

# Физика

УЧЕБНИК

11





## AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ DÖVLƏT HİMNİ

Musiqisi *Üzeyir Hacıbəylinin*,  
sözləri *Əhməd Cavadındır*.

Azərbaycan! Azərbaycan!  
Ey qəhrəman övladın şanlı Vətəni!  
Səndən ötrü can verməyə cümlə hazırız!  
Səndən ötrü qan tökməyə cümlə qadırız!  
Üçrəngli bayrağınla məsud yaşa!  
Minlərlə can qurban oldu!  
Sinən hər bə meydan oldu!  
Hüququndan keçən əsgər  
Hərə bir qəhrəman oldu!

Sən olasan gülüstan,  
Sənə hər an can qurban!  
Sənə min bir məhəbbət  
Sinəmdə tutmuş məkan!

Namusunu hifz etməyə,  
Bayrağını yüksəltməyə  
Cümlə gənclər müştəqdir!  
Şanlı Vətən! Şanlı Vətən!  
Azərbaycan! Azərbaycan!





**ГЕЙДАР АЛИЕВ**  
**ОБЩЕНАЦИОНАЛЬНЫЙ ЛИДЕР**  
**АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО НАРОДА**



# Физика

РАСИМ АБДУРАЗАГОВ  
РОВШАН АЛИЕВ  
ГАЛИБ ШАРИФОВ

11

УЧЕБНИК  
по предмету Физика для 11-го класса  
общеобразовательных школ

Замечания и предложения, связанные с этим изданием,  
просим отправлять на электронные адреса:

[bn@bakineshr.az](mailto:bn@bakineshr.az) и [derslik@edu.gov.az](mailto:derslik@edu.gov.az)

Заранее благодарим за сотрудничество!

В

А

К

І



Н

Ә

Ş

Р

Баку – 2018

# Физика 11

## Оглавление

### глава I

#### • ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ •

1.1. Электрический заряд. Электромагнитное поле. . . . .	10
1.2. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля . . . . .	14
1.3. Работа однородного электрического поля. Потенциал. Напряжение . . . . .	18
1.4. Конденсатор. Электрическая ёмкость . . . . .	23
1.5. Соединение конденсаторов . . . . .	27
1.6. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Сила Лоренца . . . . .	31
1.7. Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера . . . . .	34
1.8. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции . . . . .	38
1.9. Закон электромагнитной индукции. ЭДС индукции в проводниках, движущихся в магнитном поле . . . . .	42
1.10. ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля . . . . .	46
• Задачи к главе I . . . . .	50

### глава II

#### • ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ •

2.1. Элементы электронной теории электропроводности металлов . . . . .	54
2.2. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление. Сверхпроводимость . . . . .	58
2.3. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи . . . . .	62
2.4. Электрический ток в вакууме . . . . .	66
2.5. Электрический ток в газах . . . . .	70
2.6. Электрический ток в растворах электролитов. Закон электролиза . . . . .	74
2.7. Электрический ток в полупроводниках . . . . .	78
2.8. Полупроводниковый диод. Транзистор . . . . .	82
2.9. Полупроводниковые устройства: применение в науке, технике и производстве (Урок-презентация) . . . . .	86
• Задачи к главе II . . . . .	87



### глава III

## ● ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ ●

3.1. Свободные электромагнитные колебания . . . . .	92
3.2. Превращения энергии при электромагнитных колебаниях (Урок-презентация) . . . . .	97
3.3. Вынужденные электромагнитные колебания: переменный ток . . . . .	99
3.4. Цепи переменного тока, содержащие резистор, конденсатор и катушку . . . . .	104
3.5. Закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного, индуктивного и ёмкостного сопротивления . . . . .	109
3.6. Передача электроэнергии. Трансформатор . . . . .	113
3.7. Электромагнитные волны . . . . .	117
3.8. Энергия электромагнитной волны. Шкала электромагнитных волн (Урок-презентация) . . . . .	122
3.9. Принципы радиосвязи . . . . .	124
3.10. Волновая природа света. Дисперсия света . . . . .	128
3.11. Интерференция волн. Интерференция света . . . . .	132
3.12. Дифракция волн. Дифракция света . . . . .	136
3.13. Поляризация света . . . . .	140
●Задачи к главе III . . . . .	144

### глава IV

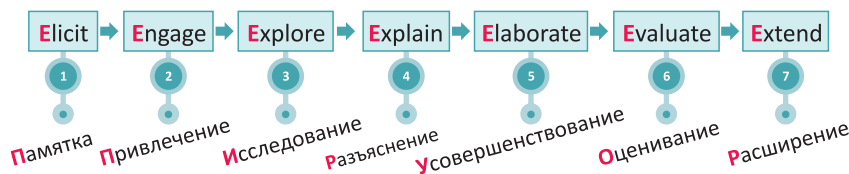
## ● АТОМНАЯ ФИЗИКА ●

4.1. Квантовая природа электромагнитного излучения. Фотон . . . . .	148
4.2. Фотоэффект. Теория фотоэффекта . . . . .	152
4.3. Эффект Комптона и волны де Бройля (Урок-презентация) . . . . .	157
4.4. Квантовые постулаты Бора о строении атома. Энергетические уровни атома . . . . .	159
4.5. Виды излучения и их применения (Урок-презентация) . . . . .	163
4.6. Атомное ядро. Строение атомного ядра . . . . .	167
4.7. Энергия связи ядра . . . . .	171
4.8. Радиоактивность. Радиоактивные превращения ядер . . . . .	174
4.9. Закон радиоактивного распада . . . . .	178
4.10. Ядерная реакция . . . . .	181
4.11. Деление ядер урана. Цепная ядерная реакция . . . . .	184
4.12. Термоядерная реакция . . . . .	189
4.13. Элементарные частицы и методы их регистрации . . . . .	192
4.14. Физика и современная жизнь (Урок-презентация) . . . . .	197
●Задачи к главе III . . . . .	201
●Ответы к задачам . . . . .	204

## Модель 7Е в преподавании естественных наук

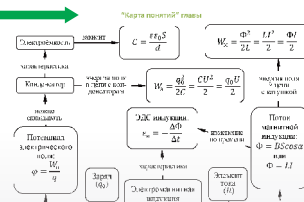
Все темы в учебнике составлены на основе модели 7Е учебного цикла по обучению естественных наук. Эта модель считается самой прогрессивной образовательной моделью в мире.

Последовательность реализации **ЦИКЛА 7Е** в ходе урока



### Познакомьтесь с учебником!

**Карта понятий.** Систематика понятий, изучаемых в главе (последовательность взаимосвязи).



**Вспомните пройденное.** (Elicit) – вопросы для повторения пройденных материалов, прямо или косвенно связанных с данной темой.

**1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

Прежде чем мы узнаем, что такое электрическое поле, давайте рассмотрим, что такое электрический заряд. Электрический заряд – это свойство материи, которое вызывает электрическое взаимодействие. Заряд может быть положительным или отрицательным. Заряды взаимодействуют друг с другом: одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются. Электрическое поле – это область пространства, в которой действует электрическое взаимодействие. Электрическое поле создается электрическим зарядом. Электрическое поле характеризуется напряженностью  $E$  и потенциалом  $\phi$ . Напряженность электрического поля  $E$  – это вектор, который характеризует силу взаимодействия заряда с полем. Потенциал  $\phi$  – это скалярная величина, которая характеризует энергию взаимодействия заряда с полем. Электрическое поле распространяется со скоростью света  $c$ . Электрическое поле является частью электромагнитного поля. Электромагнитное поле – это поле, которое создается движущимся электрическим зарядом. Электромагнитное поле характеризуется электрическим полем  $E$  и магнитным полем  $B$ . Электромагнитное поле распространяется со скоростью света  $c$ . Электромагнитное поле является частью электромагнитного излучения. Электромагнитное излучение – это процесс распространения энергии в виде электромагнитного поля. Электромагнитное излучение характеризуется частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ . Электромагнитное излучение распространяется со скоростью света  $c$ . Электромагнитное излучение является частью электромагнитного спектра. Электромагнитный спектр – это диапазон частот, в котором распространяется электромагнитное излучение. Электромагнитный спектр включает в себя радиоволны, микроволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение и гамма-излучение. Электромагнитное излучение взаимодействует с веществом. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом называется электромагнитным взаимодействием. Электромагнитное взаимодействие – это взаимодействие между электрическими зарядами. Электромагнитное взаимодействие является одним из четырех фундаментальных взаимодействий. Электромагнитное взаимодействие является универсальным. Электромагнитное взаимодействие действует на все электрически заряженные объекты. Электромагнитное взаимодействие является силой притяжения и отталкивания. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая удерживает атомы и молекулы вместе. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая вызывает электрические и магнитные явления. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая лежит в основе всей современной физики. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая определяет структуру и свойства материи. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая определяет законы физики. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая определяет законы природы. Электромагнитное взаимодействие является силой, которая определяет законы Вселенной.

