$  (воздух). Однако  $n$  следует учитывать во всех случаях, когда интерферирующие лучи (или один из них) распространяются в средах с показателем преломления, отличным от единицы. Кроме того, к оптической разности хода  $\Delta$  следует добавлять  $\lambda/2$  в случае отражения света от оптически более плотной среды (среды с большим показателем преломления), например при рассмотрении интерференции на тонких пленках.

Поскольку солнечный свет содержит электромагнитные волны разной длины (соответственно, разного цвета), то интерференционная картина представляла собой чередующиеся полосы, окрашенные во все цвета радуги. Каждому цвету (каждой длине волны монохроматического света) соответствует своя разность хода. Юнг впервые измерил длины волн в разных областях видимого света, рассчитав их по формуле:

$$\lambda = dy_m/(Rm), \quad (3.35)$$

где  $m = 0, \pm 1; \pm 2; \dots$

Совпадение нулевых максимумов для различных длин волн означает, что в центре экрана белая полоска. Для остальных, как видно из (3.35), чем больше длина волны, тем дальше отстоит  $m$ -й максимум от центра.

## Дифракция света

**Дифракция света** — в узком, но наиболее употребительном смысле слова — огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени.

В широком смысле дифракция света — проявление волновых свойств света в предельных условиях перехода от волновой оптики к геометрической. Примерами последней являются рассеяние света капельками тумана, формирование изображения оптическими системами (например, микроскопом) и др.

Сложность наблюдения дифракционных явлений в оптике состоит в том, что препятствия, на которых наблюдается дифракция, должны быть очень малы — сравнимы с длиной волны света.

### Опыт Юнга

Т. Юнг, открывший интерференцию света, в 1802 г. поставил классический опыт по дифракции (рис. 169). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия  $B$  и  $C$  на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим, в свою очередь, через малое отверстие  $A$  в другой ширме. Именно эта деталь решила успех опыта — возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия  $A$  возбуждала в отверстиях  $B$  и  $C$  когерентные волны. Вследствие дифракции из отверстий  $B$  и  $C$  выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В местах перекрытия эти когерентные волны интерферировали, создавая на экране систему чередующихся светлых и тёмных полос.

Исследование дифракции получило своё завершение в работах О. Френеля. Учёный не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и построил количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину от любых препятствий. Он же впервые объяснил прямолинейное распространение света на основе волновой теории.

Одновременно Френель количественно рассмотрел дифракцию на разного рода препятствиях.

Дифракционные картины от различных препятствий представлены на рис. 170 *a* — от тонкой проволоки, *б* — от круглого отверстия, *в* — от круглого экрана. Вместо тени от проволоки видны темные и светлые полосы; в центре дифракционной картины от отверстия появляется тёмное пятно, окружённое светлыми кольцами (изменяя диаметр отверстия, можно в центре картины получить и светлое пятно,

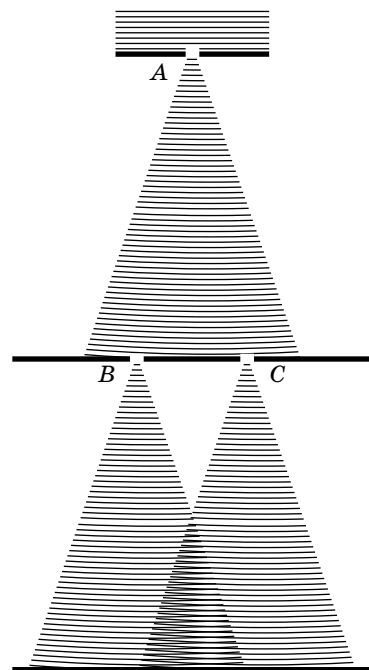


Рис. 169

окружённое тёмными и светлыми кольцами); в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными concentрическими кольцами.

Светлое пятно в центре геометрической тени (рис. 170, *в* — дифракция от круглого экрана) получило название **пятна Пуассона** по фамилии учёного, который при рассмотрении мемуаров Френеля в Парижской академии наук в 1818 г. обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекает необходимость появления такого пятна, что противоречит здравому смыслу. Однако Араго произвёл соответствующий опыт и показал, что выводы Пуассона верны и, следовательно, лишь подтверждают теорию Френеля.

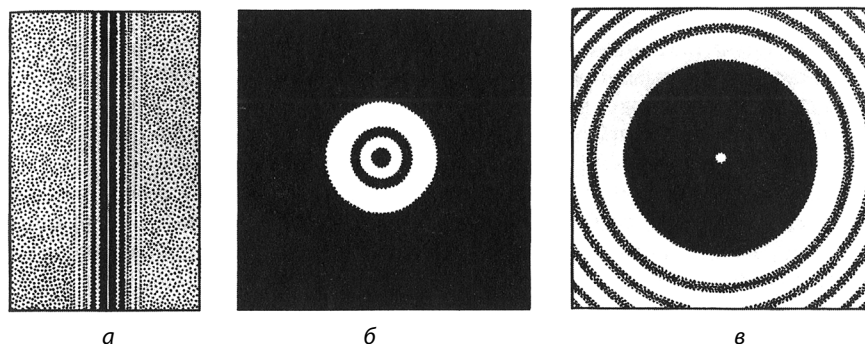


Рис. 170

Следует отметить, что поскольку из-за малости световой волны угол отклонения света от направления прямолинейного распространения очень невелик, то для получения дифракционной картины следует либо использовать очень маленькие препятствия, либо же располагать экран далеко от препятствий.

## Дифракционная решётка

**Дифракционная решётка** — оптический элемент, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей, выступов), нанесённых тем или иным способом на плоскую или вогнутую оптическую поверхность.

Дифракционная решётка (рис. 171) используется в спектральных приборах в качестве диспергирующей системы для пространственного разложения электромагнитного излучения в спектр. Фронт световой волны, падающий на дифракционную решётку, разбивается её штрихами на отдельные когерентные пучки, которые, претерпев дифракцию на штрихах, интерферируют, образуя результирующее пространственное распределение интенсивности света — **спектр излучения**.

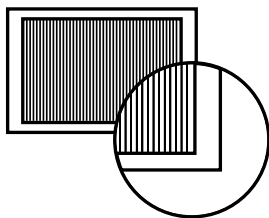


Рис. 171

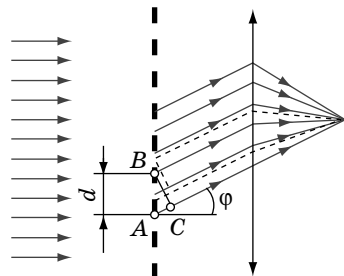


Рис. 172

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решётки. Если ширина прозрачных щелей равна  $a$ , а ширина непрозрачных промежутков —  $b$ , то величину  $a + b$  называют **периодом решётки**.

Пусть на решётку (рис. 172) падает плоская монохроматическая волна длиной  $\lambda$ . Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдём условие, при котором волны, распространяющиеся от щелей в направлении, определяемом некоторым углом  $\varphi$ , усиливают друг друга. Разность хода между волнами от краёв соседних щелей равна длине отрезка  $AC$ . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника  $ABC$  находим длину катета  $AC$ :  $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$ . Максимумы будут находиться под углом  $\varphi$ , определяемым условием:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (3.36)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3 \dots$

При выполнении условия (3.36) усиливаются волны, идущие не только от одного из краёв щелей, а от всех точек щелей, т. к. каждой точке в первой щели соответствует точка, находящаяся на расстоянии  $d$  во второй щели, поэтому разность хода вторичных волн, испускаемых этими точками, равна  $m\lambda$ , и они усиливаются.

Для наблюдения интерференционной картины дифрагировавших лучей за решёткой помещают линзу, а в её фокальной плоскости — экран. На экране появляется изображение щелей — система цветных полос, каждая из которых соответствует спектру  $m$ -го порядка. В центре экрана — белая полоса, это спектр нулевого порядка ( $m = 0$ ), для которого максимумы всех длин волн не зависят от угла  $\varphi$ . Чем больше длина волны, тем дальше располагается максимум интенсивности от центрального пятна.

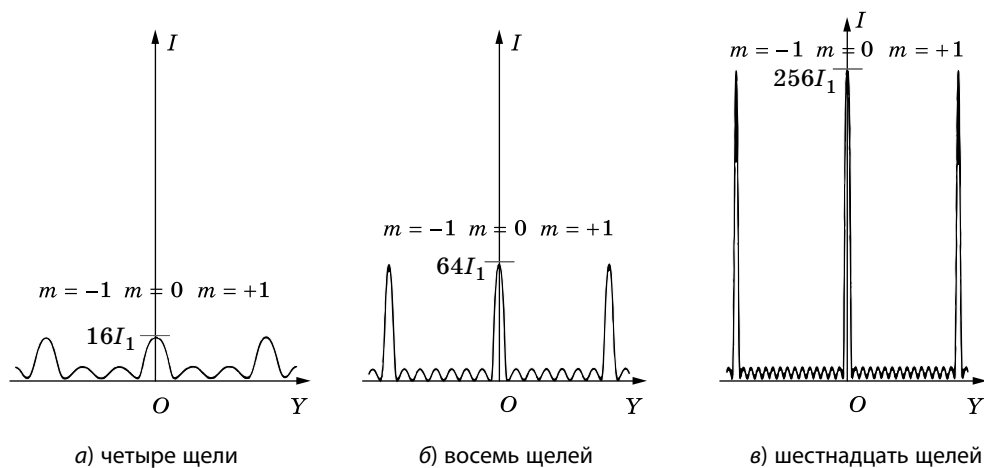


Рис. 173. Интенсивность света за дифракционной решёткой

Между максимумами расположены минимумы интенсивности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены (рис. 173). При использовании решёток в различных областях спектра и при небольших порядках спектра  $m$  число штрихов на 1 мм составляет: в ультрафиолетовой области —  $3600 \div 1200$  штрих/мм, в видимой области —  $1200 \div 600$  штрих/мм, в инфракрасной области —  $300 \div 1$  штрих/мм. Для рентгеновского излучения ( $\lambda < 10 \text{ \AA}$ ) дифракционными решётками служат монокристаллы, атомы и молекулы которых, расположенные в узлах кристаллической решётки, образуют трёхмерную структуру. Для радиоволн используют проволочные решётки, период которых соизмерим с длиной волны ( $\lambda > 2 \text{ мм}$ ).



## Дисперсия света

Световые волны различных частот воспринимаются человеком как различные цвета (см. табл. 3).

Таблица 3

Соответствие диапазонов длин волн и частот света определённым цветам

Цвет	Длина волны $\lambda$ , нм	Частота $\nu \cdot 10^{-12}$ Гц
Красный	780–620	400–484
Оранжевый	620–590	484–508
Жёлтый	590–560	508–536
Зелёный	560–500	536–600
Голубой	500–480	600–625
Синий	480–450	625–667
Фиолетовый	450–400	667–780

**Дисперсией** (от лат. *dispergo* — рассеивать, развеивать, разгонять) света называется зависимость показателя преломления света в веществе от частоты колебаний или длины волны.

Дисперсия света впервые была экспериментально обнаружена Ньютоном в 1666 г. при разложении узкого пучка солнечного света стеклянной призмой на семь цветов: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый (рис. 174). Из этого опыта Ньютон сделал вывод, что «световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломления». Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше всех — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал *дисперсией*.

Поскольку показатель преломления  $n$  зависит от скорости  $v$  света в веществе:  $n = c/v$ , а цвет видимого излучения определяется частотой колебаний или длиной волны, которые связаны известным соотношением со скоростью  $\lambda = v/\nu$ , то можно сказать, что *дисперсия — это зависимость скорости света в веществе от частоты волны*.

Попытка дальнейшего разложения одного из цветов с помощью призмы результатов не даёт. Наоборот, собрать разложенный в спектр белый свет другой призмой снова в белый возможно.

Сложный состав белого света позволяет объяснить окраску предметов: она связана с преимущественным отражением света данной длины волны (данного цвета). Остальные цвета этим предметом поглощаются.

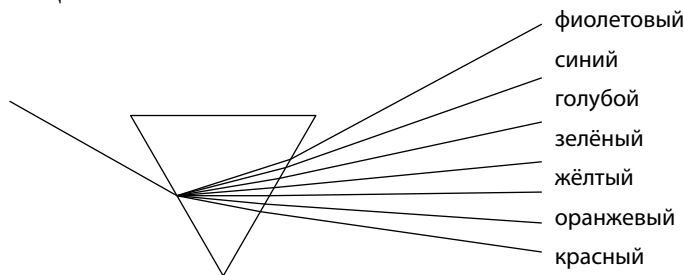


Рис. 174

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

- ♦ Запишите условие для интерференционных максимумов и минимумов.

Максимумы \_\_\_\_\_

Минимумы \_\_\_\_\_

- ♦ Запишите выражение для определения угла, при котором наблюдается интерференционный максимум.

$$\sin \varphi = \text{_____}.$$

- ♦ Закончите предложение.

Электромагнитное излучение одной определённой и строго постоянной частоты называется \_\_\_\_\_

Ответы на тестовые задания (неделя 32) \_\_\_\_\_

1 — 2. 2 — 4. 3 — 1. 4 — 3. 5 — 4. 6 — 1.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

Ответами к заданиям 1—7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Если два заряда притягиваются друг к другу, это значит, что заряды эти **одноимённые** (оба имеют знак плюс или знак минус), **разноимённые** (один имеет знак минус, второй — знак плюс)? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

2. Как изменится сила и направление взаимодействия между двумя точечными зарядами, если абсолютную величину каждого заряда увеличить вдвое, знак одного из них поменять на обратный, а расстояние между ними уменьшить в два раза? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) останется неизменной
- 2) увеличится вдвое по модулю и поменяет своё направление на обратное
- 3) увеличится по модулю в 8 раз
- 4) увеличится по модулю в 16 раз
- 5) поменяет своё направление на обратное

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Сила взаимодействия	Направление взаимодействия

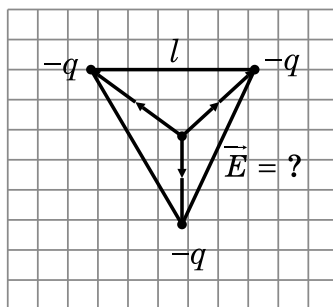
3. Какую **напряжённость** поля создаёт точечный заряд величиной  $+3$  мкКл в вакууме на расстоянии 3 м? Как **направлен** вектор напряжённости? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) вдоль линии, соединяющей заряд и точку, направлен от заряда
- 2) направлен перпендикулярно линии, соединяющей заряд и точку
- 3) вдоль линии, соединяющей заряд и точку, направлен к заряду
- 4) 2000 В/м
- 5) 3000 В/м
- 6) 2500 В/м

Запишите в **таблицу** выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

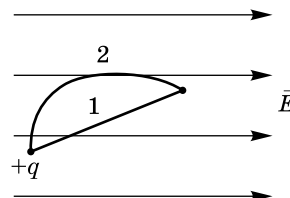
Напряжённость	Направление взаимодействия

4. Чему равна величина напряжённости электрического поля в центре равностороннего треугольника, в вершинах которого расположены три равных заряда  $-q$ ?



Ответ: \_\_\_\_\_.

5. На рисунке изображены траектории перемещения электрического заряда между двумя точками в однородном электростатическом поле. В каком случае работа поля по перемещению заряда больше: **вдоль траектории 1, вдоль траектории 2, одинакова?** Ответ запишите словом (словами).



Ответ: \_\_\_\_\_.

6. Потенциалы электрических полей трёх точечных зарядов в некоторой точке А равны соответственно  $-5$  В,  $+3$  В и  $-1$  В. Чему равно суммарное значение потенциала в этой точке?

Ответ: \_\_\_\_\_ В.

7. Как изменится энергия заряженного конденсатора, если напряжение между его обкладками уменьшить вдвое, а площадь пластин увеличить вдвое: **увеличится вдвое, уменьшится вдвое, увеличится в 4 раза, останется неизменной?** Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_.

Ответами к заданиям 8—11 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

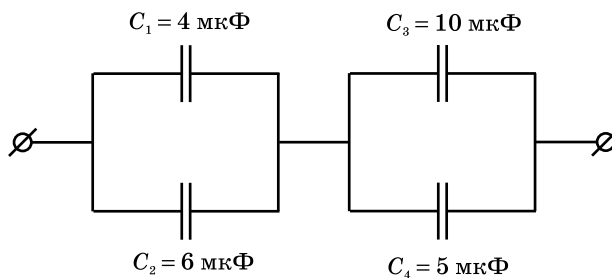
8. Для перемещения заряда  $1$  мкКл из одной точки поля в другую была совершена работа  $0,4$  мДж. Определите разность потенциалов между этими точками.

Ответ: \_\_\_\_\_ В.

9. Электроёмкость плоского конденсатора в вакууме равна  $0,3$  мкФ. Чему будет равна электроёмкость того же конденсатора, если между его обкладками вставить диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 6$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ мкФ.

10. Чему равна электроёмкость батареи конденсаторов, изображённых на рисунке? Ответ дайте в мкФ.



Ответ: \_\_\_\_\_ мкФ.

11. Напряжённость электрического поля в воде равна 10 В/м. Чему равна объёмная плотность поля? Ответ дайте в мкДж/м<sup>3</sup>.