**Мотивация.** (Engage) – данные и вопросы для обсуждения, мотивирующие интерес учащихся к теме урока.

**Исследование.** (Explore) – самостоятельное рассмотрение теоретического или практического задания, связанного с темой урока.



**Разъяснения.** (Explain) – основное содержание урока: вводятся новые понятия, формулируются правила.

Известно, что простейшим конденсатором является плоский конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин. Характеристики конденсатора являются электрической емкостью.

• **Электрическая емкость конденсатора  $C$**  – отношение электрического заряда  $Q$  к разности потенциалов  $U$  между обкладками конденсатора.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

Единицей измерения электрической емкости в СИ является фарада (Ф):

• 1 фарада – это электрическая емкость конденсатора, когда заряд в 1 Кл создает разность потенциалов 1 В.

**Закрепление изученного материала. (Elaborate)** – задания, способствующие усовершенствованию знаний и навыков, полученных на уроке.

**Свяжите с жизнью. Экспериментальные задания, для выполнения которых можно использовать различные источники.**

**Рефлексия и оценивание. (Evaluate)** – завершение урока. Задания для оценивания навыков по завершении урока. Состоит из 3 частей:

1. задания для самооценивания с использованием текста темы.
2. вопросы для оценивания индивидуальной деятельности в процессе обучения.
3. задания, отличающиеся по степени сложности (A,B,C,D).

**Кругозор. (Extend)** – проекты, исследования, творческие задания, требующие глубокого анализа, с целью получения новых знаний.

• Амперметр и вольтметр, используемые в цепи переменного тока, измеряют действующие значения силы тока и напряжения.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2

**Объясните получение переменного тока в замкнутом контуре.**

**Задача.** Объясните согласно приведенной схеме (д) возникновение переменного индукционного тока в контуре, вращающемся в однородном магнитном поле.

**Обобщение результата:**

- При каком положении вращающегося в однородном магнитном поле контура сила возникшего индукционного тока принимает максимальное значение? Почему?
- Что вы можете сказать о направлении индукционного тока, протекающего по сторонам контура C и D в его положениях 2 и 4?

**СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

На рисунке приведена схема генератора постоянного тока

(а). Сравните ее с упрощенной схемой генератора переменного тока (с или д).

• В чем разница между строением (конструкцией) этих генераторов?

• Как получается, что в одном из генераторов возникает постоянный, а в другом переменный ток?

**ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

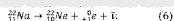
№	Вопросы	Знать		
		слабо	средне	хорошо
1	Как обеспечивается получение незатухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре?			
2	Каким опытом можно смоделировать работу генератора переменного тока?			
3	ЭДС меняется по закону $\epsilon = 120 \sin 80\pi t$ . Определите период, частоту и амплитудное значение ЭДС.			
4	На основе данного графика определите: а) амплитудное значение колебаний напряжения, б) период и частоту колебаний, в) уравнение зависимости напряжения от времени.			
5	Сила тока в осветительной сети равна 10 А. Чему равно амплитудное значение силы тока?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?**  
В рабочих листах составьте карту понятия "переменный ток".

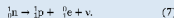
**Проект. "Война токов".** Используя электронные ресурсы, подготовьте реферат о продолжающемся 100 лет противостоянии между двумя американскими изобретателями и их изобретениями: "Производство и эксплуатация постоянного тока" Томаса Эдисона и "Производство и эксплуатация переменного тока" Николы Теслы.

103

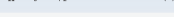
**Проекты. (Extend)** – проекты, исследования, творческие задания, требующие глубокого анализа, с целью получения новых знаний.



На что указывает соотношение  $\gamma$  и  $\beta$  в реакциях (5) и (6)? В 1931-ом году итальянский физик Энрико Ферми (1901-1954) разработал концепцию теории  $\beta$ -распада. Согласно этой теории, при  $\beta$ -распаде внутри ядра происходит процесс превращения нейтрона в протон. Согласно закону сохранения четвертого квантового заряда и закону сохранения энергии, этот процесс сопровождается испусканием двух частиц – электронов и нейтрино. Нейтрино – элементарная частица, обладающая нулевым электрическим зарядом. (Ферми назвал эту частицу нейтрино (итал. – «нейтральный» – значит, нейтральность от силы магнетизма):

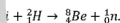


Аналогично, при  $\beta^+$ -распаде внутри ядра происходит процесс превращения протона в нейтрон и наблюдается испускание двух частиц – позитрона и нейтрино. Образуется частица с равными нулю зарядом и массовым числом **антинейтрино**:



• нейтрино – предоставляет собой поток фотонов, характеризующийся большой частотой ( $10^{16}$ – $10^{21}$  Гц). Это излучение обладает

акция:



время -8  
531 а.е.м.

осколки – барий  
энергии связи

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ IV

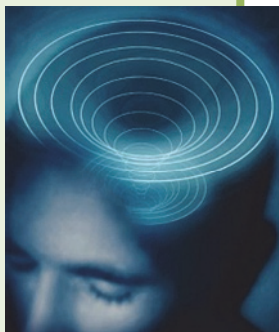
**Задачи к главе.**

Обобщенные тезисы изученных тем данной главы.

**Ответы**  
к задачам –  
стр. 204-207

**Углубление.** Образец решения задачи или теоретического задания, отражающего суть темы. В конце предлагается самостоятельное решение аналогичного задания.

## ● ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ



- Сильное электромагнитное поле отрицательно действует на человеческий организм – повреждается центральная нервная система, может возникнуть рак головного мозга, уровень гемоглобина в крови понижается, нарушается память и понижается внимание.

- Что такое электромагнитное поле?
- Как его можно обнаружить?
- Какие источники вокруг нас создают сильное электромагнитное поле? Как можно защититься от их действия?
- Какие полезные воздействия электромагнитного поля на человеческий организм вы знаете?

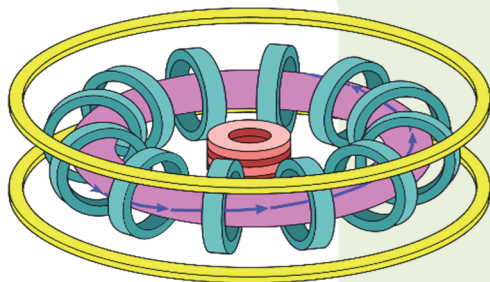


- 1 января 2004 года была сдана в эксплуатацию железнодорожная линия на магнитной подушке (МагЛев – магнитная левитация) от международного аэропорта Шанхая (Китай) Пудун до станции метро Лунъян-Лу. Поезд “Шанхай Маглев” проходил расстояние 30 км со скоростью  $431 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$  за 7,5 минут, хотя раньше на это уходило 40 минут.

- Строительство системы МагЛев обходится очень дорого (каждый километр этой дороги обходится в  $\approx 43$  миллиона долларов). Несмотря на то, что МагЛев имеет сложную систему, принцип его работы основан на простом явлении. О каком явлении идет речь?

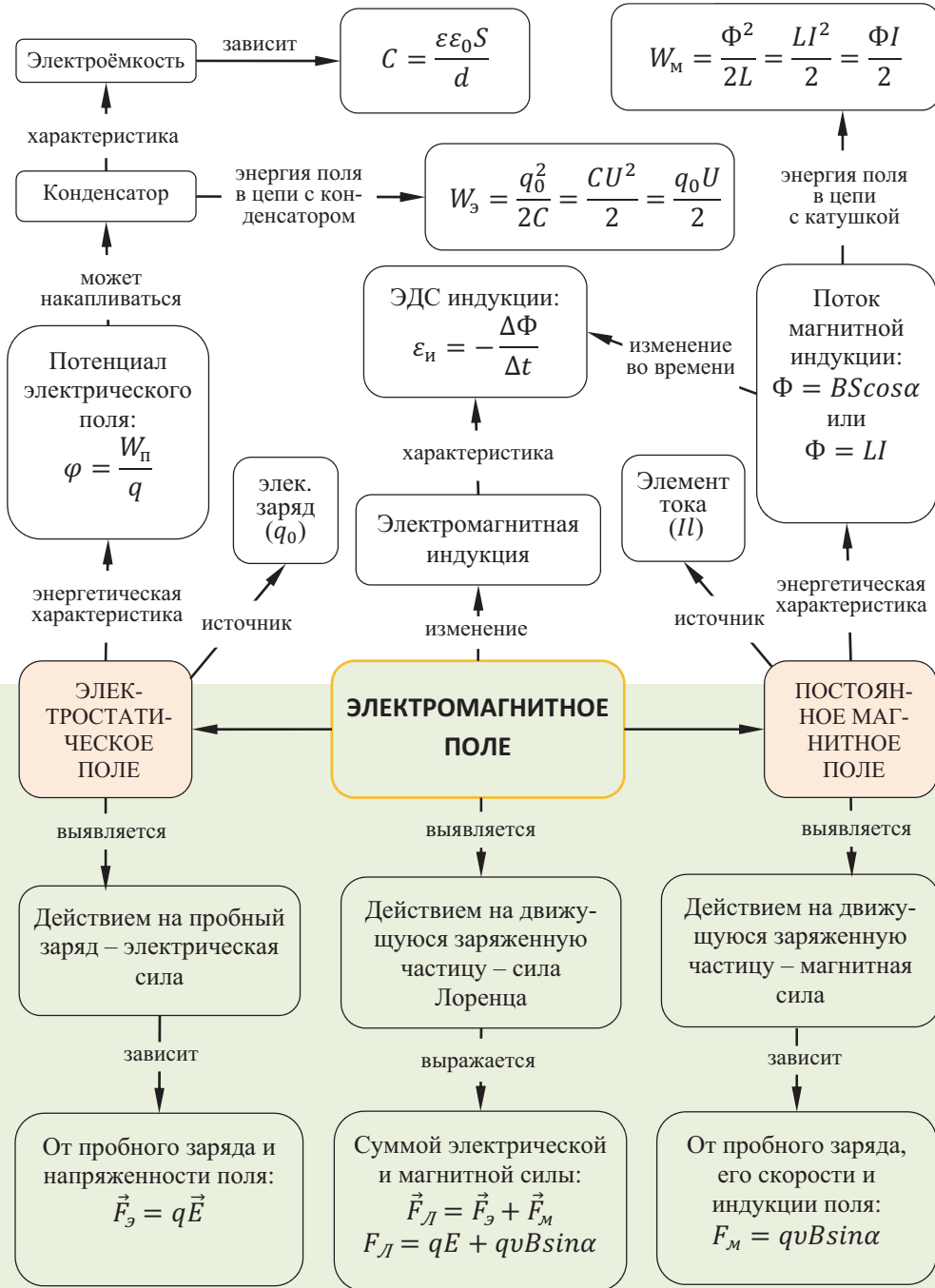
- Ученые стараются получить искусственное Солнце на Земле, изготовив необыкновенную “камеру”, в которой можно было бы удерживать плазму с температурой в несколько миллионов градусов. Необычность этой “камеры”, называемой ТОКАМАК (тороидальная камера с магнитными катушками), заключается в том, что высокотемпературная плазма не касается ее стен.

- Как это достигается?





“Карта понятий” главы



## 1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

Физика – 6, 8 и 9

При трении тел друг о друга на них возникают **электрические заряды**. В этом случае говорят, что тело **наэлектризовано**, оно получило **электрический заряд**, или оно потеряло **электрический заряд**.

- Электрическое взаимодействие между наэлектризованными телами в зависимости от знаков их зарядов может носить характер притяжения или отталкивания:
  - тела, обладающие зарядами одинакового знака, отталкиваются друг от друга;
  - тела, обладающие зарядами противоположного знака, притягиваются друг к другу.
- В природе существуют заряды двух видов: положительный электрический заряд (+) и отрицательный электрический заряд (–). Заряды одинакового знака отталкиваются друг от друга, а заряды разного знака притягиваются друг к другу. Тела, не обладающие избытком электрического заряда, называют электрически нейтральными, или незаряженными телами.
- Электрический заряд обозначают буквой **q**. За единицу измерения электрического заряда в СИ принят 1 кулон, названный так в честь французского ученого Шарля Кулона:  $[q] = 1 \text{ Кл}$ .
- Электростатическое поле – вид материи, который создается неподвижными электрическими зарядами.
- Напряженность электрического поля – силовая характеристика этого поля. Являясь векторной величиной, напряженность электрического поля направлена так же, как и электрическая сила, действующая на положительный заряд.
- Вещества, продолжительное время сохраняющие свои магнитные свойства, называются **постоянными магнитами** или просто **магнитами**. Каждый магнит имеет два полюса: северный (N) и южный (S). Одноименные полюсы магнита отталкиваются, разноименные полюсы магнита притягиваются.
- Магнитное поле – вид материи, который создается движущимися зарядами.
- Индукция магнитного поля (или магнитная индукция) является силовой характеристикой этого поля. Направление вектора магнитной индукции в данной точке магнитного поля совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, помещенной в эту точку поля.

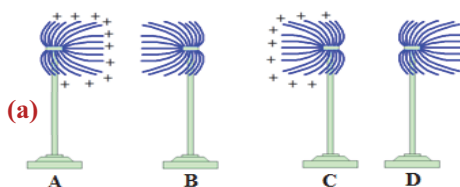
■ Было выяснено, что при полете пчела заряжается положительно. А цветы обладают отрицательным зарядом. Поэтому, когда пчела садится на цветок, ее пыльца прилипает к пчеле. Самым интересным является то, что после контакта пчелы с цветком электромагнитное поле растения меняется. Это изменение как будто подает знаки другим пчелам, находящимся в воздухе: “На этом цветке нет пыльцы!”.

- Почему, находясь в полете, пчела электризуется положительным зарядом?
- Как можно объяснить причину электризации цветков отрицательным зарядом?
- Почему после контакта пчелы с цветком электромагнитное поле растения меняется?



**Что осуществляет передачу взаимодействия между наэлектризованными телами на расстоянии?**

- **Задача 1:** Электрический “султан” состоит из металлического диска, к которому с обеих сторон прикреплены тонкие полоски бумаги. Диск установлен на пластмассовой подставке. На рисунке изображены пары наэлектризованных султанов **А** и **В**, **С** и **Д**. Известно, что султаны **А** и **С** наэлектризованы положительным зарядом **(а)**.
- Если менять султаны места, какие из них будут притягиваться друг к другу?



**Обсуждение результата:**

- Каким (по знаку) зарядом заряжены султаны **В** и **Д**?
- Какие из султанов при приближении друг к другу:
  - а) притягиваются;
  - б) отталкиваются?

**Ответы обосновать.**

- Что осуществляет взаимодействия наэлектризованных тел, удаленных друг от друга?

### Электрический заряд.

• *Электрический заряд – это свойство тел и частиц создавать вокруг себя электромагнитное поле. Электрический заряд принят также количественной мерой измерения этого свойства тел.*

Взаимодействие между заряженными частицами называется электромагнитным взаимодействием. Например, когда говорят, что протон несет положительный заряд, а электрон несет отрицательный заряд, то можно с уверенностью говорить о наличии электромагнитного взаимодействия между ними. Между незаряженными (электрически нейтральными) частицами не существует электромагнитного взаимодействия. Поэтому говорят: *Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитного взаимодействия.*

Электрический заряд обладает следующими особенностями:

1. *Электрический заряд дискретен (не непрерывен, делим) – электрический заряд любого тела кратен целому числу элементарных зарядов:*

$$q = \pm Ne.$$

*Здесь  $N$  – число приобретенных или потерянных телом электронов.*

*Абсолютное значение наименьшего электрического заряда в природе называют элементарным зарядом. Элементарный заряд обозначают буквой  $e$ , численное его значение равно абсолютному значению заряда электрона или протона:*

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Кроме электрона и протона в природе существуют ещё несколько видов элементарных частиц. Однако только электроны и протоны могут существовать в свободном состоянии неограниченно долго. Время жизни остальных заряженных частиц очень мало – миллионные доли секунды. Они образуются в результате столкновений быстрых элементарных частиц, и через ничтожно малое время превращаются в другие частицы.