Ответ: \_\_\_\_\_ мкДж/м<sup>3</sup>.

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Ответами к заданиям 1—11 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Как изменится сила электрического тока при увеличении концентрации носителей тока в проводнике в 2 раза, увеличении их скорости в 2 раза и одновременном увеличении площади поперечного сечения проводника в 1,5 раз: **увеличится в 1,5 раза, увеличится в 3 раза, уменьшится в 2 раза, увеличится в 6 раз**? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_.

2. Закон Ома для участка цепи связывает напряжение на его концах  $U$ , ток в цепи  $I$  и его сопротивление  $R$ . Как изменится, согласно этому закону, сила тока и сопротивление при увеличении напряжения? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличится

2) уменьшится

3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Сила тока $I$	Сопротивление $R$

3. Какими формулами выражаются законы Ома для участка цепи и для полной цепи? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

#### ЗАКОНЫ

А) законы Ома для участка цепи

Б) законы Ома для полной цепи

#### ФОРМУЛЫ

$$1) R = \rho \frac{l}{S}$$

$$2) I = envS$$

$$3) Q = I^2 R t$$

$$4) I = \frac{U}{R}$$

$$5) I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

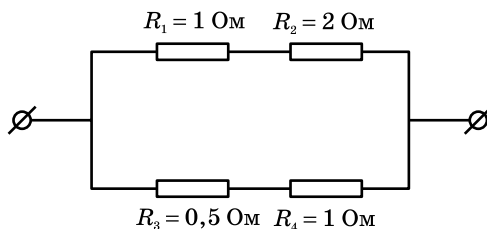
Ответ: 

А	Б

4. Сторонние силы при перемещении электрического заряда в 5 Кл от одного полюса к другому внутри источника тока совершают работу, равную 10 Дж. Определите ЭДС источника.

Ответ: \_\_\_\_\_ В.

5. Зная закон Джоуля — Ленца, можно сказать, что максимальное количество тепла выделится на сопротивлении: **первом, втором, третьем, четвёртом**? Ответ запишите словом.



Ответ: \_\_\_\_\_ .

6. Добавление примеси фосфора в германий приведёт к образованию проводимости: ***n*-типа, *p*-типа, не изменит проводимость германия**? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

7. Установите соответствие между проводником и типом свободных носителей в нём. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

А) металлы

Б) полупроводники

**ФОРМУЛЫ**

1) положительно заряженные ионы

2) отрицательно заряженные ионы

3) положительно и отрицательно заряженные ионы

4) электроны и ионы

5) дырки и электроны

6) электроны

Ответ: 

А	Б

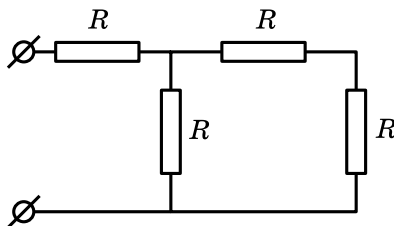
8. Каково сопротивление алюминиевой проволоки длиной 2 м, диаметром 1 мм?

Ответ: \_\_\_\_\_ Ом.

9. Каково сопротивление проводника из чистого металла при температуре 50° С, если его сопротивление при 0 °С равно 10 Ом? Температурный коэффициент сопротивления проводника считать постоянным в этом интервале температур.

Ответ: \_\_\_\_\_ Ом.

10. Определите сопротивление участка цепи, состоящего из одинаковых резисторов с сопротивлением  $R$ , выразив его в «единицах»  $R$ .



Ответ: \_\_\_\_\_  $R$ .

11. Каково сопротивление нити электролампы мощностью 60 Вт?

Ответ: \_\_\_\_\_ Ом.



8. Магнитный поток внутри контура с площадью поперечного сечения  $30 \text{ см}^2$  равен  $0,15 \text{ Вб}$ . Определите индукцию поля внутри контура, считая поле однородным. (О потоке индукции см. 3.4.1.)

Ответ: \_\_\_\_\_ Тл.

9. На рисунках *a* и *б* показаны параллельные (направленные в одну сторону) и антипараллельные (направленные в противоположные стороны) токи (вид сверху). Как будут себя вести проводники с токами?



Для каждой пары токов определите соответствующий характер поведения:

- 1) притягиваться                      2) отталкиваться                      3) не будут взаимодействовать

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Параллельные токи	Антипараллельные токи

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ»

Ответами к заданиям 1—10 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Явление электромагнитной индукции **заключается и проявляется в:**
- 1) изменении магнитного потока в контуре при движении последнего в магнитном поле
  - 2) повороте магнитной стрелки вдоль линий магнитной индукции
  - 3) возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур
  - 4) протекании тока в электрической цепи при подключении источника тока
  - 5) загорании лампочки, впаянной в проволочное кольцо, при надевании последнего на полосовой магнит

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

2. В какой-то момент времени переменное внешнее магнитное поле  $\vec{B}$  приводит к **увеличению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который согласно правилу Ленца индуцирует магнитное поле  $\vec{B}_1$ . Как направлено индуцированное поле  $\vec{B}_1$  по отношению к внешнему полю  $\vec{B}$ : **противоположно, параллельно, перпендикулярно**? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

3. В какой-то момент времени переменное внешнее магнитное поле  $\vec{B}$  приводит к **уменьшению** магнитного потока в замкнутом контуре, находящемся в этом поле. Это изменение магнитного потока индуцирует электрический ток, который согласно правилу Ленца индуцирует магнитное поле  $\vec{B}_1$ . Как направлено индуцированное поле  $\vec{B}_1$



по отношению к внешнему полю  $\vec{B}$ : **противоположно, параллельно, перпендикулярно?** Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

4. Какими формулами выражаются основной закон электромагнитной индукции и ЭДС самоиндукции? К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ**

- А) основной закон электромагнитной индукции  
Б) ЭДС самоиндукции

**ФОРМУЛЫ**

- 1)  $E_i = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t}$   
2)  $B = \frac{F}{I\Delta l}$   
3)  $F = qB\sin\alpha$   
4)  $\Phi = B_n S$   
5)  $\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Ответ: 

А	Б

5. Магнитный поток через контур проводника сопротивлением 0,05 Ом за 2 с равномерно изменился на 0,02 Вб. Определите силу тока в проводнике, возникшую вследствие этого.

Ответ: \_\_\_\_\_ А.

6. При изменении силы тока в катушке от 0 до 5А в течение 2 с в ней возникла ЭДС, равная 1 В. Чему равна индуктивность катушки?

Ответ: \_\_\_\_\_ Гн.

7. Определите энергию магнитного поля соленоида, число витков которого равно 500, площадь поперечного сечения 10 см<sup>2</sup>, а длина 0,2 м. Соленоид расположен в вакууме при токе 0,2 А. Ответ дайте в мкДж.

Ответ: \_\_\_\_\_ мкДж.

8. Найдите ЭДС индукции в проводнике длиной 1 м, перемещающемся в однородном магнитном поле с  $B = 6$  Тл со скоростью 3 м/с под углом 45° к вектору магнитной индукции.

Ответ: \_\_\_\_\_ В.

9. Изменяющееся во времени магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля, отличающегося от электростатического поля. Установите соответствие между типами полей и их свойствами. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

- А) вихревое электрическое поле
- Б) электростатическое поле

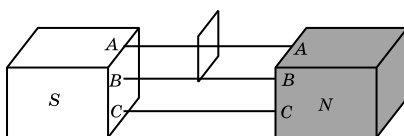
## СВОЙСТВА ПОЛЕЙ

- 1) силовые линии поля начинаются и заканчиваются на неподвижных зарядах
- 2) поле связано исключительно с наличием проводников
- 3) силовые линии поля замкнуты

Ответ: 

А	Б

10. Небольшая проволочная прямоугольная рамка свободно падает в пространстве между широкими полюсами достаточно сильного электромагнита (см. рисунок). Как направлены индукционные токи, возникающие в рамке, если смотреть из северного полюса магнита на южный, когда её середина пересекает линии *A* и *B*?



Для каждой линии определите соответствующее направление тока:

- 1) ток направлен по часовой стрелке
- 2) ток направлен против часовой стрелки
- 3) ток равен нулю

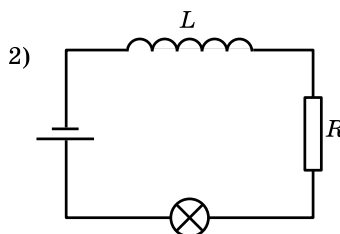
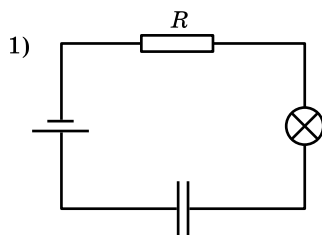
Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой линии. Цифры в ответе могут повторяться.

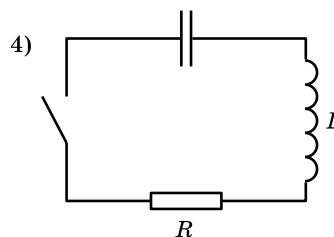
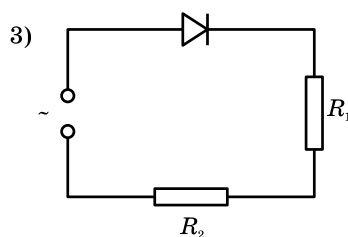
Линия <i>A</i>	Линия <i>B</i>

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

Ответами к заданиям 1—9 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. На каком из приведённых ниже рисунков изображён колебательный контур: **первом, втором, третьем, четвёртом**? Ответ запишите словом.





Ответ: \_\_\_\_\_ .

2. В электрическом колебательном контуре колеблющимися величинами являются

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1) заряд конденсатора    | 4) сопротивление проводов                        |
| 2) индуктивность катушки | 5) полная энергия электромагнитного поля контура |
| 3) ёмкость конденсатора  | 6) сила тока                                     |

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

3. Свободные колебания **определяются и проявляются** как

- 1) периодически изменяющиеся характеристики системы
- 2) колебания, совершаемые в электрическом колебательном контуре при  $R = 0$
- 3) колебания ветвей деревьев на ветру
- 4) приливы и отливы рек и морей
- 5) колебания системы, совершающиеся только за счёт первоначально сообщённой энергии при отсутствии внешних воздействий

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

4. Как изменится период свободных колебаний в электрическом контуре, если пластины конденсатора раздвинуть: **уменьшится, увеличится, не изменится**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

5. Циклическая частота колебаний электрического контура при введении железного сердечника в катушку индуктивности: **уменьшится, увеличится, не изменится**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

6. В цепи переменного тока между током и напряжением на активном сопротивлении **имеется или не имеется** сдвиг фаз? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

7. Ёмкостное сопротивление цепи переменного тока  $X_C$  после уменьшений ёмкости конденсатора в два раза и частоты генерируемого тока в 4 раза стало  $X_{C_1}$ . Найдите отношение  $X_{C_1}/X_C$ .

Ответ: \_\_\_\_\_ .

8. Как меняется резонансная частота колебаний и амплитуда тока на частоте резонанса электрического колебательного контура при увеличении активного сопротивления контура? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится                      2) уменьшится                      3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Резонансная частота	Амплитуда

9. Индуктивность электрического колебательного контура соответствует в механической колебательной системе: **координате, скорости, массе, жёсткости**? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 10—12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

10. Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне с длиной волны 30 м в течение одного периода звуковых колебаний с частотой 200 Гц?

Ответ: \_\_\_\_\_ .

11. Зная уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора  $U = 50 \cos 10^4 \pi t$  В, найдите длину волны, соответствующую этому контуру.

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

12. Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью  $C = 0,9$  нФ и катушки с индуктивностью  $L = 0,002$  Гн. На какую длину волны настроен контур? Сопротивлением контура можно пренебречь.

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ОПТИКА»

Ответами к заданиям 1—6 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

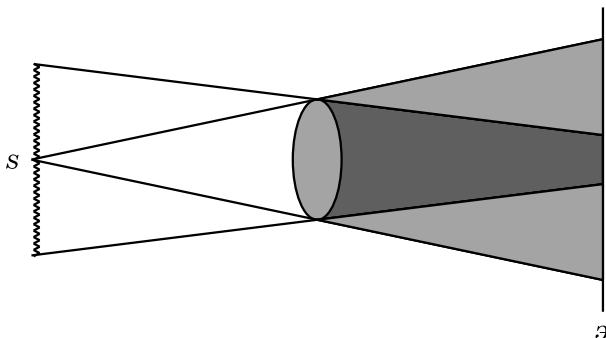
1. Каким является изображение, которое мы видим, разглядывая себя в обычном плоском зеркале?

- 1) действительным, увеличенным  
2) обратным перевёрнутым, уменьшенным  
3) прямым, увеличенным,  
4) прямым, мнимым  
5) с увеличением, равным единице

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

2. Образование полутени, изображённой на рисунке, является следствием



- 1) прямолинейности распространения света
- 3) протяжённости источника света
- 2) дифракции света
- 4) преломления света

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

3. Для какой среды справедлив закон прямолинейного распространения света: **оптически однородной, оптически неоднородной**? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

4. Что описывает и на какой идее основан основной постулат волновой теории — принцип Гюйгенса — Френеля?

- 1) основан на идее об интерференции волн от вторичных источников, расположенных на волновой поверхности источника света
- 2) идее о дифракции вторичных волн
- 3) идее рассеянии света на волновом фронте
- 4) описывает механизм прямолинейного распространения света
- 5) описывает дисперсию волн

Выберите **два** правильных ответа из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

5. Часто наблюдаемые на лужах цветные пятна тонких плёнок как правило, разлитого машинного масла, бензина, керосина являются результатом: **дифракции, интерференции, преломления, рассеяния** света на тонких плёнках? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

6. Глядя на Солнце через ресницы полузакрытых век, можно наблюдать радужную картинку. Она является результатом **дифракции, интерференции, преломления, рассеяния** света? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

Ответами к заданиям 7—9 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

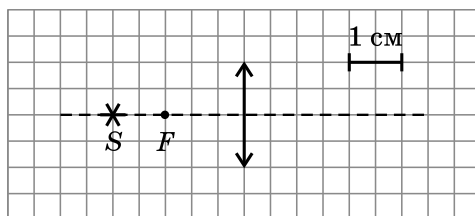
7. Какова скорость распространения света в стекле с показателем преломления  $n = 1,7$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

8. Определите период дифракционной решётки, если максимум первого порядка для длины волны 400 нм наблюдается под углом  $30^\circ$ . Ответ дайте в мкм.

Ответ: \_\_\_\_\_ мкм.

9. Постройте изображение точки, лежащей на главной оптической оси собирающей линзы, определите расстояние от оси линзы до изображения. Расстояние выразите в см.



Ответ: \_\_\_\_\_ см.

- 4.1. Инвариантность скорости света. Принцип относительности Эйнштейна
  - 4.2. Полная энергия
  - 4.3. Энергия покоя
  - 4.4. Релятивистский импульс
- 

## ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### Постулаты специальной теории относительности

**Теория относительности** — теория, описывающая универсальные пространственно-временные свойства физических процессов.

Альберт Эйнштейн создал новую теорию — теорию относительности, или релятивистскую механику (от лат. *relativus* — относительный).

Необходимость создания теории относительности была вызвана тем, что возникли сомнения в справедливости принципа относительности Галилея применительно к электромагнитным явлениям. Так, в опыте А. Майкельсона и Э. Морли (1881 г.), в котором сравнивали скорость распространения света вдоль направления орбитальной скорости Земли вокруг Солнца и перпендикулярно этому направлению, было установлено, что движение Земли вокруг Солнца не влияет на скорость распространения света. Это противоречит закону сложения скоростей Галилея.

Согласовать принцип относительности Галилея с электродинамикой Максвелла оказалось возможным, только отказавшись от классических представлений о пространстве и времени, согласно которым расстояния и течение времени не зависят от системы отсчёта.

Главный вклад Эйнштейна в познание законов природы состоял в радикальном изменении основополагающих представлений о пространстве, времени, веществе и движении.

**Специальная теория относительности (СТО)** рассматривает взаимосвязь физических процессов, происходящих только в инерциальных системах отсчёта, т. е. в системах отсчёта, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. СТО предполагает отсутствие гравитационных полей.

**Общая теория относительности** описывает взаимосвязь физических процессов, происходящих в ускоренно движущихся друг относительно друга (неинерциальных) системах отсчёта.

Общая теория относительности является релятивистской теорией тяготения (гравитации). Согласно этой теории физическое пространство не является простымместилищем объектов. Гравитационное поле физических тел приводит к неевклидовости пространства—времени.

**Специальная теория относительности Эйнштейна основывается на двух постулатах.**

1. *Принцип относительности — главный постулат СТО* — все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.

2. *Второй постулат гласит:* скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчёта. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника светового сигнала.

## Следствия постулатов СТО

Теория относительности представляет собой новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым классическим представлениям. Согласно теории относительности, одновременность событий, расстояния и промежутки времени являются не абсолютными, а относительными. Они зависят от системы отсчёта.

Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения обычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течёт в раз и навсегда заданном темпе, совершенно независимо от материи и её движения, оказывается неправильным.

Основными следствиями являются следующие.

**Относительность расстояний**, которая выражается формулой:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (4.1)$$

где  $l_0$  — длина тела в системе отсчёта  $K$ , относительно которой тело покоится;  $l$  — длина тела в системе  $K_1$ , относительно которой тело движется со скоростью  $\vec{v}$ . Как видно из формулы,  $l < l_0$ . Из неё следует, что наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчёта, относительно которой оно покоится. В этом состоит релятивистское сокращение размеров тела в движущихся системах отсчёта.

**Относительность промежутка времени** выражается формулой:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4.2)$$

где  $\tau_0$  — интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке инерциальной

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Специальная теория относительности рассматривает физические процессы, происходящие
  - 1) в любых системах отсчёта
  - 2) в гравитационном поле
  - 3) только в неинерциальных системах отсчёта
  - 4) только в инерциальных системах отсчёта и в отсутствии гравитационных полей
- Одним из выводов СТО является относительность расстояний, измеренных в двух системах отсчёта, движущихся друг относительно друга с некоторой постоянной скоростью, причём
  - 1) наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчёта, относительно которой оно покоится
  - 2) наибольшей длиной обладает тело в той системе отсчёта, относительно которой оно движется
  - 3) длина тела не зависит от системы отсчёта
  - 4) длина тела не зависит от скорости движения
- Солнце излучает ежеминутно энергию, равную  $6,5 \cdot 10^{21}$  кВт · ч. Считая излучение Солнца постоянным, найдите, за какое время масса Солнца уменьшится в 2 раза. Ответ дайте в годах.
  - 1)  $6 \cdot 10^9$
  - 2)  $7 \cdot 10^{12}$
  - 3)  $5 \cdot 10^{12}$
  - 4)  $7 \cdot 10^9$
- Во сколько раз увеличивается продолжительность существования нестабильной частицы (по часам неподвижного наблюдателя), если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99% скорости света?
  - 1) 6,5
  - 2) 5,4
  - 3) 4,3
  - 4) 7,1
- Какую часть скорости света должна составлять скорость частицы, чтобы её кинетическая энергия была равна энергии покоя?
  - 1) 0,756
  - 2) 0,866
  - 3) 0,956
  - 4) 0,654

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
**33**  
34  
35  
36



системы координат  $K$ ,  $\tau$  — интервал времени между теми же событиями в системе отсчёта  $K_1$ , движущейся относительно системы  $K$  со скоростью  $\vec{v}$ . Очевидно, что  $\tau > \tau_0$ .

Таким образом, длительность события оказывается наименьшей в неподвижной системе отсчёта. При этом чем больше относительная скорость движения двух систем, тем больше разница в длительности событий, измеренных в этих системах. Из формул (4.1) и (4.2) следует также, что скорость света — это предельная скорость тела при любом движении, поскольку при  $v > c$  формулы теряют смысл.

**Релятивистский закон сложения скоростей** для частного случая движения тела со скоростью  $v_1$  вдоль оси  $OX_1$  системы отсчёта  $K_1$ , которая, в свою очередь, движется со скоростью  $v$  относительно системы отсчёта  $K$ , причём так, что координатные оси  $OX$  и  $OX_1$  совпадают, а координатные оси  $OY$  и  $OY_1$ ,  $OZ$  и  $OZ_1$  остаются параллельными, имеет вид:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}, \quad (4.3)$$

где  $v_2$  — скорость движения тела относительно системы отсчёта  $K$ .

Из этой формулы видно, что луч света, распространяющийся со скоростью  $v_1 = c$  в движущейся системе координат, будет распространяться с той же скоростью  $c$  и в неподвижной системе координат.

## Основной закон релятивистской динамики

Импульс тела в релятивистской динамике равен:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4.4)$$

Выражение  $\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_p$  называется релятивистской массой и используется для сохра-

нения привычного вида записи импульса  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

Масса  $m$  (масса покоя) считается характеристикой тела (системы тел), не изменяющейся при переходе от одной системы отсчёта к другой.

Основной же закон релятивистской динамики записывается в прежней форме:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

## Полная и кинетическая энергии частицы. Энергия покоя

Эйнштейн установил формулу связи между энергией частицы, движущейся со скоростью  $v$ , и её массой:

$$E = m_p c^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.5)$$

Полная энергия тела или системы тел равна релятивистской массе, умноженной на квадрат скорости света.

Кинетическая энергия релятивистской частицы определяется выражением:

$$E_k = mc^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Согласно формуле (4.5) тело обладает энергией и при скорости, равной нулю. Это энергия покоя:

$$E_0 = mc^2. \quad (4.6)$$

Любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна массе покоя  $m$ .

Уравнение (4.6) — это формула Эйнштейна, первая из двух великих формул физики (вторая — это формула Планка).

При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя, в частицы, у которых  $m = 0$ , энергия покоя целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Это является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

При скоростях движения, много меньших скорости света, справедливы классические представления о пространстве и времени и законы механики Ньютона. Это — проявление общего принципа соответствия физических теорий.

## Основные уравнения релятивистской механики. Масса

В релятивистской механике полная энергия свободной частицы  $E$  равна сумме энергии покоя  $E_0$  и кинетической энергии  $E_k$ :  $E = E_0 + E_k$  (в отличие от классической механики, где  $E = E_k + E_n$  — сумма кинетической и потенциальной энергии).

Основными уравнениями механики свободной релятивистской частицы являются:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4; \quad \vec{p} = \frac{\vec{v} E}{c^2}.$$

Масса, входящая в первое из этих уравнений, та же, что и в уравнениях ньютоновской механики (масса покоя). Однако, в отличие от классической, в релятивистской механике масса не является ни мерой инертности тела, ни источником гравитационного поля, ни мерой количества вещества. Масса системы не равна сумме масс составляющих её частей, что очевидно доказывают примеры распада элементарных частиц с ненулевой массой покоя на фотоны. Массу в СТО можно рассматривать как меру энергии свободной частицы, а законы сохранения энергии и импульса в СТО имеют место.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Заполните пропуски в формулах.

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}; \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ответы на тестовые задания (неделя 33)

1 — 4. 2 — 1. 3 — 2. 4 — 4. 5 — 2.

# НЕДЕЛЯ 34

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 5.1. Корпускулярно-волновой дуализм
  - 5.1.1. Гипотеза М. Планка о квантах
  - 5.1.2. Фотоэффект
  - 5.1.3. Опыты А. Г. Столетова
  - 5.1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта
  - 5.1.5. Фотоны
  - 5.1.6. Энергия фотона
  - 5.1.7. Импульс фотона
  - 5.1.8. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц. Корпускулярно-волновой дуализм
  - 5.1.9. Дифракция электронов

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

### КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

#### Гипотеза Планка о квантах

**Гипотеза Планка** — предположение, что атомы испускают электромагнитную энергию (свет) не непрерывно, а отдельными порциями — квантами.

Энергия каждой порции пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu, \quad (4.7)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка,  $\nu$  — частота света.

**Постоянная Планка (квант действия)** — фундаментальная физическая константа. Введена М. Планком в 1900 г. Наиболее точное значение постоянной Планка  $h = 6,626176(36) \times 10^{-34}$  Дж · с. Чаще пользуются постоянной  $\hbar = h/2\pi = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34}$  Дж · с, также называемой постоянной Планка. Формула (4.7) — это вторая из простых великих формул физики (первая — формула Эйнштейна, связывающая энергию покоя тела с его массой). После открытия Планка начала развиваться квантовая теория.

#### Фотоэффект

**Фотоэффект** — испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем, который установил, что длина искры в разряднике увеличивается при попадании на его металлические электроды света от искры второго разрядника. Первые исследования фотоэффекта были выполнены русским учёным

А. Г. Столетовым (1888 г.). Ф. Ленард и Дж. Томсон (1889 г.) доказали, что при фотоэффекте испускаются электроны.

## Опыты Столетова

Схема опытов и прибор Столетова по наблюдению фотоэффекта представлены на рис. 175, а. Здесь  $C$  — два металлических диска, установленных параллельно друг другу (один — латунная или железная металлическая сетка, второй диск — сплошной). Диски соединены между собой проволокой, в которую введены гальваническая батарея  $B$  и чувствительный гальванометр с большим сопротивлением (5212 Ом),  $A$  — источник света (лампа с вольтовой дугой). Таким образом, две металлические пластины представляют собой конденсатор, причём металлическая сетка является положительной обкладкой конденсатора. Свет от дуги  $A$  через сетку попадает на отрицательно заряженную сплошную металлическую пластину. Из опытов Столетова следовало, что фототок через гальванометр сильнее всего растёт при освещении ультрафиолетовыми лучами, сила фототока пропорциональна интенсивности освещения, и под действием света освобождаются только отрицательные заряды.

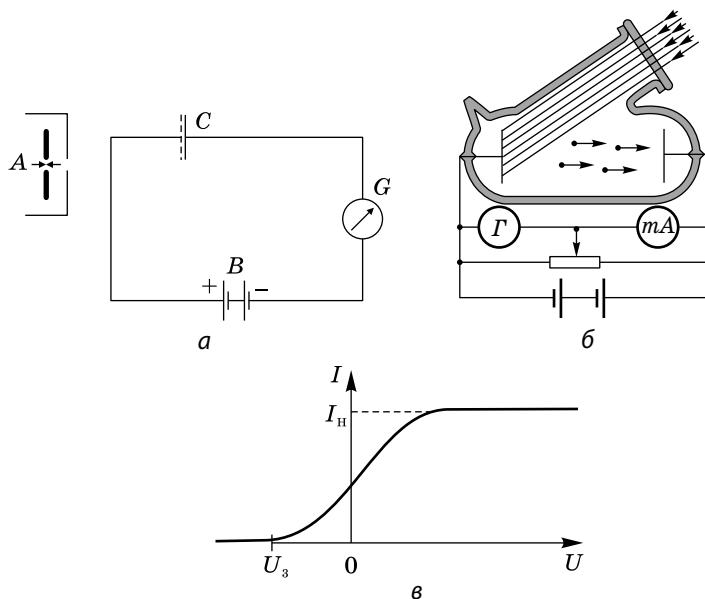


Рис. 175

При изучении фотоэффекта строят зависимость тока  $I$  от напряжения  $U$ , подаваемого к электродам, один из которых (исследуемый фотокатод) освещается светом,

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

- Энергия излучения с длиной волны 1 мкм составляет  $10^{-7}$  Дж. Число фотонов в излучении равно
  - $5 \cdot 10^{11}$
  - $1 \cdot 10^{10}$
  - $3 \cdot 10^9$
  - $8 \cdot 10^{11}$
- Какова красная граница фотоэффекта для платины, если работа выхода электронов  $A = 1 \cdot 10^{-18}$  Дж?
  - $2 \cdot 10^{-7}$  м
  - $4 \cdot 10^{-7}$  м
  - $3 \cdot 10^{-7}$  м
  - $5 \cdot 10^{-7}$  м
- Найдите работу выхода электронов из металла, если фотоэффект начинается при частоте падающего света  $6 \cdot 10^{14}$  с $^{-1}$ .
  - $4 \cdot 10^{-19}$  Дж
  - $2 \cdot 10^{-19}$  Дж
  - $5 \cdot 10^{-19}$  Дж
  - $6 \cdot 10^{-19}$  Дж
- Определите энергию пучка синего света с длиной волны  $\lambda = 450$  нм, состоящего из 10 фотонов.
  - $4,1 \cdot 10^{-18}$  Дж
  - $4,4 \cdot 10^{-18}$  Дж
  - $5,4 \cdot 10^{-18}$  Дж
  - $5,2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- Найдите массу фотона, длина волны которого равна 500 нм.
  - $4,4 \cdot 10^{-36}$  кг
  - $2 \cdot 10^{-36}$  кг
  - $5 \cdot 10^{-36}$  кг
  - $3 \cdot 10^{-36}$  кг
- Длина волны де Бройля шарика массой 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с, составляет
  - $8,1 \cdot 10^{-26}$  см
  - $16,6 \cdot 10^{-25}$  см
  - $5 \cdot 10^{-20}$  см
  - $6,6 \cdot 10^{-27}$  см

(рис. 175, в). Из полученной зависимости  $I(U)$  следует, что при  $U = 0$  ток не равен нулю, а для того чтобы ток стал равным нулю, необходимо подать некоторое напряжение обратной полярности (к освещённому электроду «+», к неосвещённому — «-»), которое называется задерживающим напряжением  $U_3$  и определяется максимальной кинетической энергией вылетающих электронов:  $mv^2/2 = eU_3$ .

В процессе исследования фотоэффекта были установлены следующие закономерности.

1. Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.
2. Скорость электронов, вылетающих из тела при фотоэффекте, определяется его частотой  $\nu$  и не зависит от интенсивности.
3. Для каждого вещества существует предельная наименьшая частота света  $\nu_{\min}$  (красная граница фотоэффекта), при которой возможен фотоэффект. Излучение с частотой  $\nu < \nu_{\min}$  не вызывает явления фотоэффекта.

Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить в рамках классической электромагнитной теории. Они имеют квантовый характер.

## Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идею Планка о прерывистом испускании света:  $E = h\nu$ . Согласно Эйнштейну из явления фотоэффекта следует, что свет имеет прерывистую структуру: излучённая порция световой энергии  $E = h\nu$  сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем. Поглотиться может только вся порция целиком. Эта порция называется фотоном.

Если фотон передаёт электрону энергию  $h\nu$ , большую или равную величине работы  $A$  по удалению электрона с поверхности металла, то электрон покидает поверхность этого металла. Разность между  $h\nu$  и  $A$  приведёт к возникновению кинетической энергии электрона. Из закона сохранения энергии следует:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (4.8)$$

Эта формула называется **уравнением Эйнштейна**. Оно описывает все законы фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следует, что кинетическая энергия электрона линейно зависит от частоты  $\nu$  и не зависит от интенсивности излучения. Поскольку общее число электронов  $n$ , покидающих поверхность металла, пропорционально числу падающих фотонов, то величина  $n$  пропорциональна интенсивности падающего излучения.

Красную границу фотоэффекта можно получить из (4.8), если скорость электрона, покидающего металл, приравнять к нулю:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad (4.9)$$

то есть красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода  $A$ . Учитывая что

$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ , из (4.9) получим значение предельной длины волны:

$$\lambda_0 = \frac{ch}{A}.$$

При длинах волн, больших  $\lambda_0$ , т. е. расположенных ближе к красным волнам, фотоэффект не наблюдается. Отсюда и название предельной длины волны  $\lambda_0$  — красная граница фотоэффекта.

## Фотоны. Энергия и импульс фотона

**Фотон** (обозначение —  $\gamma$ ) — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией, зависящей от частоты  $\nu$ :

$$E = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Эти свойства света были названы корпускулярными, а сама частица — фотоном.

Энергию фотона часто выражают через циклическую частоту  $\omega = 2\pi\nu$ . При этом вместо  $h$  используют величину  $\hbar$  (читается «аш с чертой»), равную  $\hbar = h/2\pi$ . Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Согласно теории относительности, энергия связана с массой соотношением  $E = mc^2$ . Поскольку энергия фотона равна  $h\nu$ , то его релятивистская масса  $m_p$  равна:

$$m_p = \frac{h\nu}{c^2} \quad (4.10)$$

Фотон лишен массы покоя  $m$ , т. е. он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость  $c$ . Масса, определяемая формулой (4.10), — это масса движущегося фотона. Зная массу и скорость фотона, определяют его импульс:

$$p = m_p c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Импульс фотона направлен по световому лучу. Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света. Энергия фотонов зеленого света составляет  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж. Тем не менее в своих замечательных опытах С. И. Вавилов установил, что человеческий глаз, этот тончайший из оптических приборов, чувствует освещенность, вызванную единицами квантов.

## Корпускулярно-волновой дуализм.

### Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц

**Корпускулярно-волновой дуализм** (от лат. *dualis* — двойственный) — важнейшее универсальное свойство природы, заключающееся в том, что всем микрообъектам присущи одновременно и корпускулярные, и волновые характеристики.

Так, например, электрон, нейтрон, фотон в одних условиях проявляют себя как частицы, движущиеся по классическим траекториям и обладающие определенной энергией и импульсом, а в других — обнаруживают свою волновую природу, характерную для явлений интерференции и дифракции частиц.

Впервые корпускулярно-волновой дуализм был установлен для света. Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия света с веществом подтверждены в многочисленных экспериментах. Однако целый ряд оптических явлений (поляризация, интерференция, дифракция) неопровержимо свидетельствуют о волновых свойствах света.

Классическая физика всегда четко разграничивала объекты, имеющие волновую природу (например, свет и звук), и объекты, имеющие дискретную корпускулярную структуру (например, системы материальных точек). Одно из наиболее значительных достижений современной физики — убеждение в ошибочности противопоставления волновых и квантовых свойств света. Рассматривая свет как поток фотонов, а фотоны — как кванты

электромагнитного излучения, обладающие одновременно и волновыми, и корпускулярными свойствами, современная физика смогла объединить, казалось бы, непримиримые теории — волновую и корпускулярную. В результате возникло представление о корпускулярно-волновом дуализме, лежащее в основе современной физики (корпускулярно-волновой дуализм является первичным принципом квантовой механики и квантовой теории поля).