Дискретность заряда позволяет ему равномерно распределяться по поверхности проводника. Предположим, что заряд равномерно распределился по поверхности площадью  $S$ .

• Величина, численно равная электрическому заряду, приходящемуся на единицу площади поверхности, называется **поверхностной плотностью электрического заряда** ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \frac{q}{S} = \pm \frac{Ne}{S}. \quad (1)$$

Единицей поверхностной плотности электрического заряда в СИ является:

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

2. Для электрического заряда выполняется закон сохранения – алгебраическая сумма электрических зарядов частиц (или тел) замкнутой системы остается неизменной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}. \quad (2)$$

3. Электрический заряд является аддитивной величиной – электрический заряд системы равен алгебраической сумме электрических зарядов частиц (или тел) этой системы.

4. Электрический заряд является инвариантной величиной – электрический заряд частиц (или тел) одинаков во всех инерциальных системах отсчета.

### **Электромагнитное поле.**

Раздел физики, в котором изучаются электрические и магнитные явления, проявляющиеся при движении и взаимодействии электрических зарядов, называется электродинамикой.

• Электродинамика – раздел физики, изучающий закономерности взаимодействия между электрическими зарядами посредством электромагнитного поля.

• Электромагнитное поле – вид материи, осуществляющий взаимодействие между электрически заряженными частицами и телами.

Электрическое и магнитное поля являются особыми формами проявления электромагнитного поля. Поэтому состояние электромагнитного поля в произвольной точке пространства и в любой момент времени характеризуется двумя величинами – напряженностью электрического поля ( $\vec{E}$ ) и индукцией магнитного поля ( $\vec{B}$ ). Эти величины являются силовыми характеристиками электромагнитного поля и определяют силы, с которыми оно действует на заряженные частицы. Под “определением силовых характеристик электромагнитного поля” имеется в виду определение сил, действующих на внесенный в поле пробный заряд (положительный точечный заряд).

Отметим, что действие электромагнитного поля на заряд может быть различным, в зависимости от того, покоится заряд или движется.

• Силу, с которой электромагнитное поле действует на заряд, покоящийся в данной инерциальной системе отсчета, называют электрической. Электрическая сила всегда прямо пропорциональна количественному значению заряда, помещенного в данную точку поля:  $F_э \sim q$ .

• На электрический заряд, движущийся в данной инерциальной системе отсчета, электромагнитное поле действует, кроме электрической силы, ещё с силой, называемой магнитной силой. Магнитная сила прямо пропорциональна и значению движущегося заряда, и проекции скорости заряда, перпендикулярной вектору магнитной индукции:  $F_м \sim qv_{\perp}$ .

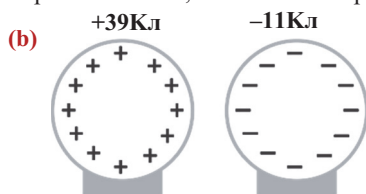
Поэтому на электрический заряд, движущийся в электромагнитном поле, действует результирующая сила, равная сумме электрической и магнитной сил. Эту силу называют **обобщенной силой Лоренца**:

$$\vec{F}_Л = \vec{F}_э + \vec{F}_м, \text{ здесь } F_Л = qE + qvB\sin\alpha.$$



### Как распределяются электрические заряды?

- **Задача 2.** Два одинаковых металлических шара, установленных на резиновых подставках, имеют заряды  $q_1 = +39 \text{ Кл}$  и  $q_2 = -11 \text{ Кл}$  соответственно **(б)**. Сколько заряда останется на каждом из шаров, если их сначала привести в соприкосновение, а потом снова развести?



### Обсуждение результата:

- Что произойдет при соприкосновении наэлектризованных металлических шаров друг с другом?
- Какое явление произойдет при последующем отдалении шаров друг от друга? Чему станет равным заряд каждого из шаров после их разведения?

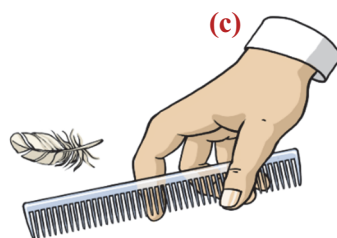
### СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

- а.** Наэлектризуйте расческу, причесав ею волосы, и прикоснитесь расческой к легкой пушинке...

- Что произойдет при этом?

- б.** Встряхнув расческу, оторвите пушинку от неё, и пока она находится в воздухе, расположите расческу под ней на таком расстоянии, чтобы пушинка парила в воздухе на одной и той же высоте **(с)**...

- Почему пушинка не падает на землю, что заставляет её парить в воздухе? Ответы обоснуйте.



### ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Как вы можете объяснить положение “Электрический заряд дискретен”?			
2	Следствием какой особенности электрического заряда является электризация тел трением?			
3	Что осуществляет передачу взаимодействия наэлектризованных тел на расстоянии?			
4	С помощью какого опыта вы сможете доказать существование двух видов зарядов?			

- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте карту понятий “электрический заряд” и “электромагнитное поле”.

## 1.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8

- Поле, созданное неподвижными электрическими зарядами, называется электростатическим.
- Напряженность электрического поля – векторная физическая величина, равная отношению электрической силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}_\text{э}}{q}$ .

Единица измерения напряженности электрического поля в СИ:  $[E] = \frac{[F]}{[q]} = 1 \frac{H}{Kл} = 1 \frac{B}{м}$ .

- Электрическая сила равна произведению напряженности электрического поля на величину помещенного в поле заряда:  $\vec{F}_\text{э} = q\vec{E}$ .
- **Закон Кулона:** сила взаимодействия двух неподвижных точечных электрических зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

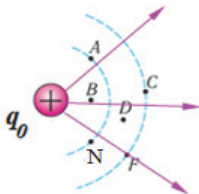
$$F = k \frac{|q_0||q|}{r^2}.$$

Учитывая кулоновскую силу в формуле напряженности, выясняем, от каких величин зависит напряженность электрического поля.

- Модуль напряженности электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $q_0$  в данной точке, прямо пропорционален величине этого заряда и обратно пропорционален квадрату расстояния до этой точки:

$$E = k \frac{|q_0|}{r^2}.$$

- На рисунке изображено поле, созданное неподвижным положительным зарядом  $q_0$  относительно данной системы.



- В какой точке поля модуль силовой характеристики электрического поля ( $\vec{E}$ ) принимает наибольшее значение; наименьшее значение?

### ИССЛЕДОВАНИЕ 1

- **Задача 1.** Исследуйте нижеприведенные вопросы:

- Как изменится напряженность электрического поля при увеличении в два раза значения пробного заряда, внесенного в это поле?
- Как изменится напряженность электрического поля при увеличении в два раза заряда, создавшего это поле?

### Обсуждение результата:

- От чего зависит напряженность электрического поля?

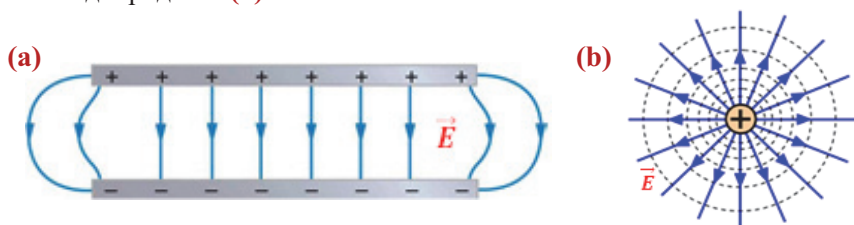
**Электростатическое поле.** Одной из задач электродинамики является определение силовой характеристики электростатического поля, созданного данным электрическим зарядом. Одним из особых состояний электромагнитного поля является создаваемое неподвижным зарядом электростатическое поле.