**Квант света — не волна и не корпускула в понимании Ньютона. Фотоны — особые микрочастицы, энергия и импульс которых (в отличие от обычных материальных точек) выражаются через материальные характеристики — частоту и длину волны.**

В 1924 г. французский учёный Луи де Бройль высказал гипотезу о том, что корпускулярно-волновой дуализм присущ всем без исключения микрочастицам — электронам, протонам, атомам, причём количественные соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц те же, что и установленные ранее для фотонов. То есть если частица имеет энергию  $E$  и импульс, абсолютное значение которого равно  $p$ , то с этой частицей связана волна частотой  $\nu = E/h$  и длиной

$$\lambda = h/p, \quad (4.11)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Это знаменитая **формула де Бройля** — одна из основных в физике микромира.

Следует отметить, что длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы  $m$  и её скорость  $v$ : для частиц с  $v \ll c$  выполняется  $\lambda = h/mv$ . Так, частице массой 1 г, движущейся со скоростью 1 м/с, соответствует волна де Бройля длиной  $\lambda \approx 10^{-18}$  Å, настолько малой, что это недоступно наблюдению. Поэтому волновые свойства несущественны в механике макроскопических тел, что полностью согласуется с принципом соответствия.

## Дифракция электронов

Дифракция электронов была открыта американскими физиками К. Дэвиссоном и Л. Джермером. Они использовали электроны с энергией около 100 эВ (так называемые медленные электроны). Тонкий пучок электронов падал на грань монокристалла никеля нормально к её поверхности. Регистрация рассеянных под разными углами электронов показала наличие чётких максимумов, подобных тем, которые получают при дифракции рентгеновских лучей на монокристаллах. Монокристалл представляет для электронов, как и для рентгеновских лучей, своего рода дифракционную решётку. Аналогичный опыт в более поздней постановке выглядит следующим образом. Пучок электронов, движущихся с большой скоростью, направляется на тонкую поликристаллическую фольгу  $\Phi$  и, пройдя фольгу, попадает на люминесцирующий экран  $\mathcal{E}$  (рис. 176, а). На экране высвечиваются чёткие дифракционные кольца (рис. 176, б). На рис. 176, в представлена аналогичная фотография, полученная при облучении фольги рентгеновскими лучами. Вывод очевиден.

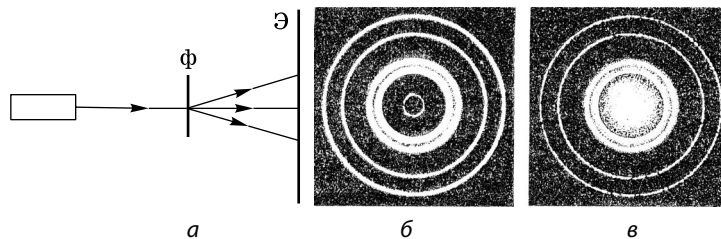


Рис. 176

Чтобы ответить на вопрос, присущи ли волновые свойства отдельному электрону (а не только потоку электронов, использованному в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера), Л. И. Биберман, Н. Т. Сушкин, В. А. Фабрикант провели опыт, в котором поток электронов был настолько слабым, что через прибор электроны проходили заведомо поодиночке. При большом времени экспозиции была получена такая же дифракционная картина, что и с пучком электронов большой интенсивности. Это говорит о том, что волновые свойства присущи и отдельному электрону, а не только пучку электронов. Была обнаружена также дифракция протонов, нейтронов, атомных и молекулярных пучков. Таким образом, гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Закончите предложение.

Испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения (фотонов) называется \_\_\_\_\_ .

♦ Заполните пропуски в уравнении Эйнштейна для фотоэффекта.

$$h \underline{\hspace{1cm}} = A + \underline{\hspace{1cm}}$$

♦ Запишите выражение для энергии фотона.

$$E_{\text{п}} =$$

♦ Заполните пропуск в формуле де Бройля.

$$\lambda = \frac{\hspace{1cm}}{p} .$$

Ответы на тестовые задания (неделя 34) \_\_\_\_\_

1 — 1. 2 — 1. 3 — 1. 4 — 2. 5 — 1. 6 — 4.



- 5.2. Физика атома
- 5.2.1. Планетарная модель атома
- 5.2.2. Постулаты Бора
- 5.2.3. Линейчатые спектры
- 5.2.4. Лазер

## ФИЗИКА АТОМА

### Планетарная модель атома

**Атом** — это наименьшая частица химического элемента, способная к самостоятельному существованию и обладающая его свойствами.

Каждому элементу соответствует определённый род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента. Например, атом кислорода обозначается символом О, атом водорода Н, атом гелия He.

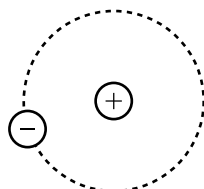
Атомы могут существовать в свободном состоянии (в виде отдельных атомов) в газах. В жидкостях и твёрдых телах они существуют в виде молекул, в которых соединяются с атомами того же элемента или других химических элементов (или, как принято говорить, существуют в связанном состоянии).

Со времен Демокрита (ок. 460–370 гг. до н.э.) и до конца XIX в. атом считался неделимой частицей — кирпичиком мироздания. После открытия электрона в 1897 г. английским учёным Дж. Дж. Томсоном стало ясно, что атом — сложная система.

С целью выяснения распределения положительного заряда в атоме английский учёный Э. Резерфорд исследовал рассеяние  $\alpha$ -частиц фольгой из различных веществ. Большинство  $\alpha$ -частиц беспрепятственно, почти без отклонений, проникало через фольгу, и только 1 из 2000 частиц отклонялась на углы, большие  $90^\circ$ . В результате этих экспериментов в 1911 г. Резерфорд предложил следующую модель строения атома.

Атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого обращаются электроны, каждый на своей орбите, подобно планетам Солнечной системы, обращающимся вокруг Солнца. Поэтому модель называют планетарной (рис. 177).

Расстояние от электронов до ядра очень велико по сравнению с размерами ядра. Оценки Резерфорда показали, что диаметр ядра составляет порядка  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  см. Размер самого атома  $10^{-8}$  см.



Атом водорода

Рис. 177

Положительный заряд ядра  $q_{\text{ядра}}$  связан с числом электронов  $Z$  в атоме соотношением:

$$q_{\text{ядра}} = +Z \cdot e,$$

где  $e$  — заряд электрона.

Заряд ядра и число электронов в атоме, соответственно, совпадает с порядковым номером  $Z$  элемента в таблице Д. И. Менделеева. В целом атом электронейтрален. При отрыве электрона от атома или присоединении электрона к атому (в результате столкновений, например, или при различных химических процессах) могут образоваться положительно или отрицательно заряженные ионы.

Простая и наглядная модель атома Резерфорда прекрасно объясняла результаты его опытов. Однако на основании этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Согласно законам электродинамики Максвелла электрон, движущийся по орбите с немалым ускорением, должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра, в результате чего в скором времени, потеряв в результате излучения всю энергию, упасть на ядро. Согласно расчётам, основанным на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, время это составляет всего  $10^{-8}$  с. В действительности ничего подобного не происходит. Нейтральные невозбуждённые атомы существуют неограниченно долго.

Это несоответствие опыта выводам теории связано с попыткой применения законов классической физики к внутриатомным явлениям (которые, как оказалось, подчиняются законам квантовой механики).

Выход из создавшейся в теории атома ситуации был найден датским физиком Нильсом Бором.

## Постулаты Бора

Основу квантовой теории атома Бора составляют два постулата.

**Первый постулат Бора:** атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия  $E_n$ ; в стационарном состоянии атом не излучает энергию.

Этот постулат противоречит классической механике, согласно которой энергия движущихся электронов может быть любой. Он противоречит также и электродинамике Максвелла, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

**Второй постулат Бора:** излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ . Энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

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

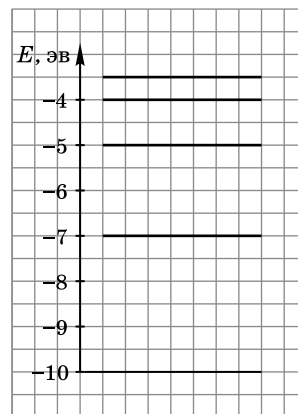
Отсюда можно получить частоту излучения:

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

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. На рисунке изображены энергии квантовых состояний (уровни энергии) атомной системы. Ниже перечислены некоторые значения энергий (в эВ) стационарных состояний  $E$  и энергий фотонов  $h\nu_{kn}$  излучения этой системы. Какие из них не противоречат постулатам Бора?



- 1)  $E_n = -9; -7,5$      $h\nu_{kn} = 6; 1,2$   
 2)  $E_n = -8; -6$      $h\nu_{kn} = 0,5; 1,8$   
 3)  $E_n = -7; -5$      $h\nu_{kn} = 3; 1$   
 4)  $E_n = -11; -5,5$      $h\nu_{kn} = -12; 2,5$

2. Главной отличительной особенностью излучения лазера по сравнению с естественными источниками света является

- 1) большая интенсивность излучения  
 2) спектральный состав  
 3) время излучения  
 4) когерентность излучения

3. Определите длину волны излучения, соответствующего переходу атома водорода из одного энергетического состояния в другое, разность в энергиях которых составляет  $3,027 \cdot 10^{-19}$  Дж. Ответ дайте в нм.

- 1) 561 нм  
 2) 654 нм  
 3) 454 нм  
 4) 351 нм

Для построения модели простейшей системы — атома водорода — Бор постулировал также правило определения стационарных значений энергии атома (уровней энергии) — так называемое правило квантования.

Правило квантования орбит Бора заключается в следующем.

**Стационарным состояниям атома соответствуют разрешённые дискретные значения энергии электрона, такие, что при движении по стационарным круговым орбитам электрон должен иметь дискретные значения момента количества движения:**

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $v$  — его скорость,  $r$  — радиус орбиты,  $h$  — постоянная Планка,  $n$  называется **главным квантовым числом** (является номером орбиты электрона в атоме).

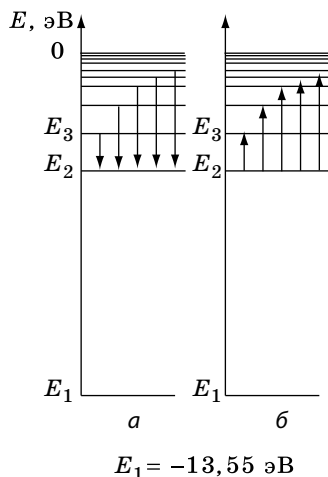


Рис. 178

Используя законы механики Ньютона и правило квантования, Бор вычислил допустимые радиусы орбит и значения энергии стационарных состояний. Минимальный радиус орбиты определяет размер атома (он оказался равным  $0,53 \cdot 10^{-10}$  м). Значения энергий стационарных состояний в электронвольтах отложены на вертикальной оси (рис. 178). (В атомной физике энергию выражают в электронвольтах, сокращённо — эВ. 1 эВ — это энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов 1 В.  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.)

Правило квантования орбит и постулаты Бора позволили ему самому и другим учёным объяснить наблюдавшиеся закономерности в оптическом спектре излучения атома водорода, а также в рентгеновских спектрах, и дать физическое истолкование Периодического закона элементов.

Поглощение света — процесс, обратный излучению, при котором атом с нижних энергетических уровней переходит на верхние уровни. При этом он поглощает излучение тех же частот, которые излучает при переходе с верхних энергетических уровней на нижние. На рис. 178, б стрелками изображены переходы атома из одних состояний в другие с поглощением света.

## Оптические спектры

**Спектр** (от лат. *spectrum* — представление, образ) — совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.

Чаще всего пользуются понятиями частотного спектра колебаний (в частности, электромагнитных), спектра энергий, импульсов и масс частиц. Спектр может быть непрерывным и дискретным (прерывистым).

Оптические спектры — спектры электромагнитных излучений в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Оптические спектры разделяют на спектры испускания, спектры поглощения (абсорбционные спектры), спектры рассеяния и спектры отражения.

Оптические спектры получают от источников света при разложении их излучения по длинам волн  $\lambda$  (или частотам  $\nu = c/\lambda$ , или волновым числам  $1/\lambda = \nu/c$ , которые тоже обозначают  $\nu$ ) с помощью спектральных приборов. Для характеристики распределения излучения по частотам вводят **спектральную плотность излучения**  $I(\nu)$ , равную **интенсивности излучения**  $I$ , приходящейся на единичный интервал частот (интенсивность излучения  $I$  — это плотность потока электромагнитного излучения, приходящегося на все частоты).

Интенсивность излучения, приходящаяся на небольшой спектральный интервал  $\Delta\nu$ , равна  $I(\nu)\Delta\nu$ . Суммируя подобные выражения по всем частотам спектра, получим плотность потока излучения  $I$ .

## Виды спектров

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Несмотря на это, все спектры можно разделить на три типа: непрерывные, линейчатые и полосатые спектры.

Линейчатые спектры состоят из отдельных спектральных линий (рис. 179); это означает, что вещество излучает свет определённых длин волн в определённых, очень узких спектральных интервалах. Каждая линия имеет конечную ширину.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае излучают атомы, не взаимодействующие друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы излучают строго определённые длины волн, характерные для данного типа атомов.

Классическим примером линейчатого спектра является спектр атома водорода.

**Спектральные закономерности в спектре атома водорода.** Все частоты излучений атома водорода составляют ряд серий, каждая из которых образуется при переходе атома в одно из энергетических состояний из всех верхних энергетических состояний, т. е. состояний с большей энергией, пользуясь терминологией спектроскопии — переходов электрона с верхних возбуждённых уровней энергии на нижние уровни. На рис. 178, а изображены переходы на второй возбуждённый энергетический уровень, составляющие *серию Бальмера*, частоты излучения которой лежат в видимой области спектра. Серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который ещё в 1885 г. на основе экспериментальных результатов вывел простую формулу для определения частот видимой части спектра водорода:

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4.12)$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots$ ;  $R$  — постоянная Ридберга, определённая из спектральных данных и позднее вычисленная на основе теории атома Бора. В этой формуле  $\nu$  — не частота, измеряемая в  $\text{с}^{-1}$ , а *волновое число*, равное обратному значению длины волны  $1/\lambda$  и измеряемое в  $\text{м}^{-1}$ .

Для определения частот излучения других серий атома водорода вместо двойки в знаменателе первой дроби в формуле (4.12) нужно поставить числа 1, 3, 4, 5.

## Лазер

**Лазер** (оптический квантовый генератор, аббревиатура английской фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, означающей «усиление света вынужденным излучением») — это устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

В обычных источниках света (нагретые тела — лампы накаливания и др.) атомы получают энергию за счёт возбуждения валентных электронов, находящихся на внешних электронных оболочках. Перейдя в возбуждённое состояние, электрон атома примерно через  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с без какого-либо внешнего воздействия, спонтанно (самопроизвольно)

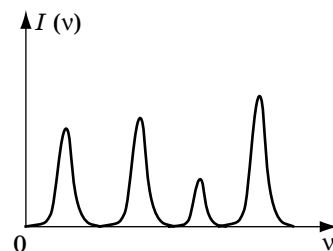


Рис. 179

возвращается в основное состояние, излучая фотон. Атомы возбуждаются и излучают фотоны независимо друг от друга, поэтому излучаемые ими фотоны некогерентны друг с другом.

Возможными процессами взаимодействия атома с фотоном, энергия которого равна разности энергий основного  $E_1$  и возбуждённого  $E_2$  состояний (уровней энергии) атома  $h\nu = E_2 - E_1$ , являются следующие.

**1. Поглощение света.** Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией  $E_1$ , может поглотить фотон, перейдя в возбуждённое состояние с энергией  $E_2 > E_1$  (рис. 180, а). Интенсивность поглощённого излучения пропорциональна концентрации  $n_1$  атомов, находящихся в основном состоянии.

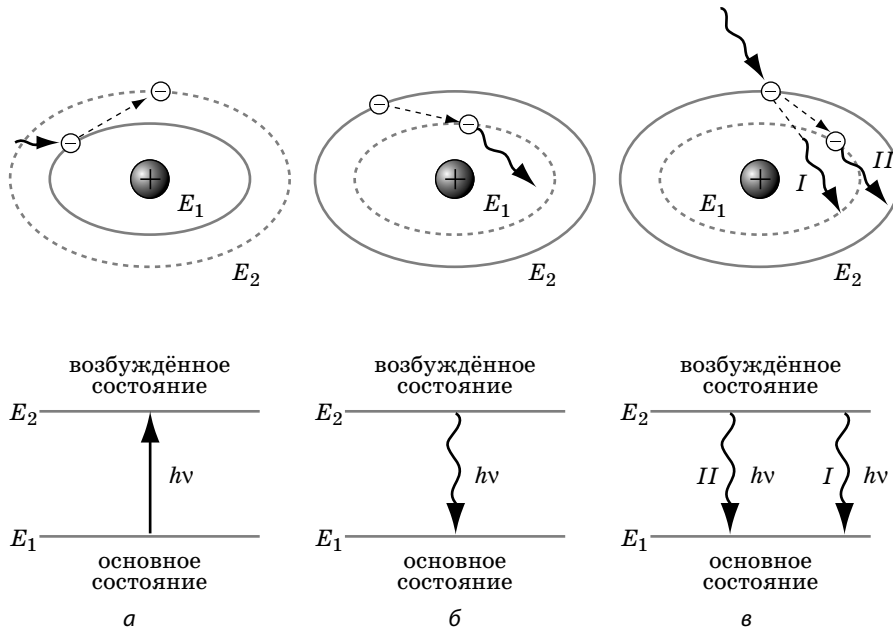


Рис. 180

**2. Спонтанное излучение.** В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбуждённом состоянии, через интервал времени порядка  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с спонтанно (самопроизвольно) возвращается в основное состояние, излучая фотон (рис. 180, б).

Спонтанное излучение — это излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.

Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, т. к. каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

**3. Индуцированное излучение.** В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбуждённый атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 180, в).

Индуцированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации  $n_2$  атомов, находящихся в возбуждённом состоянии. При этом световая волна, возникающая при индуцированном излучении, имеет ту же частоту, поляризацию, фазу и направление распространения, что и падающая на атом волна. Это означает, что интенсивность падающего излучения увеличивается, т. е. возникает оптическое усиление.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

♦ Запишите постулаты Бора.

1. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

♦ Запишите выражение для частоты излучения при переходе атома из состояния  $E_k$  в состояние  $E_n$ .

♦ Заполните пропуск в формуле Бальмера для определения частот видимой части спектра.

$$\nu = R \left( \text{---} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Ответы на тестовые задания (неделя 35)

1 — 3. 2 — 4. 3 — 2.

# НЕДЕЛЯ 36

## Элементы содержания, проверяемые на ЕГЭ:

- 5.3. Физика атомного ядра
- 5.3.1. Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение
- 5.3.2. Закон радиоактивного распада
- 5.3.3. Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра
- 5.3.4. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы
- 5.3.5. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

## ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

### Состав ядра

**Атомное ядро** — это центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов (которые вместе называются нуклонами).

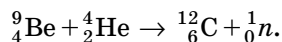
Ядро было открыто Э. Резерфордом в 1911 г. при исследовании прохождения  $\alpha$ -частиц через вещество. Оказалось, что почти вся масса атома (99,95%) сосредоточена в ядре. Размер атомного ядра имеет порядок величины  $10^{-13}$ – $10^{-12}$  см, что в 10 000 раз меньше размера электронной оболочки.

Предложенная Э. Резерфордом планетарная модель атома и экспериментальное наблюдение им ядер водорода, выбитых  $\alpha$ -частицами из ядер других элементов (1919–1920 гг.), привели учёного к представлению о протоне.

**Протон** (в переводе с греч. — «первый», символ  $p$ ) — положительно заряженная частица, заряд которой по абсолютной величине равен заряду электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона. Масса покоя протона  $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,007276470 а.е.м.

**Нейтрон** (от лат. *neuter* — ни тот, ни другой, символ  $n$ ) — это элементарная частица, не имеющая заряда, т. е. нейтральная. Масса нейтрона в 1839 раз превышает массу электрона. Масса нейтрона почти равна (незначительно больше) массе протона: масса покоя свободного нейтрона  $m_n = 1,6749286 \times 10^{-27}$  кг = 1,0008664902 а.е.м. и превосходит массу протона на 2,5 массы электрона. Нейтроны и протоны имеют общее название **нуклоны**.

Нейтрон был открыт в 1932 г. учеником Э. Резерфорда Д. Чедвиком при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами. Возникающее при этом излучение с большой проникающей способностью (преодолеvalo преграду из свинцовой пластины толщиной 10–20 см) усиливало своё действие при прохождении через парафиновую пластину. Оценка энергии этих частиц по трекам в камере Вильсона, сделанная супругами Жолио-Кюри, и дополнительные наблюдения позволили исключить первоначальное предположение о том, что это  $\gamma$ -кванты. Большая проникающая способность новых частиц, названных нейтронами, объяснялась их электронейтральностью. Ведь заряженные частицы активно взаимодействуют с веществом и быстро теряют свою энергию. Существование нейтронов было предсказано Э. Резерфордом за 10 лет до опытов Д. Чедвика. При попадании  $\alpha$ -частиц ( $\alpha$ -частица — ядро изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ ) в ядра бериллия происходит следующая реакция:



Здесь  ${}_0^1n$  — символ нейтрона; заряд его равен нулю, а относительная атомная масса приблизительно равна единице. Нейтрон — нестабильная частица: свободный нейтрон за время ~15 мин распадается на протон, электрон и нейтрино.

После открытия Дж. Чедвиком нейтрона в 1932 г. Д. Иваненко и В. Гейзенберг независимо друг от друга предложили **протонно-нейтронную (нуклонную) модель ядра**. Согласно этой модели ядро состоит из протонов и нейтронов. Число протонов  $Z$  совпадает с порядковым номером элемента в таблице Д. И. Менделеева.

**Заряд ядра  $Q$**  определяется числом протонов  $Z$ , входящих в состав ядра, и кратен абсолютной величине заряда электрона  $e$ :

$$Q = +Ze.$$

Число  $Z$  называется **зарядовым числом ядра**, или **атомным номером**.

**Массовым числом ядра  $A$**  называется общее число нуклонов, т. е. протонов и нейтронов, содержащихся в нём. Число нейтронов в ядре обозначается буквой  $N$ . Таким образом, массовое число равно:

$$A = Z + N.$$

Нуклонам (протону и нейтрону) приписывается массовое число, равное единице, электрону — нулевое значение.

Представлению о составе ядра содействовало также открытие **изотопов**.

**Изотопы** (в переводе с греч. — «равный, одинаковый» и «место») — это разновидности атомов одного и того же химического элемента, атомные ядра которых имеют одинаковое число протонов ( $Z$ ) и различное число нейтронов ( $N$ ).

Изотопами называются также ядра таких атомов. Изотопы являются нуклидами одного элемента. **Нуклид** (от лат. *nucleus* — ядро) — **любое атомное ядро (соответственно, атом) с заданными числами  $Z$  и  $N$** . Общее обозначение нуклидов имеет вид  ${}_Z^AX_N$ , где  $X$  — символ химического элемента,  $A = Z + N$  — массовое число.

Изотопы занимают одно и то же место в Периодической системе элементов, откуда и произошло их название. По своим ядерным свойствам (например, по способности вступать в ядерные реакции) изотопы, как правило, существенно отличаются. Химические (и почти в той же мере физические) свойства изотопов одинаковы. Это объясняется тем, что химические свойства элемента определяются зарядом ядра, поскольку именно он влияет на структуру электронной оболочки атома.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. В реакции  ${}_{25}^{55}\text{Mn} + ? \rightarrow {}_{26}^{55}\text{Fe} + {}_0^1n$  вместо вопросительного знака следует вписать

- 1)  ${}_2^4\text{He}$                       3)  $\beta$   
2)  ${}_1^1\text{H}$                       4)  ${}_2^1\text{H}$

2. Радиоактивный изотоп технеция  ${}_{43}^{95}\text{Tc}$ , не обнаруженный в природе, был получен искусственно в результате реакции:  ${}_{42}^{94}\text{Mo} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_{43}^{95}\text{Tc} + ?$ , в которой вместо «?» следует вставить

- 1)  ${}_1^1p$                       3)  ${}_2^4\text{He}$   
2)  ${}_0^1n$                       4)  ${}_1^1\text{H}$

3. Количество радиоактивного радона уменьшилось в 8 раз за 11,4 дня. Каков период полураспада радона?

- 1) 2 дня  
2) 4 дня  
3) 3,5 дня  
4) 3,8 дня

4. Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найти период полураспада. Ответ дать в днях.

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

5. В реакции  ${}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_2^4\text{He} \rightarrow ? + {}_0^1n$  вместо знака «?» следует вписать

- 1)  ${}_{96}^{242}\text{Pu}$                       3)  ${}_2^4\text{He}$   
2)  ${}_{96}^{242}\text{Cm}$                       4)  $\beta$

6. В реакции  ${}_1^2\text{H} + \gamma \rightarrow {}_1^1\text{H} + ?$  вместо «?» следует вписать

- 1)  ${}_0^1n$                       3)  $\gamma$   
2)  ${}_2^4\text{He}$                       4)  ${}_1^1\text{H}$



Исключением являются изотопы лёгких элементов. Изотопы водорода  ${}^1_1\text{H}$  — **протий**,  ${}^2_1\text{H}$  — **дейтерий**,  ${}^3_1\text{H}$  — **тритий** столь сильно отличаются по массе, что и их физические и химические свойства различны. Дейтерий стабилен (т.е. не радиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется тяжёлая вода. Она при нормальном атмосферном давлении кипит при 101,2 °С и замерзает при +3,8 °С. Тритий  $\beta$ -радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет.

У всех химических элементов имеются изотопы. У некоторых элементов имеются только нестабильные (радиоактивные) изотопы. Для всех элементов искусственно получены радиоактивные изотопы.

У урана есть два изотопа — с массовыми числами 235 и 238. Изотоп  ${}^{235}_{92}\text{U}$  составляет всего 1/140 часть от более распространённого  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

## Ядерные силы

Поскольку протоны в ядре имеют одинаковый положительный заряд, они отталкиваются. Для того чтобы удержать их вместе, должны существовать силы, намного превышающие силы электрического взаимодействия. Эти силы называются **ядерными силами**. Они в 100 раз превосходят электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействие ядерных частиц относят к сильным взаимодействиям — особому типу взаимодействия, присущему большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях порядка  $10^{-13}$ – $10^{-12}$  см, равных по порядку величины размерам ядра, что показали опыты Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц ядрами.

## Энергия связи нуклонов в ядре

Устойчивость атомного ядра характеризуется энергией связи ( $E_{\text{св}}$ ). *Энергия связи* — это энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро. Её принято выражать в мегаэлектронвольтах (МэВ) ( $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ ).

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что **энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц**. Энергия связи атомных ядер очень велика. Определить её можно, применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:  $E = mc^2$ .

Точнейшие измерения показывают, что масса покоя ядра  $M_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс покоя составляющих её протонов и нейтронов:  $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$ . Существует положительная разность масс, называемая **дефектом массы**:  $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ . Для гелия масса ядра на 0,75 % меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Для одного моля гелия  $\Delta M = 0,03 \text{ г}$ .

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов на значение энергии связи  $E_{\text{св}}$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2.$$

Энергия связи переходит в энергию излучаемых при ядерных превращениях  $\gamma$ -квантов, которая равна как раз  $E_{\text{св}}$ , и масса которых  $\Delta M = E_{\text{св}}/c^2$ .

**Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра.** Её определяют экспериментально.

## Радиоактивность

**Радиоактивность** (от лат. *radio* — излучаю и *activus* — деятельный) — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав — заряд  $Z$ , массовое число  $A$  путём испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов.

Явление радиоактивности было открыто А. Беккерелем в 1896 г. при его исследованиях люминесценции солей урана: он обнаружил спонтанное испускание неизвестного излучения. Исследование других химических элементов на предмет радиоактивности позволило в 1898 г. Марии Склодовской-Кюри во Франции (и другим учёным) обнаружить свечение тория, а затем выделить неизвестный ранее элемент — полоний. Спустя некоторое время был открыт элемент радий, дающий очень интенсивное излучение. Явление самопроизвольного излучения по предложению Марии и Пьера Кюри было названо радиоактивностью. Вскоре Э. Резерфорд и супруги Кюри установили, что радиоактивное излучение состоит из лучей трёх видов:  $\alpha$ -лучей, состоящих из положительных  $\alpha$ -частиц (являющихся ядрами гелия),  $\beta$ -лучей, или отрицательно заряженных  $\beta$ -частиц (которые оказались электронами), и  $\gamma$ -лучей, не имеющих заряда, которые оказались  $\gamma$ -квантами (жёстким электромагнитным излучением). Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, изображён на рис. 181. На излучение препарата радия, помещённого на дно узкого канала в куске свинца, действовало сильное магнитное поле с линиями индукции, перпендикулярными лучу. Перпендикулярно каналу располагалась фотопластинка. Вся установка размещалась в вакууме. По отклонению луча определялся заряд частиц, его составляющих.

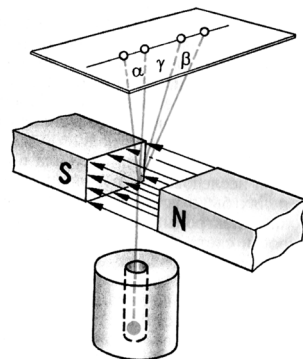


Рис. 181

### Гамма-лучи

То, что это электромагнитная волна, было доказано опытами по дифракции на кристаллах. В ходе этих опытов была определена длина волны  $\gamma$ -лучей: от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  см. Их проникающая способность гораздо выше, чем у рентгеновских лучей. На шкале электромагнитных волн  $\gamma$ -лучи следуют непосредственно за рентгеновскими. Скорость распространения, как у всех электромагнитных волн, — 300 000 км/с.

### Бета-лучи

Бета-лучи были идентифицированы как электроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, по сильному отклонению как в магнитном, так и электрическом поле. Скорости  $\beta$ -частиц, испущенных радиоактивным элементом, различны, что приводит к расширению пучка (рис. 181).

### Альфа-частицы

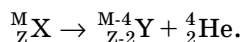
Альфа-частицы отклоняются в магнитном и электрическом полях меньше других, что затрудняло их идентификацию. Окончательно природу  $\alpha$ -частиц удалось выяснить Э. Резерфорду. С помощью экспериментов в магнитном поле он определил соотношение заряда и массы. С помощью счётчика Гейгера измерил количество частиц, испущенных препаратом за определённое время, а с помощью электрометра определил их суммарный заряд, рассчитав, таким образом, заряд одной  $\alpha$ -частицы (+2). Экспериментально природа альфа-частиц была подтверждена с помощью спектрального анализа газа, образовавшегося за несколько дней в резервуаре, в котором Резерфорд собирал  $\alpha$ -частицы. Каждая  $\alpha$ -частица захватывала два электрона и превращалась в гелий.

## Радиоактивные превращения. Альфа-, бета-, гамма-распад

В процессе исследования явления радиоактивности обнаружилось, что радиоактивные элементы в результате испускания радиоактивного излучения превращаются в другие элементы. При радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов.

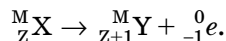
После того как было открыто атомное ядро, сразу стало ясно, что именно оно претерпевает превращения при радиоактивных распадах. Ведь на электронных оболочках нет  $\alpha$ -частиц, а уменьшение числа электронов оболочки превращает атом в ион, а не в новый химический элемент.

Превращения ядер подчиняются так называемому **правилу смещения**, сформулированному впервые Ф. Содди: **при  $\alpha$ -распаде ядро теряет положительный заряд  $2e$ , и масса его убывает приблизительно на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу Периодической системы.**



Здесь элемент обозначается общепринятыми символами. Заряд ядра указывается в виде индекса внизу слева от символа элемента, а атомная масса — в виде индекса слева сверху символа. Для  $\alpha$ -частицы, являющейся ядром атома гелия, применяют обозначение  ${}^4_2\text{He}$ .

При  $\beta$ -распаде атом теряет электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, масса остаётся почти неизменной:



Здесь  ${}^0_{-1}e$  обозначает электрон: индекс 0 сверху означает, что масса его очень мала по сравнению с атомной единицей массы. **После  $\beta$ -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу Периодической системы.**

Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приближенно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде ядра обычно тоже радиоактивны.

## Закон радиоактивного распада. Период полураспада

Резерфорд, исследуя превращения радиоактивных веществ, установил опытным путём, что их активность убывает с течением времени<sup>1</sup>. Так, активность радона убывает в два раза уже через одну минуту. Активность урана, тория и радия тоже убывает со временем, но гораздо медленнее. Происходящий со временем спад активности характеризуется периодом полураспада. **Период полураспада  $T$**  — это время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.

Математически **закон радиоактивного распада** выражается формулой:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (4.13)$$

Здесь  $N_0$  — число радиоактивных атомов в начальный момент времени  $t = 0$ . По формуле (4.13) находят число нераспавшихся атомов  $N$  в любой момент времени.

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Для разных веществ эта скорость может отличаться очень существенно. Так, период полураспада урана равен 4,5 млрд лет, радия — 1600 лет, в то же время есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

<sup>1</sup> Под активностью понимают число ядер, распадающихся в единицу времени.

Следует отметить, что радиоактивный распад — статистический процесс. Радиоактивные атомы не «стареют». Нельзя сказать, какой именно атом распадется в данный момент времени. Можно определить лишь среднее время жизни  $\tau$  ( $\tau = \frac{T}{\ln 2}$ ) большого числа атомов. Закон радиоактивного распада определяет среднее число атомов, распадающихся за определённый интервал времени.

Говорить о законе радиоактивного распада для малого числа атомов не имеет смысла. Этот закон справедлив в среднем для большого количества частиц.

## Экспериментальные методы регистрации элементарных частиц

Методы основаны на использовании систем в долгоживущем неустойчивом состоянии, в которых под действием пролетающей заряженной частицы происходит переход в устойчивое состояние.

**Счетчик Гейгера** — детектор частиц, действие которого основано на возникновении самостоятельного электрического разряда в газе при попадании частицы в его объём. Изобретён в 1908 г. Х. Гейгером и Э. Резерфордом, позднее был усовершенствован Гейгером и Мюллером.