• *Электрическое поле – это электромагнитное поле, в котором  $\vec{E} \neq 0, \vec{B} = 0$  относительно данной системы отсчета. Электрическое поле, созданное походящимися относительно данной системы отсчета электрическими зарядами, называется электростатическим. В дальнейшем для упрощения, называя поле электрическим, будем подразумевать, что это электростатическое поле.*

Электрическое поле может быть однородным и неоднородным.

• *Однородное электрическое поле – поле, в каждой точке которого численное значение и направление напряженности электрического поля одинаковы. В противном случае поле неоднородное.*

Например, поле между двумя параллельными пластинами, одна из которых обладает положительным, а другая таким же по модулю отрицательным зарядом, является однородным (а), а электрическое поле, создаваемое точечным зарядом, является неоднородным (б).



**Напряженность электрического поля, создаваемого точечным электрическим зарядом в вакууме и в среде.** Известно, что при внесении пробного заряда в электрическое поле точечного заряда  $q_0$  в вакууме между зарядами возникает кулоновское взаимодействие.

• *Силы взаимодействия двух точечных электрических зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними и направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды (с).*

$$F_0 = k \frac{|q_0||q|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_0||q|}{r^2}. \quad (1)$$

Здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности, равный:

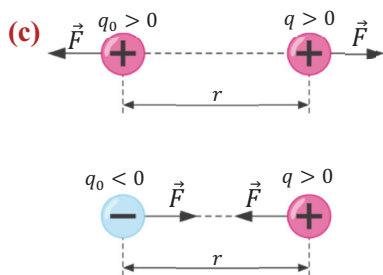
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Эта постоянная показывает, что два точечных заряда по 1 Кл каждый, находящиеся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой  $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$ .

Здесь  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

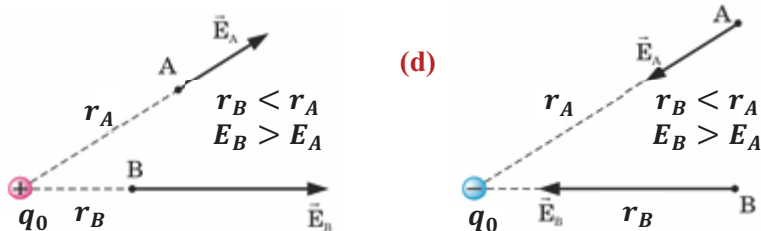
Таким образом, на основе закона Кулона можно определить модуль напряженности электрического поля, созданного в вакууме зарядом  $q_0$  в любой точке на расстоянии  $r$  от источника поля:

$$E_0 = \frac{F}{|q|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_0|}{r^2}. \quad (2)$$



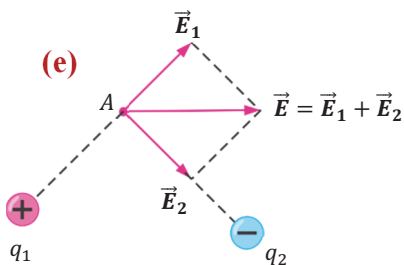
• Напряженность в данной точке электрического поля, созданного точечным зарядом в вакууме, прямо пропорциональна величине этого заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника поля до этой точки.

Если заряд  $q_0$  положительный, то вектор напряженности в произвольной точке поля направлен радиально от источника поля (d), а если же заряд отрицательный – вектор напряженности направлен радиально к источнику поля (заряду  $q_0$ ).



Для электрических полей выполняется **принцип суперпозиции**.

• Напряженность результирующего электрического поля в данной точке пространства, создаваемого несколькими электрическими зарядами, равна геометрической сумме напряженностей отдельных полей:



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

На рисунке изображена схема определения напряженности результирующего поля в точке А, созданного двумя точечными зарядами (e).

В среде (внутри однородного диэлектрика) кулоновская сила взаимодействия зарядов слабее по сравнению с силой их взаимодействия в вакууме в  $\epsilon$  раз:

$$F = \frac{F_0}{\epsilon} = k \frac{|q_0||q|}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_0||q|}{r^2}.$$

Здесь  $\epsilon$  – величина, называемая диэлектрической проницаемостью среды и показывающая, во сколько раз кулоновская сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме при неизменном расстоянии между ними:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}.$$

Напряженность электрического поля в среде меньше, чем в вакууме, в  $\epsilon$  раз:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_0|}{r^2}.$$

Значит, диэлектрическая проницаемость среды также является физической величиной, показывающей, во сколько раз напряженность электрического поля, созданного электрическим зарядом в данной точке внутри однородного диэлектрика, меньше, чем в вакууме:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Диэлектрическая проницаемость различных сред различна. Например, для дистиллированной воды  $\epsilon = 81$  (для вакуума  $\epsilon = 1$ ).



**Определите направление напряженности поля**

- **Задача 2.** Определите направление вектора напряженности результирующего поля, созданного двумя точечными зарядами в точке N.



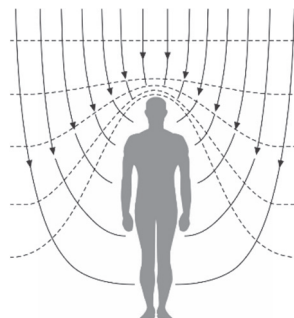
**Обсуждение результата:**

- Напряженность электрического поля какого из зарядов в точке N больше? Почему?

**СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

В повседневной жизни мы сталкиваемся с тем, что одежда, которую мы надеваем, и наше тело по разным причинам (трение, прикосновение и др.) электризуются. В результате каждый из нас превращается в источник электромагнитного поля. Это в свою очередь становится причиной возникновения различных заболеваний организма. Поэтому следует регулярно освобождать наше тело от накопившихся электрических зарядов.

- **Каким способом можно легко освободить наше тело от накопившихся электрических зарядов?**



**ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Можно ли, исходя из формулы $\vec{E} = \frac{\vec{F}_2}{q}$ , утверждать, что напряженность электрического поля прямо пропорциональна электрической силе и обратно пропорциональна величине пробного заряда? Почему?			
2	Как изменится сила взаимодействия двух электрических зарядов при перенесении их, без изменения расстояния между ними, из вакуума в среду с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 8$ ?			
3	На заряд $0,5 \text{ мКл}$ в некоторой точке электрического поля в вакууме действует сила $0,018 \text{ Н}$ . Определите напряженность электрического поля в этой точке.			
4	Каков предел дальности действия электрического поля?			

- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах определения понятий: “электрическое поле”, “электростатическое поле”, “кулоновская сила”, “напряженность электрического поля, созданного точечным зарядом в вакууме”.

### 1.3. РАБОТА ОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПОТЕНЦИАЛ. НАПРЯЖЕНИЕ

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 10

Энергетическая характеристика электрического поля называется *электрическим напряжением* или просто *напряжением*.

• Скалярная величина, показывающая, какую работу совершило электрическое поле при перемещении единичного заряда из одной точки поля в другую, называется *электрическим напряжением* между этими точками поля:

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

Единицей измерения напряжения в СИ является вольт:  $[U] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В}$ .

• *Механическая работа* – скалярная физическая величина, равная произведению модуля силы, действующей на тело, модуля перемещения тела и косинуса угла между векторами силы и перемещения:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

Работа силы тяжести в гравитационном поле Земли:  $A = F_{\text{тяж}} \cdot h = mgh$ .

• *Работа силы тяжести не зависит от формы траектории движения тела, она зависит от разности уровней начального и конечного положений центра тяжести тела.*

$$A = -(mgh_2 - mgh_1).$$

• *Силы, работа которых не зависит от формы траектории движения тела, называются консервативными. Значит, сила тяжести – консервативная сила.*

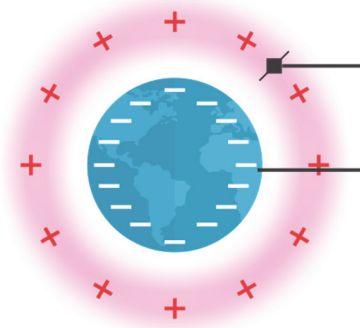
Это положение позволяет вывести понятие “потенциальной энергии” для системы тел, взаимодействующих с силами гравитационного взаимодействия. Так, выражение  $mgh$  в последней формуле является потенциальной энергией взаимодействия Земли и тела, находящегося на высоте  $h$  от поверхности Земли:

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

• *Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком:*

$$A = -(E_2 - E_1) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

■ Проведенные учеными исследования показали, что Земля обладает отрицательным электрическим зарядом, а слой ионосферы в её атмосфере – положительным зарядом. Слои атмосферы, лежащие между ними, играют роль изолятора.