**Камера Вильсона** — трековый (от англ. *track* — след, траектория) детектор частиц.

Создана Ч. Вильсоном в 1912 г. С помощью камеры Вильсона был сделан ряд открытий в ядерной физике и физике элементарных частиц, таких как открытие широких атмосферных ливней (в области космических лучей) в 1929 г., позитрона в 1932 г., обнаружение следов мюонов, открытие странных частиц. В дальнейшем камера Вильсона была практически вытеснена пузырьковой камерой как более быстродействующей.

**Пузырьковая камера** — прибор для регистрации следов (треков) заряженных частиц, действие которого основано на вскипании перегретой жидкости вдоль траектории частицы.

Первая пузырьковая камера (1954 г.) представляла собой металлическую камеру со стеклянными окнами для освещения и фотографирования, заполненную жидким водородом. В дальнейшем она создавалась и совершенствовалась во всех лабораториях мира, оснащенных ускорителями заряженных частиц. От колбочки объёмом 3 см<sup>3</sup> размер пузырьковой камеры достиг нескольких кубических метров. Большинство пузырьковых камер имеют объём 1 м<sup>3</sup>. За изобретение пузырьковой камеры Д. А. Глазеру в 1960 г. была присуждена Нобелевская премия.

Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры составляет 0,1 с. Преимущество её перед камерой Вильсона — в большей плотности рабочего вещества, позволяющей регистрировать частицы больших энергий.

## Ядерные реакции

**Ядерные реакции** — это процессы, идущие при столкновении ядер или элементарных частиц с другими ядрами, в результате которых изменяются квантовое состояние и нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции.

При этом возможны реакции деления, когда ядро одного атома в результате бомбардировки (например, нейтронами) делится на два ядра разных атомов. При реакциях синтеза происходит превращение лёгких ядер в более тяжёлые.

**Искусственное превращение атомных ядер.** Впервые в истории человечества искусственное (целенаправленное) превращение ядер осуществил Резерфорд в 1919 г. Бомбардируя  $\alpha$ -частицами большой энергии, испускаемыми радием, ядра атома азота  $^{14}_7\text{N}$ , Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода. В первых опытах регистрация

протонов проводилась методом сцинтилляций, позднее, более точно — в камере Вильсона. При этом ядро атома азота превращается в ядро изотопа кислорода:



Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием  $\alpha$ -частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др., сопровождающиеся испусканием протонов. Ядра тяжёлых элементов не испытывали превращений. Очевидно, что их большой электрический заряд не позволял  $\alpha$ -частице приблизиться к ядру вплотную.

### Ядерная реакция на быстрых протонах

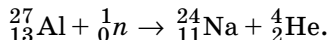
Для осуществления ядерной реакции необходимо приближение частиц вплотную к ядру, что возможно для частиц с очень большой энергией (особенно для положительно заряженных частиц, которые отталкиваются от ядра). Такая энергия (до  $10^5$  МэВ) сообщается в ускорителях заряженных частиц протонам, дейтронам и др. частицам. Этот метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивным элементом (энергия которых составляет около 9 МэВ).

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две  $\alpha$ -частицы:



### Ядерные реакции на нейтронах

Открытие нейтронов явилось поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Лишённые заряда нейтроны беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения, например:



Великий итальянский физик Энрико Ферми обнаружил, что медленные нейтроны (около  $10^4$  эВ) более эффективны в реакциях ядерных превращений, чем быстрые нейтроны (около  $10^5$  эВ). Поэтому быстрые нейтроны замедляют в обыкновенной воде, содержащей большое число ядер водорода — протонов. Эффект замедления объясняется тем, что при столкновении шаров одинаковой массы происходит наиболее эффективная передача энергии.

### Законы сохранения заряда, массового числа и энергии

Многочисленные эксперименты по различного рода ядерным взаимодействиям показали, что во всех без исключения случаях сохраняется **суммарный электрический заряд частиц**, участвующих во взаимодействии. Другими словами, суммарный электрический заряд частиц, вступающих в ядерную реакцию, равен суммарному электрическому заряду продуктов реакции (как это и следует ожидать согласно закону сохранения заряда для замкнутых систем). Кроме того, в ядерных реакциях обычного типа (без образования античастиц) наблюдается сохранение массового ядерного числа (т.е. полного числа нуклонов).

Сказанное подтверждается всеми приведёнными выше типами реакций (суммы соответствующих коэффициентов при ядрах с левой и правой сторон уравнений реакции равны), см. табл. 4. Оба закона сохранения относятся также и к ядерным превращениям типа радиоактивных распадов. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

**Энергетическим выходом реакции** называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно сказанному ранее энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Сохранение заряда и массового числа

Реакция	Электрический заряд	Массовое число
${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$	$4 + 2 = 6 + 0$	$9 + 4 = 12 + 1$
${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$	$7 + 2 = 8 + 1$	$14 + 4 = 17 + 1$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	$3 + 1 = 2 + 2$	$7 + 1 = 4 + 4$
${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$	$13 + 0 = 11 + 2$	$27 + 1 = 24 + 4$
${}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + {}^0_{-1}\text{e}$	$92 = 93 - 1$	$239 = 239 + 0$
${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^0_{-1}\text{e}$	$93 = 94 - 1$	$239 = 239 + 0$

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии, в противном случае — о её поглощении. Последний случай осуществляется при бомбардировке азота  $\alpha$ -частицами (4.14), часть энергии переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшихся ядер. При ядерной реакции (4.15) кинетическая энергия образовавшихся ядер гелия на 17,3 МэВ больше кинетической энергии вступившего в реакцию протона.

## Деление и синтез ядер

**Деление ядер** — процесс, при котором из одного атомного ядра возникают два (реже три) ядра-осколка, близких по массе.

Этот процесс выгоден для всех  $\beta$ -стабильных ядер с массовым числом  $A > 100$ .

Деление ядер урана было обнаружено в 1939 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом, которые однозначно доказали, что при бомбардировке нейтронами ядер урана  $U$  появляются радиоактивные ядра с массами и зарядами, примерно в два раза меньшими, чем масса и заряд ядра  $U$ . В том же году Л. Мейтнер и О. Фриш ввели термин «деление ядер» и отметили, что при этом выделяется огромная энергия, а Ф. Жолио-Кюри и Э. Ферми одновременно обнаружили, что при делении происходит испускание нескольких нейтронов (*нейтроны деления*). На основании этого была выдвинута идея **самоподдерживающейся цепной реакции деления** и использования деления ядер в качестве источника энергии. Основой современной ядерной энергетики служит деление ядер  ${}^{235}\text{U}$  и  ${}^{239}\text{Pu}$  под действием нейтронов.

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжёлого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении.

Механизм деления ядра объясняется на основе капельной модели, согласно которой сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 182). Ядро удерживают от распада ядерные силы притяжения, большие, чем силы кулоновского отталкивания, действующие между протонами и стремящиеся разорвать ядро.

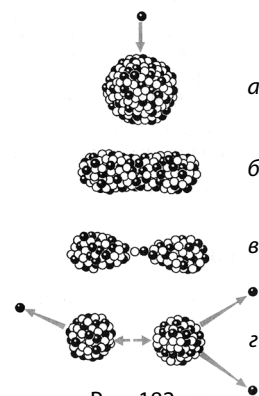


Рис. 182

Ядро  $^{235}\text{U}$  имеет форму шара. После поглощения нейтрона оно возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 182, б), и растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не станут больше сил притяжения, действующих в перешейке (рис. 182, в). После этого ядро разрывается на две части (рис. 182, г). Осколки под действием кулоновских сил отталкивания разлетаются со скоростью, равной  $1/30$  скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления, о котором говорилось выше, объясняется тем, что относительное число нейтронов (по отношению к числу протонов) в ядре растёт с увеличением атомного номера, и для образовавшихся при делении осколков число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов с меньшими номерами.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Эти осколки радиоактивны. После серии  $\beta$ -распадов в конце концов получаются стабильные ионы.

Кроме вынужденного, описанного выше, существует и *спонтанное деление ядер урана*, открытое в 1940 г. советскими физиками Г. Н. Флёровым и К. А. Петряком. Период полураспада для спонтанного деления равен  $10^{16}$  лет, что в два миллиона раз больше периода полураспада при  $\alpha$ -распаде урана.

Синтез ядер осуществляется в термоядерных реакциях. **Термоядерные реакции** — это реакции слияния лёгких ядер при очень высокой температуре. Выделяющаяся при слиянии (синтезе) энергия оказывается наибольшей при синтезе лёгких элементов, обладающих минимальной энергией связи. При соединении двух лёгких ядер, например дейтерия и трития, образуется более тяжёлое ядро гелия с большей энергией связи:



При таком процессе ядерного синтеза выделяется значительная энергия (17,6 Мэв), равная разности энергий связи тяжёлого ядра  ${}^4_2\text{He}$  и двух лёгких ядер  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$ . Образующийся при реакциях нейтрон приобретает 70% этой энергии. Сравнение энергии, приходящейся на один нуклон в реакциях ядерного деления (0,9 Мэв) и синтеза (17,6 Мэв), показывает, что реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых.

Слияние ядер происходит под действием сил ядерного притяжения, поэтому они должны сблизиться до расстояний, меньших  $10^{-14}$  м, на которых действуют ядерные силы. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Оно может быть преодолено только за счёт большой кинетической энергии ядер, превышающей энергию их кулоновского отталкивания. Соответствующие расчёты показывают, что кинетическая энергия ядер, необходимая для реакции синтеза, может быть достигнута при температурах порядка сотен миллионов градусов, поэтому эти реакции называются *термоядерными*.

**Термоядерный синтез** — реакция, в которой при высокой температуре, большей  $10^7$  °К, из лёгких ядер синтезируются более тяжёлые.

Термоядерный синтез — источник энергии всех звёзд, в том числе и Солнца.

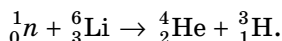
Основным процессом, при котором происходит освобождение термоядерной энергии в звёздах, является превращение водорода в гелий. За счёт дефекта массы в этой реакции масса Солнца уменьшается каждую секунду на 4 млн тонн.

Большую кинетическую энергию, необходимую для термоядерного синтеза, ядра водорода получают в результате сильного гравитационного притяжения к центру звезды. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжёлые элементы.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, излучаемой звёздами в виде света на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемого термоядерного синтеза предоставило бы человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. И дейтерий, и тритий, необходимые для его осуществления (4.16), вполне доступны. Первый содержится в воде морей и океанов

(в количестве, достаточном для использования в течение миллиона лет), второй может быть получен в ядерном реакторе при облучении жидкого лития (запасы которого огромны) нейтронами:



Одним из важнейших преимуществ управляемого термоядерного синтеза является отсутствие радиоактивных отходов при его осуществлении (в отличие от реакций деления тяжёлых ядер урана).

Главным препятствием на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза является невозможность удержания высокотемпературной плазмы с помощью сильных магнитных полей в течение 0,1–1 с. Однако существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной бомбе.

### Цепные ядерные реакции

**Цепные ядерные реакции** — это ядерные реакции, в которых частицы, вызывающие их, образуются и как продукты этих реакций. Такой реакцией является деление урана и некоторых трансурановых элементов (например,  ${}^{239}\text{Pu}$ ) под действием нейтронов. Впервые она была осуществлена Э. Ферми в 1942 г. После открытия *деления ядер* У. Зинн, Л. Силард и Г. Н. Флеров показали, что при делении ядра урана U вылетает больше одного нейтрона:  $n + \text{U} \rightarrow \text{A} + \text{B} + \nu$ . Здесь A и B — осколки деления с массовыми числами A от 90 до 150,  $\nu$  — число вторичных нейтронов.

Для течения цепной реакции необходимо, чтобы среднее число освобождённых нейтронов в данной массе урана не уменьшалось со временем либо чтобы коэффициент размножения нейтронов  $k$  был больше единицы или равен ей.

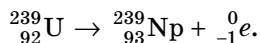
**Коэффициентом размножения нейтронов** называют отношение числа нейтронов в каком-либо поколении к числу нейтронов предшествующего поколения. Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого поколения и рождаются новые нейтроны.

Если  $k \geq 1$ , то число нейтронов увеличивается с течением времени или остаётся постоянным, и цепная реакция идёт. При  $k < 1$  число нейтронов убывает, и цепная реакция невозможна.

В силу ряда причин из всех ядер, встречающихся в природе, для осуществления цепной ядерной реакции пригодны лишь ядра изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Коэффициент размножения определяется: 1) захватом медленных нейтронов ядрами  ${}^{235}_{92}\text{U}$  с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , также с последующим делением; 2) захватом нейтронов без деления ядрами урана; 3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем и конструктивными элементами установки; 4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

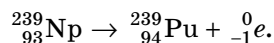
Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов. Для стационарного течения реакции  $k$  должно быть равно 1. Уже при  $k = 1,01$  почти мгновенно произойдёт взрыв.

**Образование плутония.** В результате захвата изотопом урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  нейтрона образуется радиоактивный изотоп  ${}^{239}_{92}\text{U}$  с периодом полураспада 23 мин. При распаде возникает первый трансурановый элемент нептуний:





$\beta$ -Радиоактивный нептуний (с периодом полураспада около двух дней), испуская электрон, превращается в следующий трансурановый элемент — плутоний:



Период полураспада плутония 24 000 лет, и его важнейшим свойством является способность делиться под влиянием медленных нейтронов так же, как и изотоп  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . С помощью плутония может быть осуществлена цепная реакция с выделением огромного количества энергии.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии: при делении каждого ядра выделяется 200 МэВ. При делении 1 г ядер урана выделяется такая же энергия, как при сжигании 3 т угля или 2,5 т нефти.

---

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

---

- ♦ Заполните пропуски в выражении для закона радиоактивного распада.

$$N = \underline{\hspace{2cm}} \cdot 2^{\frac{-t}{T}}$$

- ♦ Запишите выражение для энергии связи нуклонов в ядре.

$$E_{\text{св}} =$$

- ♦ Заполните схему.

Виды радиоактивного распада		
${}_Z^MX \rightarrow {}_{Z-2}^{M-4}Y + {}_2^4\text{He}$	${}_Z^MX \rightarrow {}_{Z+1}^MY + {}_{-1}^0e$	

Ответы на тестовые задания (неделя 36)

1 — 2. 2 — 2. 3 — 4. 4 — 1. 5 — 2. 6 — 1.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАЗДЕЛАМ «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ», «КВАНТОВАЯ ФИЗИКА»

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМАМ «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

Ответами к заданиям 1—7 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Специальная теория относительности рассматривает физические процессы, происходящие:  
1) в любых системах отсчёта  
2) в гравитационном поле  
3) только в неинерциальных системах отсчёта  
4) только в инерциальных системах отсчёта  
5) в отсутствии гравитационных полей  
Выберите **два** верных утверждения, касающихся СТО.  
Ответ: ☐ ☐
2. Одним из выводов СТО является относительность расстояний, измеренных в двух системах отсчёта, движущихся друг относительно друга с некоторой постоянной скоростью. Пусть с одной из этих систем (неподвижной) связано тело. В какой из систем (**неподвижной** или **движущейся** относительно тела) **длина тела будет больше?** Ответ запишите словом.  
Ответ: \_\_\_\_\_.
3. Следствием постулатов СТО является «относительность одновременности», означающая, что  
1) промежуток времени между двумя событиями, отсчитываемый в разных инерциальных системах отсчёта, не зависит от скорости движения систем координат  
2) длительность события оказывается наименьшей в неподвижной системе отсчёта  
3) длительность события оказывается наибольшей в неподвижной системе отсчёта  
4) чем больше относительная скорость движения двух систем, тем больше разница в длительности событий, измеренных в этих системах  
Выберите **два** верных утверждения из предложенного перечня.  
Ответ: ☐ ☐
4. Формула Эйнштейна, первая из двух великих формул физики, устанавливает связь между скоростью света, массой тела и его **кинетической энергией, полной энергией** или **энергией покоя?** Ответ запишите словами.  
Ответ: \_\_\_\_\_.
5. Постулат СТО о постоянстве скорости света в вакууме — скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО — в частности означает, что  
1) скорость света во всех веществах одинакова  
2) скорость света не зависит от длины световой волны  
3) любые сигналы в природе распространяются со скоростями, не превышающими скорость света

4) вместо мгновенного действия на расстоянии или дальнего действия с бесконечной скоростью распространения должно существовать дальнее действие со скоростью света. Выберите **два** верных утверждения из предложенного перечня.

Ответ: ☐ ☐

6. Два тела движутся навстречу друг другу со скоростями  $v_1 = v_2 = 2 \cdot 10^5$  км/с относительно неподвижного наблюдателя. Во сколько раз отличаются скорости их движения относительно друг друга, вычисленные по классической  $v_k$  и релятивистской  $v_p$  формулам сложения скоростей:  $v_p / v_k$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_.

7. Самолёт движется со скоростью  $v$  навстречу свету, излучаемому неподвижным источником. С какой скоростью  $v'$  сближается самолёт с фотоном этого света: со скоростью **большой, меньшей или равной** скорости света? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_.

Ответами к заданиям 8—12 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

8. При какой относительной скорости движения  $v/c$  размеры тела сокращаются на 10%?

Ответ: \_\_\_\_\_.