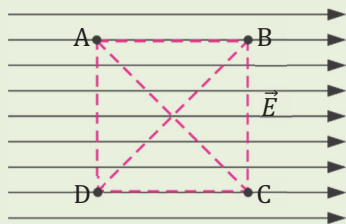
• Как бы двигались заряды в проводнике, если бы им можно было соединить Землю с ионосферой? Почему?

### От чего не зависит работа электрического поля?

- **Задача 1.** На рисунке изображено однородное электрическое поле, напряженность которого равна  $50 \text{ Н/Кл}$ . Точки А, В, С и D являются вершинами квадрата со стороной  $10 \text{ см}$ . Точечный заряд  $+10 \text{ нКл}$  перемещают в этом поле. Определите работу, которую совершит электрическое поле при перемещении заряда вдоль прямой линии:
- 1) Из А в В; 2) Из В в С; 3) Из С в D;
  - 4) Из D в А; 5) Из С в А; 6) Из В в D;
  - 7) Какую работу совершит электрическое поле при перемещении заряда по замкнутому контуру вдоль всех сторон квадрата?

### Обсуждение результата:

- Чему равна работа электрического поля по перемещению пробного заряда между данными точками?
- К какому результату приводят проведенные вычисления работы электрического поля?



**Работа однородного электрического поля.** Работа однородного электрического поля, в котором положительный пробный заряд под действием постоянной электрической силы  $\vec{F}_э = q\vec{E}$  совершает перемещение  $\vec{s}$  между двумя точками поля, равна (а):

$$A = F_э \cdot s \cdot \cos\alpha.$$

Здесь  $\alpha$  – угол между силовой линией поля и вектором перемещения заряда.

Так как проекция вектора перемещения на силовую линию равна  $d = s \cdot \cos\alpha$ , то работа поля будет равна:

$$A = qEd. \quad (1)$$

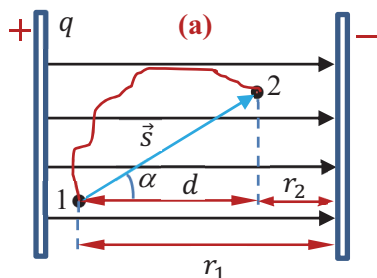
• Работа однородного электрического поля при перемещении пробного положительного заряда равна произведению модуля этого заряда на модуль напряженности электрического поля и на проекцию его перемещения на направление силовых линий.

Выражение (1) можно написать и так:  $A = qE(r_1 - r_2).$  (2)

Здесь  $r_1$  и  $r_2$  – соответственно расстояния от отрицательной пластины до точек 1 и 2. Вследствие пропорциональности работы электрического поля величине пробного заряда отношение  $\frac{A}{q}$  не зависит от величины пробного заряда и не зависит от траектории его движения. Это отношение зависит от электрического поля, а также от начального и конечного положений заряда в поле.

Так как работа электрической силы при переносе пробного заряда из одной точки электрического поля в другую не зависит от формы траектории, то электрическая сила является консервативной, а электрическое поле – потенциальным.

• Скалярная физическая величина, равная отношению работы электрического поля при переносе электрического заряда из одной точки поля в другую к величине



этого заряда, называется **разностью потенциалов** между этими точками, или **напряжением** между ними:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3)$$

Здесь  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов. Индексы 1 и 2 указывают на точки поля, между которыми перемещается заряд. Единицей измерения разности потенциалов в СИ является вольт:  $[\varphi_1 - \varphi_2] = 1 \frac{Дж}{Кл} = 1 В$ .

Из выражения (3) можно определить работу поля при перемещении заряда между двумя его точками:

• *Работа электрического поля при перемещении заряда между двумя его точками равна произведению заряда на разность потенциалов (напряжение) между ними:*

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (4)$$

Сравнивая (1) и (3), получим формулу, связывающую напряженность и напряжение:

$$U = \frac{A}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed \rightarrow E = \frac{U}{d} \text{ или } E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \quad (5)$$

Напряженность электрического поля направлена от точки поля с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

**Потенциал электрического поля.** Для выражения энергетической характеристики электрического поля в произвольной точке используется физическая величина, называемая *потенциалом*. Разность потенциалов между любой точкой электрического поля и точкой, принятой за нулевой потенциал, называют потенциалом поля в этой точке. Обычно вычисление потенциала производится относительно бесконечности.

• *Потенциал – скалярная величина, численно равная работе поля по перемещению единичного положительного заряда в бесконечность при его отталкивании от положительного заряда q:*

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_\infty = \frac{A_{1 \rightarrow \infty}}{q}. \quad (6)$$

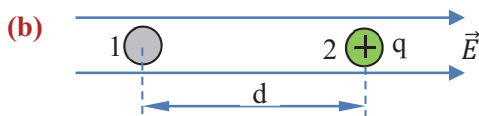
Потенциал обозначается символом  $\varphi$ . Единицей измерения потенциала в СИ является вольт:  $[\varphi] = 1 \frac{Дж}{Кл} = 1 В$ .

**Потенциальная энергия заряда в электрическом поле.** Так как электрическое поле является потенциальным, то к замкнутой системе заряд-электрическое поле можно применить теорему о потенциальной энергии.

• *Работа, совершенная в потенциальном поле, равна изменению потенциальной энергии системы, взятому с противоположным знаком:*

$$A = W_{n1} - W_{n2} = -(W_{n2} - W_{n1}) = -\Delta W_n. \quad (7)$$

Здесь  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$  – потенциальные энергии заряда в точках 1 и 2 поля **(b)**.



Сравнив выражения (4) и (7), получим:

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

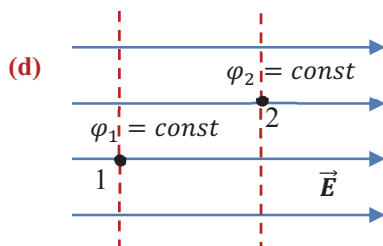
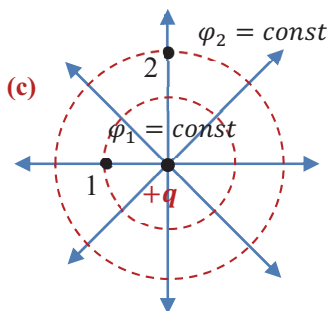
$$W_n = q\varphi.$$

Отсюда:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}. \quad (8)$$

Значит, величина, определяемая отношением потенциальной энергии пробного заряда в данной точке поля к величине заряда, равна потенциалу поля.

**Эквипотенциальные поверхности.** Поверхность, во всех точках которой потенциал поля принимает одинаковые значения, называется **эквипотенциальной**. Для точечного заряда эквипотенциальными являются концентрические сферы, центры которых совпадают с местонахождением заряда **(с)**. Для однородного электрического поля – это поверхности, перпендикулярные силовым линиям поля **(д)**.



#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

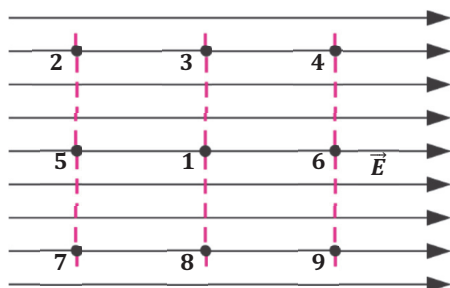
2

**Как изменится потенциальная энергия заряда?**

- **Задача 2.** На рисунке изображено электрическое поле.

В начальный момент времени отрицательный пробный заряд помещен в точку 1. При переносе заряда в какую из точек его потенциальная энергия:

- увеличится;
- уменьшится;
- не изменится?

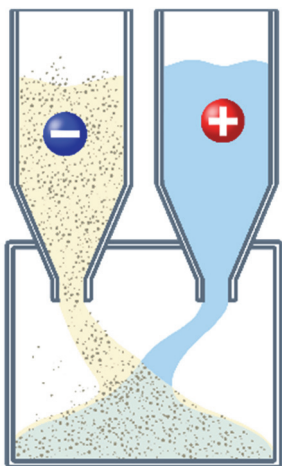


**Обсуждение результата:**

- Как можно выяснить, изменилась или нет потенциальная энергия пробного заряда при его движении между двумя точками поля?

### СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

(е)



На предприятиях по выпечке хлеба самой тяжелой работой считается смешивание большой массы муки с водой, разбавленной сметаной, и получение однородного теста. На современных хлебопекарнях этот процесс выполняют автоматические устройства, принцип работы которых основан на применении свойств электрического поля. На рисунке изображена упрощенная схема одной из таких установок (е).

• Можете ли вы объяснить принцип её работы?

### ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Напряжение между двумя токами равно 12 В. Что это значит?			
2	Заряд одного из двух проводников меньше, чем другого, а потенциал больше. Как станут двигаться электрические заряды в проводниках, если их привести в соприкосновение?			
3	Точки А и В находятся на линии напряженности электрического поля. Как направлена напряженность поля, если потенциалы этих точек $\varphi_A < \varphi_B$ ?			

- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах определения и формулы для следующих понятий: “электрическое поле”, “работа электрического поля”, “напряжение”, “потенциал”, “связь между напряженностью и напряжением”.



## 1.4. КОНДЕНСАТОР. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8

- Конденсатор – устройство, используемое для накопления электрических зарядов. Его название происходит от латинского слова “kondensare”, что означает сгущение.

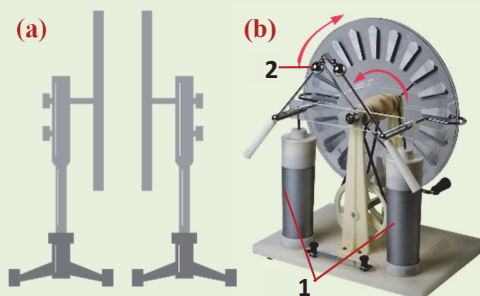
Самый простой конденсатор – плоский конденсатор, состоит из двух близко расположенных параллельных металлических пластин с тонким слоем диэлектрика (например, воздуха) между ними (а). На схемах электрических цепей конденсатор обозначают как  $\dashv \dashv$ .

- Пластины конденсатора электризуются равными по модулю зарядами противоположных знаков.

- Способность конденсатора накапливать электрический заряд характеризуется физической величиной, называемой **электрической ёмкостью**.

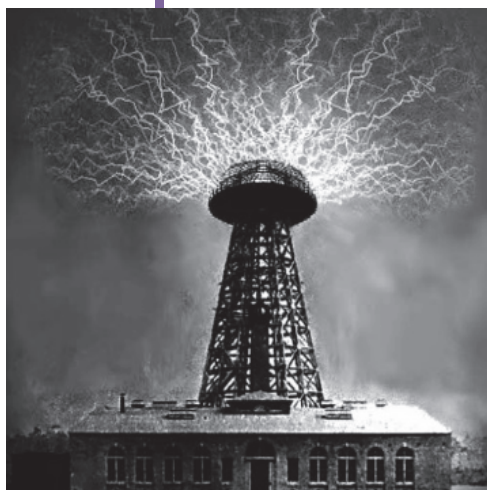
- Для разделения, накопления и передачи большого количества электрического заряда разных знаков используются устройства, называемые **электрофорной машиной (б)**.

Быстро вращаясь, диски электрофорной машины трутся о воздух между ними и электризуются зарядами разного знака. Заряды пластин снимаются с помощью металлических щеток и накапливаются в двух лейденских банках (1), а оттуда передаются на сферические металлические кондукторы (2). В результате на одном из кондукторов накапливается положительный, а на другом – отрицательный заряд.



■ Известный сербский ученый Никола Тесла (1856–1943) выдвинул идею о том, что система Земля – атмосфера представляет собой гигантский конденсатор, который является источником дешевой электрической энергии. Согласно этой идее, совпадение частоты слабого электромагнитного излучения, посылаемого в ионосферу Земли, с собственной частотой заряженных частиц ионосферы вызовет в ней резонанс. В результате возникнет очень сильное излучение, окружающее Землю. В это время достаточно будет в любой точке поверхности Земли воткнуть длинный металлический стержень, чтобы непрерывно получать из неба бесплатную электрическую энергию. Главной проблемой было построение башни для создания возбуждающих ионосферу импульсов – резонатора. Американский миллиардер Морган принял решение о финансировании постройки этой башни в Лонг-Айленде (США). Однако незадолго до завершения работы он приостановил и отменил этот проект в целях предотвращения возможной экологической катастрофы.

- Если бы проекту суждено было осуществиться, какие экологические катастрофы могли бы произойти на Земле?



# ИССЛЕДОВАНИЕ

1

## Что доказывает свечение лампы?

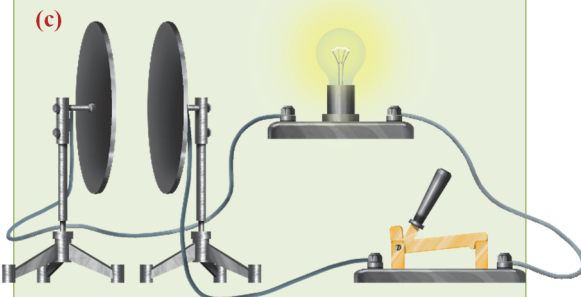
**Оборудование:** плоский конденсатор, электрофорная машина, электрическая лампа (6 В), ключ и соединительные провода.

## Ход работы:

1. Соберите цепь из последовательно соединенных конденсатора, лампы и ключа.
2. Замкните цепь и проконтролируйте, светится лампа или нет.
3. Разомкните цепь и зарядите одну из пластин конденсатора с помощью электрофорной машины (с). Замкните цепь и задумайтесь над причиной наблюдаемого явления.

## Обсуждение результата:

- В каком случае лампа в цепи светится?
- К какому выводу можно прийти из эксперимента: что доказывает свечение лампы?



Известно, что простейшим конденсатором является плоский конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин. Характеристикой конденсатора является электрическая ёмкость.

• *Электрическая ёмкость конденсатора (C) – скалярная физическая величина, равная отношению заряда конденсатора к разности потенциалов (напряжению) между его пластинами:*

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Единицей измерения электрической ёмкости в СИ является фарад (1Ф):

• *1 фарад – это электрическая емкость конденсатора, когда заряд пластин 1 Кл создает между ними напряжение 1В:*

$$[C] = \frac{[q]}{[U]} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{ Ф}.$$

Фарад – очень большая ёмкость, поэтому на практике используются его долинные единицы (микрофарад, нанофарад, пикофарад и др.):

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}, 1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}, 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Заряд конденсатора равен модулю заряда одной из пластин конденсатора. Этот заряд прямо пропорционален напряжению на концах источника, подключенного к конденсатору:

$$q = CU. \quad (2)$$

Значит, электроёмкость является коэффициентом пропорциональности между зарядом и напряжением и не зависит ни от заряда, ни от напряжения. От чего же зависит электроёмкость?

• *Электрическая ёмкость плоского конденсатора зависит от площади его пластин, расстояния между пластинами и диэлектрической проницаемости вещества, находящегося между ними:*

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (3)$$

Здесь S – площадь одной из пластин конденсатора, d – расстояние между пластинами, ε – диэлектрическая проницаемость вещества, которое находится между

его пластинами. Именно диэлектрик, находящийся между пластинами, дает конденсатору возможность длительное время сохранять заряд. Если диэлектриком между пластинами является только воздух ( $\varepsilon = 1$ ), то такой конденсатор называется воздушным и его электроёмкость:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (4)$$

**Энергия электрического поля конденсатора.** Энергия однородного электрического поля между пластинами плоского заряженного конденсатора определяется нижеприведенной формулой:

$$W_э = \frac{qU}{2}. \quad (5)$$

**Примечание.** Множитель  $\frac{1}{2}$  в выражении (5) указывает на то, что при движении пластин конденсатора в отдельности каждая из них оказывается движущейся в электрическом поле, созданным зарядом другой пластины. Напряженность поля одной пластины в 2 раза меньше напряженности электрического поля между пластинами.