9. Солнце ежеминутно излучает энергию, равную  $6,5 \cdot 10^{21}$  кв.ч. Считая излучение Солнца постоянным, найдите, за какое время масса Солнца уменьшится в 2 раза.

Ответ: \_\_\_\_\_ лет.

10. При какой скорости полная энергия свободной частицы вдвое больше его энергии покоя?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

11. Во сколько раз увеличивается продолжительность существования нестабильной частицы по часам неподвижного наблюдателя, если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99 % скорости света?

Ответ: \_\_\_\_\_.

12. Какую часть скорости света должна составлять скорость частицы, чтобы её кинетическая энергия была равна энергии покоя? Ответ дайте «в единицах»  $c$ .

Ответ: \_\_\_\_\_  $c$ .

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ»

Ответами к заданиям 1—6 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. Выберите два правильных определения слова «фотон» в физике.

- 1) прибор для фотографирования
- 2) луч света
- 3) единица измерения интенсивности света
- 4) элементарная частица
- 5) квант электромагнитного излучения

Ответ: ☐ ☐

2. Постоянная Планка это: **единица измерения энергии, квант действия, элементарная частица?** Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

3. Чему равен импульс фотона красного света  $\lambda = 630$  нм? Как он отличается от фотона фиолетового света  $\lambda = 400$  нм? Выберите два правильных ответа.

- 1)  $p_k = 1 \cdot 10^{-27}$       3)  $p_k = 1 \cdot 10^{-26}$       5)  $p_k = 5 \cdot 10^{-27}$       7)  $p_k = 3 \cdot 10^{-27}$   
 2)  $p_k/p_\phi = 0,63$       4)  $p_k/p_\phi = 0,5$       6)  $p_k/p_\phi = 2$       8)  $p_k/p_\phi = 1,5$

Ответ: ☐ ☐

4. Определите, которая из длин волн в спектре излучения ртутной лампы: 436 нм, 546 нм, 579 нм может вызвать фотоэффект в металле с красной границей фотоэффекта  $\lambda_k = 500$  нм?

Ответ: \_\_\_\_\_ нм.

5. Чему равна длина волны де Бройля медленных электронов с энергией около 100 эВ, использованных в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера по обнаружению дифракции электронов?

Ответ: \_\_\_\_\_ Å.

6. Чему равна длина волны де Бройля шарика массой 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с?

Ответ: \_\_\_\_\_ см.

Ответами к заданиям 7—13 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

7. Определите энергию пучка синего света с длиной волны  $\lambda = 450$  нм, состоящего из 10 фотонов.

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

8. Какой массе эквивалентна энергия фотона рентгеновского излучения с  $\lambda = 10$  нм?

Ответ: \_\_\_\_\_ кг.

9. Какова длина волны де Бройля  $\alpha$ -частицы, движущейся со скоростью 30 000 км/с? Импульс частицы можно вычислять по классической формуле.

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

10. Какова красная граница фотоэффекта для платины, если работа выхода электронов  $A = 1 \cdot 10^{-18}$  Дж?

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

11. Красная граница фотоэффекта для вольфрама  $\lambda_k = 275$  нм. Найдите наибольшую скорость фотоэлектронов, вылетающих из вольфрама при освещении его светом с  $\lambda = 180$  нм.

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

12. Найдите работу выхода электронов из металла, если фотоэффект начинается при частоте падающего света  $6 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>.

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

13. Заряженная частица, прошедшая разность потенциалов 200 В, имеет длину волны де Бройля, равную 0,0202 Å. Заряд частицы равен заряду электрона. Какова масса частицы?

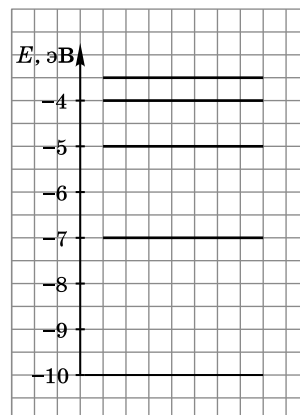
Ответ: \_\_\_\_\_ кг.

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ФИЗИКА АТОМА»

Ответами к заданиям 1—5 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1. На рисунке изображены энергии квантовых состояний (уровни энергии)  $E_n$  в эВ атомной системы. Проанализируйте рисунок и выберите **два** значения энергий фотонов  $h\nu_{kn}$ , не противоречащих второму постулату Бора применительно к этой системе.
- 1) 7 эВ                      3) 3 эВ                      5) -11 эВ  
2) 1,2 эВ                    4) 1 эВ                      6) -5,5 эВ

Ответ:



2. Главной отличительной особенностью излучения лазера по сравнению с естественными источниками света является: **большая интенсивность, спектральный состав, длительность, когерентность**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_.

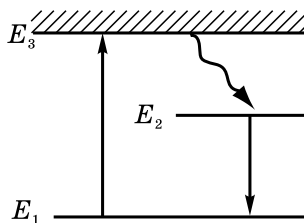
3. Во сколько раз кулоновская сила больше силы тяготения электрона и ядра в атоме водорода (радиус атома водорода  $\sim 0,5 \cdot 10^{-10}$  м)?

Ответ: \_\_\_\_\_.

4. Условием, необходимым для индуцированного излучения трёх-уровневой системы, является

- 1) большое значение  $E_3 - E_2$   
2) большое время жизни уровня  $E_3$   
3) наличие метастабильного уровня  $E_2$   
4) большая интенсивность света накачки  
5) инверсная населённость метастабильного уровня  $E_2$   
Выберите **два** верных ответа из предложенного перечня.

Ответ:



5. Установите соответствие между названием оптического спектра и источником такого спектра.

#### ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

- А) линейчатые спектры  
Б) полосатые спектры

#### ИСТОЧНИК СПЕКТРА

- 1) спектр Солнца  
2) молекулярные спектры слабых растворов  
3) газы в атомарном состоянии  
4) сильно нагретое тело  
5) спектры звёзд

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Ответ:

А	Б

Ответами к заданиям 6–8 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

6. Найдите значение постоянной Ридберга в формуле Бальмера, зная, что наименьшая частота излучения в видимой части спектра водорода равна  $4,6 \cdot 10^{14}$  Гц. Ответ дайте в  $\text{м}^{-1}$ .

Ответ: \_\_\_\_\_  $\text{м}^{-1}$ .

7. Определите наибольшую длину волны в ультрафиолетовой серии атома водорода.

Ответ: \_\_\_\_\_ м.

8. Каково изменение энергии атомов водорода при излучении им линии с частотой  $4,57 \cdot 10^{14}$  Гц?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

### ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ЕГЭ ПО ТЕМЕ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА»

Ответами к заданиям 1—10 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы.

1.  $\alpha$ -лучи представляют собой поток **нейтронов, позитронов, ядер атома гелия**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

2.  $\beta$ -частицы это: **электромагнитное излучение, космические лучи, электроны**? Ответ запишите словом (словами).

Ответ: \_\_\_\_\_ .

3.  $\gamma$ -лучи представляют собой:

- 1) электромагнитные волны
  - 2) кванты электромагнитного излучения с длиной волны  $10^{-3} - 10^{-11}$  см
  - 3) поток нейтральных частиц с массой электрона
  - 4) поток кварков
  - 5) электромагнитное излучение радиодиапазона
- Выберите два верных утверждения.

Ответ: 

--	--

4. Количество радиоактивного радона уменьшилось в 8 раз за 11,4 дня. Каков период полураспада радона?

Ответ: \_\_\_\_\_ дней.

5. Сколько нейтронов и сколько протонов содержится в ядре кюрия  ${}^{247}_{96}\text{Cm}$ ?

Число нейтронов	Число протонов

6. В реакции  ${}^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^1_0n$  вместо знака «?» следует вписать символ ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ , водорода  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ ? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

7. К какому типу взаимодействия относятся ядерные силы: **гравитационному, сильно-**му, **слабому, электромагнитному**? Ответ запишите словом.

Ответ: \_\_\_\_\_ .

8. Чему равно число электронов и число протонов в нейтральном атоме  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ?

Число электронов	Число протонов

9. Чему равна энергия связи, приходящаяся на один нуклон изотопа  ${}^{15}_7\text{N}$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ МэВ.

10. Какое количество  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов радиоактивного  ${}^{238}_{92}\text{U}$  приводит к образованию  ${}^{236}_{82}\text{Pb}$ ?

Число $\alpha$ -распадов	Число $\beta$ -распадов

Ответами к заданиям 11—14 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы.

11. Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найдите период полураспада. Ответ дайте в днях.

Ответ: \_\_\_\_\_ дней.

12. При упругом центральном столкновении нейтрона с неподвижным ядром замедляющего вещества кинетическая энергия нейтрона уменьшилась в 1,4 раза, а направление скорости изменилось на обратное. Какова масса ядер замедляющего вещества? Ответ дайте в а.е.м.

Ответ: \_\_\_\_\_ а.е.м.

13. Определите энергетический выход ядерной реакции:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

Ответ дайте в МэВ.

Ответ: \_\_\_\_\_ МэВ.

14. Неподвижный нейтральный  $\pi$ -мезон, распадаясь, превращается в два одинаковых фотона. Определите энергию каждого фотона, если масса покоя  $\pi$ -мезона  $M = 264,2 m_e$ . Ответ дайте в МэВ.

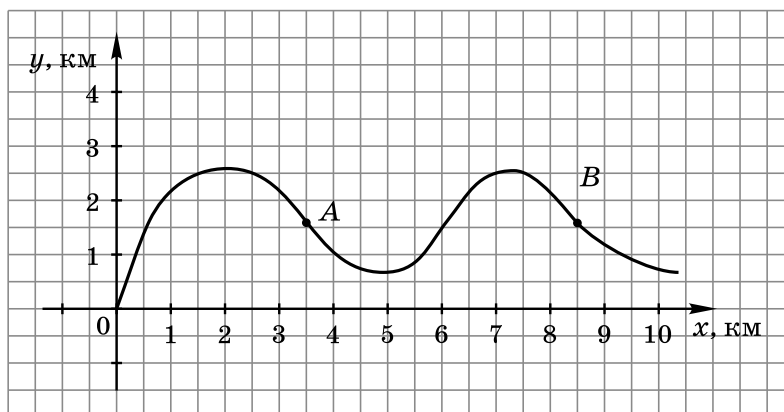
Ответ: \_\_\_\_\_ МэВ.

# ТРЕНИРОВОЧНЫЙ ТЕСТ №2

## Часть 1

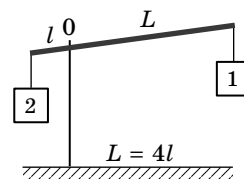
Ответами к заданиям 1—23 являются слово, число или последовательность цифр или чисел. Запишите ответ в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишете в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

1. На рисунке изображена траектория движения автомобиля. Определите модуль вектора перемещения из точки  $A$  в точку  $B$ .



Ответ: \_\_\_\_\_ км.

2. Определите вес груза 2, прикреплённого к рычагу (см. рисунок), чтобы он уравновешивал вес груза 1, равный 80 Н? Массой рычага пренебречь.



Ответ: \_\_\_\_\_ Н.

3. Коэффициент полезного действия тепловой машины составляет 30 %. Определите температуру нагревателя, если температура холодильника равна 7 °С.

Ответ: \_\_\_\_\_ К.

4. Потенциал в точке  $A$  электрического поля равен 200 В, потенциал в точке  $B$  равен 100 В. Какую работу совершают силы электрического поля при перемещении точечного тела с положительным зарядом 15 мКл из точки  $A$  в точку  $B$ ?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

5. Тело, движущееся в поле тяжести Земли, находится в состоянии невесомости. Выберите два верных утверждения, касающиеся ускорения  $a$  и веса тела  $P$  в этом состоянии.

1)  $a < g$       2)  $P = 0$       3)  $a = g$       4)  $P = mg$

Ответ: ☐ ☐

6. На тело, покоящееся в инерциальной системе отсчёта, кратковременно подействовали силой, придав ему некоторую скорость. Как будет меняться скорость тела и



пройденный путь со временем относительно той же системы отсчёта, если в дальнейшем на него не будут действовать никакие силы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится                      2) уменьшится                      3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Скорость тела	Пройденный путь

7. Установите соответствие между физической величиной (или физическим понятием) — термином и его определением.  
К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в **таблицу** выбранные цифры под соответствующими буквами.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ТЕРМИНА

- А) объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу  
Б) величина, равная отношению пути ко времени, за которое этот путь пройден

#### ФИЗИЧЕСКИЙ ТЕРМИН

- 1) траектория  
2) материальная точка  
3) путь  
4) система отсчёта  
5) скорость

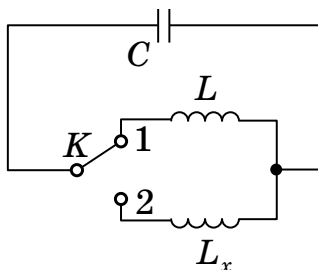
Ответ: 

А	Б

8. Определите отношение силы электростатического взаимодействия двух электрически заряженных шариков в вакууме и в среде с диэлектрической проницаемостью 81 при одинаковом расстоянии между ними.

Ответ: \_\_\_\_\_.

9. Какой должна быть индуктивность  $L_x$  катушки в контуре (см. рисунок), чтобы при переводе ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 период собственных электромагнитных колебаний в контуре увеличился в 5 раз? (Ответ дайте относительно величины  $L$ .)



Ответ: \_\_\_\_\_ Гн.

10. Определите число фотонов в излучении с длиной волны 1 мкм, энергия которого составляет  $10^{-7}$  Дж.

Ответ: \_\_\_\_\_.

11. Плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n_{\text{стекла}} = 1,6$ ), находившуюся в воздухе ( $n_{\text{возд}} = 1,0$ ) и освещаемую лучом света, поместили в воду ( $n_{\text{воды}} = 1,3$ ). Как изменились при этом время прохождения света через пластинку и смещение вышедшего луча по отношению к падающему лучу в сравнении с частотой падающего луча? Выберите два верных утверждения о характере изменения этих величин.
- 1) Все три величины увеличились.
  - 2) Все три величины уменьшились.
  - 3) Смещение вышедшего луча по отношению к падающему лучу не изменилось.
  - 4) Время прохождения света через пластинку увеличилось.
  - 5) Частота падающего луча и время прохождения света через пластинку уменьшились.
  - 6) Время прохождения света через пластинку и частота вышедшего луча не изменились.

Ответ: ☐ ☐

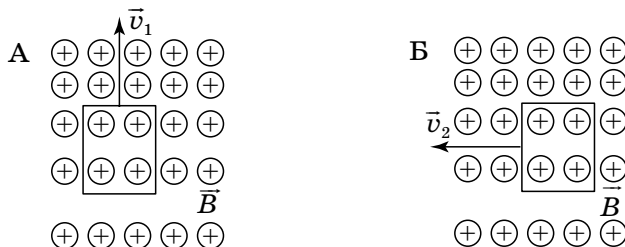
12. Поздней осенью идущий дождь сменился мокрым снегом. Как при этом изменились температура и относительная влажность воздуха? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) немного возросла
- 2) немного снизилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Температура	Относительная влажность

13. Проволочная рамка движется в неоднородном магнитном поле с силовыми линиями, входящими в плоскость листа, в случае А со скоростью  $\vec{v}_1$ , в случае Б со скоростью  $\vec{v}_2$  (см. рисунок).



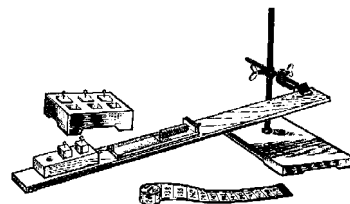
Плоскость рамки остаётся перпендикулярной линиям вектора магнитной индукции. В каком случае в рамке возникает ток (только в случае А, только в случае Б, в обоих случаях, ни в одном из случаев)? Ответ запишите словами.

Ответ: \_\_\_\_\_.

14. Для определения КПД наклонной плоскости использовано оборудование, изображённое на рисунке. Ученик с помощью динамометра поднимает брусок с двумя грузами равномерно вдоль наклонной плоскости. Данные эксперимента ученик занёс в таблицу. Чему равен КПД наклонной плоскости?

Показания динамометра при подъёме груза, Н	1,5
Длина наклонной плоскости, м	1,0
Вес бруска с двумя грузами, Н	2,2
Высота наклонной плоскости, м	0,15

Ответ: \_\_\_\_\_%.



15. Лучи от двух лазеров, свет которых соответствует длинам волн  $l$  и  $1,5l$ , поочерёдно направляются перпендикулярно плоскости дифракционной решётки. Чему равно расстояние между первыми дифракционными максимумами на удалённом экране во втором случае? (Ответ дайте в единицах аналогичного расстояния в первом случае.)

Ответ: \_\_\_\_\_.

16. Яблоко падает с яблони на землю. Выберите два верных утверждения о характере изменения в процессе падения скорости яблока, его ускорения и его потенциальной энергии относительно земли.

- 1) скорость и ускорение увеличиваются
- 2) потенциальная энергия уменьшается, а скорость увеличивается
- 3) потенциальная энергия и скорость не изменяются
- 4) ускорение и скорость не изменяются
- 5) ускорение не изменяется

Ответ: 

--	--

17. Конденсатор, входящий в состав колебательного контура, зарядили и отсоединили от источника напряжения. После этого расстояние между пластинами конденсатора уменьшили. Как это повлияло на ёмкость конденсатора и частоту электромагнитных колебаний в контуре? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Ёмкость конденсатора	Частота колебаний

18. Установите соответствие между некоторыми свойствами вещества и его агрегатным состоянием.

#### СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

- А) расстояние между молекулами намного больше размеров самих молекул
- Б) вещество принимает форму сосуда, в который его помещают

#### АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ

- 1) жидкость
- 2) газ
- 3) твёрдое тело
- 4) плазма
- 5) аморфное тело

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию из второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Ответ: 

А	Б

19. Чему равно число нейтронов и число протонов в нейтральном атоме?

Число нейтронов	Число протонов

20. Чему равна полная мощность элемента с внутренним сопротивлением 2 Ом, если сопротивление внешней цепи равно 4 Ом, а напряжение на зажимах элемента составляет 6 В?

Ответ: \_\_\_\_\_ Вт.

21. Как изменяются массовое число  $M$  и порядковый номер элемента  $Z$ , если из ядра элемента выбрасывается протон?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится на 1
- 2) уменьшится на 1
- 3) не изменится

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

$M$	$Z$

22. Какое количество  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов радиоактивного  ${}^{238}_{92}\text{U}$  приводит к образованию  ${}^{236}_{82}\text{Pb}$ ?

Количество $\alpha$ -распадов	Количество $\beta$ -распадов

23. Радиопередатчик работает на частоте 100 кГц. Что произойдёт с импульсом, энергией и скоростью фотонов, излучаемых радиопередатчиком, если увеличить частоту излучения?

Выберите два верных утверждения о поведении этих характеристик.

- 1) Импульс и энергия фотонов увеличатся.
- 2) Энергия и скорость фотонов уменьшатся.
- 3) Скорость фотонов не изменится.
- 4) Импульс и энергия фотонов уменьшатся.
- 5) Импульс фотонов не изменится.

Ответ: ☐☐

## Часть 2

Ответом к заданиям 24—26 является число. Запишите это число в поле ответа в тексте работы, а затем перенесите в БЛАНК ОТВЕТОВ № 1 справа от номера соответствующего задания, начиная с первой клеточки. Каждый символ пишите в отдельной клеточке в соответствии с приведенными в бланке образцами. Единицы измерения физических величин писать не нужно.

24. Тело массой 500 г, брошенное под углом к горизонту со скоростью 18 м/с с высоты 10 м над поверхностью земли, упало на землю со скоростью 22 м/с. Чему равна работа тела по преодолению сопротивления воздуха?

Ответ: \_\_\_\_\_ Дж.

25. Из баллона со сжатым водородом ёмкостью 10 л вследствие неисправности вентиля утекает газ. При температуре 7 °С давление было равно 5 МПа. Через некоторое время при температуре 17 °С манометр показал такое же давление. Сколько газа утекло? Ответ дать в граммах и округлить до одного знака после запятой.

Ответ: \_\_\_\_\_ г.

26. Квант света с энергией 14,5 эВ выбивает фотоэлектрон из атома водорода. Какова скорость электрона вдали от атома?

Ответ: \_\_\_\_\_ м/с.

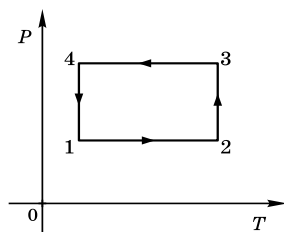
Не забудьте перенести все ответы в бланк ответов № 1 в соответствии с инструкцией по выполнению работы.

Для записи ответов на задания (27—31) используйте БЛАНК ОТВЕТОВ № 2. Запишите сначала номер задания (27, 28 и т. д.), а затем решение соответствующей задачи. Ответы записывайте чётко и разборчиво.

27. С высоты  $H = 40$  м свободно падает стальной шарик. Через время  $t = 2$  с после начала падения он сталкивается с неподвижной плитой, плоскость которой наклонена под углом  $30^\circ$  к горизонту. На какую высоту  $h$  над поверхностью Земли поднимется шарик после удара? Удар шарика о плиту считать абсолютно упругим.

Полное правильное решение каждой из задач 28—31 должно содержать законы и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи, а также математические преобразования, расчёты с численным ответом и при необходимости рисунок, поясняющий решение.

28. В системе координат  $p, T$  изображён цикл, соответствующий работе тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ (см. рисунок). Определите модуль отношения работ газа  $\frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}}$  на участках 3–4 и 1–2.



29. Шарик массой  $m = 0,15$  кг на нити длиной  $L = 0,4$  м раскачивают так, что каждый раз, когда шарик проходит положение равновесия, на него в течение короткого промежутка времени  $t = 0,01$  с действует сила  $F = 0,2$  Н, направленная параллельно скорости. Через сколько полных колебаний шарик на нити отклонится на  $60^\circ$ ?
30. Горизонтально расположенный проводник длиной 1,5 м движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,25 Тл и направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения. Начальная скорость проводника равна нулю, а его ускорение  $8 \text{ м/с}^2$ . Определите электродвижущую силу индукции на концах проводника в тот момент, когда он переместился на 1 м.
31. Фотокатод освещается светом с частотой  $\nu = 1,0 \cdot 10^{15}$  Гц. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 3,9 \cdot 10^{-4}$  Тл перпендикулярно линиям индукции этого поля. Работа выхода для материала фотокатода равна  $A = 4,42 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите максимальный радиус окружности  $R$ , по которой движутся электроны.

# ОТВЕТЫ К ТРЕНИРОВОЧНОМУ ТЕСТУ №2

## Часть 1

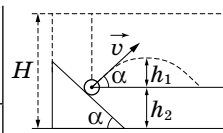
№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ	№ задания	Ответ
1	5	7	25	13	только в случае А	19	2019
2	320	8	81	14	22	20	13,5
3	400	9	25	15	1,5	21	22
4	1,5	10	$5 \cdot 10^{11}$	16	25	22	86
5	32	11	36	17	12	23	13
6	31	12	12	18	21		

## Часть 2

24. 9.      25. 1,5.      26. 9.

27. Дано:

$$\begin{aligned} H &= 40 \text{ м} \\ t &= 2 \text{ с} \\ \alpha &= 30^\circ \\ h &= ? \end{aligned}$$



Решение:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t. \text{ Оу: } v_p = gt \sin 30^\circ.$$

Высота подъёма шарика над плитой после

$$\text{удара: } h_1 = \frac{v_p^2}{2g}.$$

$$h = h_1 + h_2; \quad h_2 = H - \frac{gt^2}{2}. \text{ Тогда: } h = H - \frac{gt^2}{2} + \frac{v_p^2}{2g}.$$

$$h = H - \frac{gt^2}{2} + \frac{gt^2 \sin^2 \alpha}{2g} \text{ или } h = H + \frac{gt^2}{2}(\sin \alpha - 1). \quad h = 40 + \frac{9,8 \cdot 2^2}{2} \left( \frac{1}{4} - 1 \right) = 25 \text{ (м)}.$$

Ответ: 25 м.

28. Дано:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_4 \\ T_2 &= T_3 \end{aligned}$$

$$\left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = ?$$

На основании анализа графиков процессов сделаем вывод о том, что процессы 3–4 и 1–2 — изобарные.

Работа при изобарном процессе:

$$\Delta A_{34} = p_{34} \Delta V = p_{34}(V_4 - V_3) = \nu k(T_4 - T_3).$$

$$\Delta A_{12} = p_{12} \Delta V = \nu k(T_1 - T_2).$$

$$\left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = \left| \frac{\nu k(T_4 - T_3)}{\nu k(T_1 - T_2)} \right| = \left| \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_2} \right|; \text{ т.к. } T_4 = T_1, \text{ а } T_2 = T_3, \text{ то } \left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = \left| \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_2} \right| = 1.$$

$$\text{Ответ: } \left| \frac{\Delta A_{34}}{\Delta A_{12}} \right| = 1.$$

29. Дано:

$$\begin{aligned}
 m &= 0,5 \text{ кг} \\
 L &= 0,4 \text{ м} \\
 t &= 0,01 \text{ с} \\
 F &= 0,2 \text{ Н} \\
 \alpha &= 60^\circ \\
 N &= ?
 \end{aligned}$$

Решение:

Изменение импульса тела равно импульсу действующей на тело силы:  $m\Delta v = F\Delta t$ .

Приращение скорости за один удар:

$$\Delta v = \frac{F\Delta t}{m}. \quad v_N = 2N\Delta v. \quad \text{Отсюда: } v_N = \frac{2NF\Delta t}{m}.$$

Закон сохранения энергии:  $\frac{mv^2}{2} = mgh$ ;  $h = L(1 - \cos \alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ ;  $\frac{mv^2}{2} = 2mgL \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ .

$$\text{Отсюда: } v^2 = 2gL \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 4N^2 \Delta v^2 = \frac{4N^2 F^2 \Delta t^2}{m^2}; \quad N^2 = \frac{2gLm^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4 \cdot F^2 \Delta t^2}; \quad N = \sqrt{\frac{2gLm^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4 \cdot F^2 \Delta t^2}};$$

$$N = \frac{m \sin \frac{\alpha}{2}}{Ft} \sqrt{gL}. \quad N = \frac{0,15 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{9,8 \cdot 0,4}}{0,2 \cdot 0,01} = 75 \text{ (колебаний)}.$$

Ответ: 75 колебаний.

30. Дано:

$$\begin{aligned}
 l &= 1,5 \text{ м} \\
 B &= 0,25 \text{ Тл} \\
 v_0 &= 0 \\
 a &= 8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\
 x &= 1 \text{ м} \\
 \varepsilon &= ?
 \end{aligned}$$

Решение:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad \text{За малое время } \Delta t: \Delta \Phi = Bl\Delta x.$$

$$|\varepsilon| = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv; \quad x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{v^2}{2a}.$$

$$\text{Отсюда: } v = \sqrt{2ax}; \quad |\varepsilon| = Bl\sqrt{2ax}. \quad |\varepsilon| = 0,25 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 8 \cdot 1} = 1,5 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $|\varepsilon| = 1,5 \text{ В}$ .

31. Дано:

$$\begin{aligned}
 \nu &= 1,0 \cdot 10^{15} \text{ Гц} \\
 B &= 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} \\
 A &= 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\
 R &= ?
 \end{aligned}$$

Решение:

$$\text{Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: } h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

$$\text{Согласно II закону Ньютона: } F = ma; \quad a = \frac{v^2}{R}; \quad F = F_{\pi} = e\nu B.$$

$$\text{Тогда: } e\nu B = \frac{mv^2}{R}. \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} e\nu BR = h\nu - A.$$

$$\text{Следовательно: } R = \frac{\sqrt{m(2h\nu - 2A)}}{eB} = \frac{\sqrt{2m(h\nu - A)}}{eB}.$$

$$R = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (6,63 - 4,42) \cdot 10^{-19}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,9 \cdot 10^{-4}} = 10^{-2} \text{ (м)} = 10 \text{ (мм)}.$$

Ответ: 10 мм.





This image shows a full page of blank graph paper. The grid consists of small, equal-sized squares formed by thin, dark gray lines. The grid covers the entire area of the page, leaving no margins or other markings.

# ОТВЕТЫ К ПРИМЕРАМ ЗАДАНИЙ ЕГЭ

## РАЗДЕЛ «МЕХАНИКА»

### КИНЕМАТИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	5	левый верхний	0,5
№ задания	4	5	6
Ответ	равнозамедленное	1,8	1,74
№ задания	7	8	9
Ответ	параболу	10,1	3

### ДИНАМИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	сила трения	31	вверх
№ задания	4	5	6
Ответ	800	32	–5
№ задания	7	8	9
Ответ	32	31	$\mu = \operatorname{tg} \alpha$
№ задания	10	11	12
Ответ	0,4	71100	14

### СТАТИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	3	по часовой стрелке	7,5
№ задания	4	5	6
Ответ	равно	2	35
№ задания	7	8	9
Ответ	понижается	155	7,2
№ задания	10	11	12
Ответ	20	0,04	0,73

### ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

№ задания	1	2	3
Ответ	1,6	0	20
№ задания	4	5	6
Ответ	420	одинакова	500
№ задания	7	8	9
Ответ	41	3,3	2
№ задания	10	11	
Ответ	343	34	

12.  $v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2} = 1,16 \text{ м/с}; v'_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2} = 0,66 \text{ м/с}.$

## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

№ задания	1	2	3	4
Ответ	13	72	невозможно выполнить задачу	увеличить вдвое
№ задания	5	6	7	8
Ответ	2	2	32	да
№ задания	9	10		
Ответ	0	7,4		

## РАЗДЕЛ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА»

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	количество молей	42	диффузии
№ задания	4	5	6
Ответ	уменьшится	573	$1,2 \cdot 10^{-20}$
№ задания	7	8	9
Ответ	не изменится	34	21
№ задания	10	11	12
Ответ	432	0,3	83

### ТЕРМОДИНАМИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	25	уменьшится в 4 раза	42
№ задания	4	5	6
Ответ	1,7	удвоилась	1
№ задания	7	8	9
Ответ	5	16	4
№ задания	10		
Ответ	74		

## РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

№ задания	1	2	3
Ответ	разноимённые	45	51
№ задания	4	5	6
Ответ	0	одинакова	-3
№ задания	7	8	9
Ответ	уменьшится вдвое	400	1,8
№ задания	10	11	
Ответ	6	0,036	

## ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

№ задания	1	2	3
Ответ	увеличится в 6 раз	13	45
№ задания	4	5	6
Ответ	2	на четвёртом	$n$ -типа
№ задания	7	8	9
Ответ	65	0,064	11,8
№ задания	10	11	
Ответ	1,67	807	

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

№ задания	1	2	3
Ответ	Южного географического полюса	51	0,5
№ задания	4	5	6
Ответ	от читателя	$4,8 \cdot 10^{-14}$	5
№ задания	7	8	9
Ответ	$10^5$	0,05	12

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

№ задания	1	2	3
Ответ	35	противоположно	параллельно
№ задания	4	5	6
Ответ	15	0,2	0,4
№ задания	7	8	9
Ответ	31,2	12,7	31
№ задания	10		
Ответ	21		

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

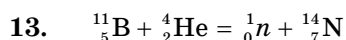
№ задания	1	2	3
Ответ	четвёртом	16	52
№ задания	4	5	6
Ответ	уменьшится	уменьшится	не имеется
№ задания	7	8	9
Ответ	8	32	массе
№ задания	10	11	12
Ответ	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	2520

## ОПТИКА

№ задания	1	2	3
Ответ	45	13	оптически однородной
№ задания	4	5	6
Ответ	14	интерференции	дифракции
№ задания	7	8	9
Ответ	$1,76 \cdot 10^8$	0,8	3,75

## РАЗДЕЛ «ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

№ задания	1	2	3
Ответ	45	в неподвижной	24
№ задания	4	5	6
Ответ	энергией покоя	34	0,69
№ задания	7	8	9
Ответ	равной скорости света	0,436	$7 \cdot 10^{12}$
№ задания	10	11	12
Ответ	$2,6 \cdot 10^8$	7,1	0,866



## РАЗДЕЛ «КВАНТОВАЯ ФИЗИКА»

### КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

№ задания	1	2	3
Ответ	45	квант действия	12
№ задания	4	5	6
Ответ	436	1,24	$6,6 \cdot 10^{-27}$
№ задания	7	8	9
Ответ	$4,4 \cdot 10^{-18}$	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$3,3 \cdot 10^{-15}$
№ задания	10	11	12
Ответ	$2 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-19}$
№ задания	13		
Ответ	$1,67 \cdot 10^{-27}$		

### ФИЗИКА АТОМА

№ задания	1	2	3
Ответ	34	когерентность	$2 \cdot 10^{39}$
№ задания	4	5	6
Ответ	35	32	$1,1 \cdot 10^7$
№ задания	7	8	
Ответ	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-19}$	

### ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

№ задания	1	2	3
Ответ	ядер атома гелия	электроны	12
№ задания	4	5	6
Ответ	3,8	15196	водорода
№ задания	7	8	9
Ответ	сильному	2020	7,7
№ задания	10	11	12
Ответ	86	4	-12
№ задания	13	14	
Ответ	17,3	67,5	

# ЕГЭ

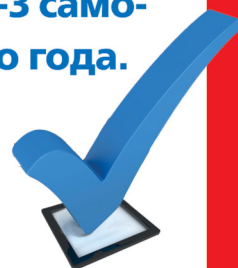
НЕДЕЛЯ ЗА НЕДЕЛЕЙ



В пособии представлена уникальная пошаговая система подготовки к ЕГЭ, разработанная опытными педагогами. Все материалы школьного курса физики чётко структурированы и разделены на 36 логических блоков (недель). Изучение каждого блока рассчитано на 2-3 самостоятельных занятия в неделю в течение учебного года.







Занимаясь всего 2-3 часа в неделю,  
вы сможете достичь высокого  
результата на ЕГЭ без репетиторов!



# ФИЗИКА

ПОШАГОВАЯ ПОДГОТОВКА

**ПОСОБИЕ ПОМОЖЕТ:**

-  организовать и структурировать подготовку к ЕГЭ;
-  пошагово изучить теоретический материал по предмету;
-  отработать навыки выполнения заданий разных типов;
-  систематизировать и оценить знания.