Если учесть здесь выражение (2), то получаются выражения, отражающие зависимость энергии конденсатора от ёмкости и заряда конденсатора:

$$W_э = \frac{CU^2}{2}, \quad (6)$$

или

$$W_э = \frac{q^2}{2C}. \quad (7)$$

Если учесть выражение (3) в выражениях (6) и (7), то можно получить следующие выражения для энергии электрического поля плоского конденсатора:

$$W_э = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{q^2 d}{2\varepsilon_0 \varepsilon S}. \quad (8)$$

Распределение энергии электрического поля в пространстве выражается физической величиной, называемой *плотностью энергии электрического поля*:

• *Плотность энергии электрического поля* – физическая величина, численно равная энергии электрического поля, приходящейся на единицу объёма:

$$w_э = \frac{W_э}{V}. \quad (9)$$

Здесь  $w_э$  – плотность энергии электрического поля, единица её измерения в СИ:  $[w_э] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ .

Если в последнем выражении учесть формулу (8), выражения  $V = Sd$  и  $U = Ed$ , то станет очевидным, что плотность энергии электрического поля прямо пропорциональна квадрату напряженности поля:

$$w_э = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}. \quad (10)$$

**Примечание.** Конденсатор не может служить аккумулятором, длительное время сохраняющим в себе электрическую энергию (из-за утечки заряда). Однако он, в отличие от аккумулятора, способен мгновенно разряжаться в цепи с малым сопротивлением. Это свойство конденсатора широко используется на практике (например, во вспышках фотоаппаратов и лампах мобильных телефонов).

**Как изменится электрическая ёмкость конденсатора?**

**Задача.** Как изменится электроёмкость плоского воздушного конденсатора при:

- увеличении площади его пластин в 2 раза?
- увеличении расстояния между его пластинами в 4 раза?
- уменьшении заряда пластин в 3 раза?
- заполнении пространства между пластинами диэлектриком с  $\epsilon = 27$ ?

**Обсуждение результата:**

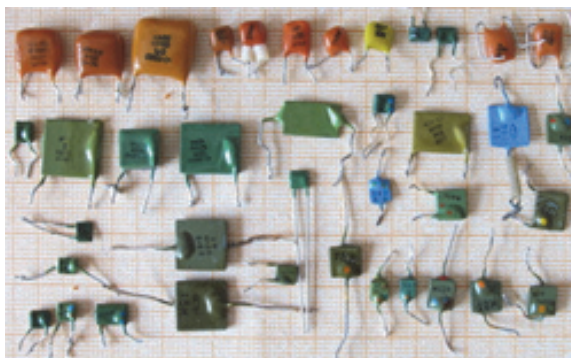
- От каких величин зависит, а от каких не зависит электроёмкость плоского конденсатора?

**СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

В электротехнике широко используются конденсаторы различного размера и ёмкости (d).

- Благодаря какому свойству конденсатора используют в бытовых электрических приборах?

(d)

**ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Что означает множитель $\frac{1}{2}$ в формуле энергии однородного электрического поля между пластинами конденсатора?			
2	Электроёмкость конденсатора увеличили в 4 раза при постоянном значении его заряда. Определите: а) изменение энергии конденсатора; б) изменение напряжённости поля между пластинами конденсатора.			
3	Электроёмкость плоского конденсатора и расстояние между его обкладками увеличили в 3 раза при неизменном значении напряжения между ними. Определите: а) изменение энергии конденсатора; б) изменение величины заряда конденсатора; в) изменение плотности энергии электрического поля.			

- ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листках определения и формулы следующих понятий и выражений: “электрическая ёмкость”, “конденсатор”, “электроёмкость плоского конденсатора зависит от ...”, “энергия однородного электрического поля между пластинами конденсатора”, “плотность энергии”.

## 1.5. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8

Электрическая цепь может состоять из различных элементов: источник тока, потребители (лампа, электрический звонок, электрический нагреватель, телевизор и др.), ключ, соединительные провода. Одной из простейших цепей является последовательное соединение этих элементов.

• При последовательном соединении конец каждого проводника соединяется с началом последующего.

• При последовательном соединении силы токов одинаковы в любой части цепи:  $I_1 = I_2 = I$ .

• Общее напряжение цепи при последовательном соединении равно сумме напряжений отдельных участков этой цепи:

$$U_1 + U_2 = U.$$

• Общее сопротивление при последовательном соединении равно сумме сопротивлений отдельных ее участков:

$$R_1 + R_2 = R_A.$$

• Общее сопротивление  $R_{\text{полс}}$  цепи, состоящей из  $n$  проводников с одинаковым сопротивлением  $R$ , в  $n$  раз больше сопротивления каждого проводника:  $R_{\text{полс}} = nR$ .

• Параллельным называется соединение проводников, при котором начала всех проводников соединяются в одной точке (например, в точке А), а концы в другой (например, в точке В).

• Напряжения на концах параллельно соединенных проводников одинаковы:  $U_1 = U_2 = U$ .

• При параллельном соединении сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в отдельных ветвях цепи:  $I_1 + I_2 = I$ .

• Величина, обратная общему сопротивлению параллельно соединенных проводников, равна сумме величин, обратных сопротивлению каждого проводника:

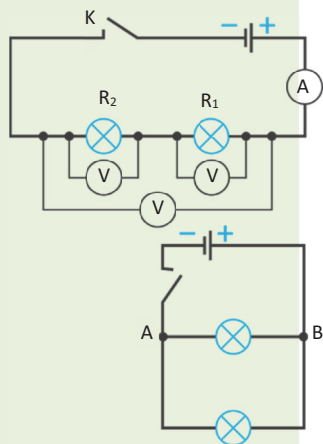
$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Общее сопротивление участка цепи, состоящей из двух параллельно соединенных проводников, равно:

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

В соответствии с этим общее сопротивление участка цепи, состоящей из  $n$  числа параллельно соединенных проводников с одинаковым сопротивлением  $R$ , меньше сопротивления каждого из них в  $n$  раз:

$$R_{\text{пар}} = \frac{R}{n}.$$



■ На практике часто случается, что при выходе из строя бытовых приборов для срочного их ремонта отсутствуют конденсаторы с необходимым номиналом электроёмкости и напряжения. В таких случаях приходится получить необходимый номинал, используя конденсаторы различного номинала. А для этого необходимо знать правила их соединений.

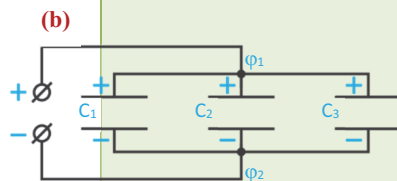
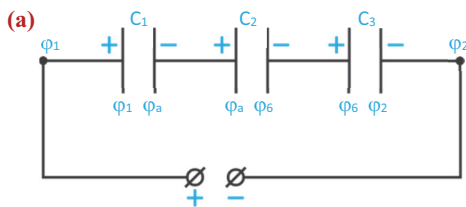
• Почему возникает необходимость знания правил соединений конденсаторов различного номинала?

• Какие правила соединений конденсаторов возможны? Чем отличаются характеристики соединений конденсаторов от характеристик соединений проводников?

### Соединение конденсаторов

**Задача 1.** На рисунке изображены схемы последовательного и параллельного соединений трёх конденсаторов (**a** и **b**). Определите (после зарядки конденсаторов):

- заряд и напряжение батареи последовательно соединённых конденсаторов;
- заряд и напряжение батареи параллельно соединённых конденсаторов.

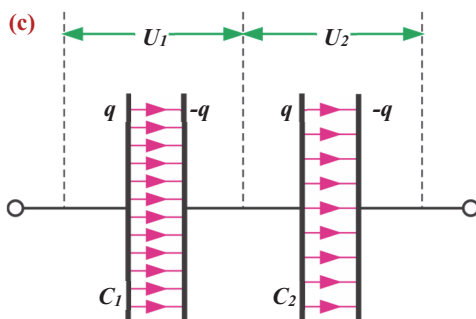


### Обсуждение результатов:

- Чему равна общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов? Как её можно определить?
- Чему равна общая ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов?

С целью получения различных значений электроёмкости собирают батареи конденсаторов, соединяя их либо последовательно, либо параллельно.

**Последовательное соединение конденсаторов.** При последовательном соединении конденсаторов отрицательно заряженная пластина первого конденсатора соединена с положительно заряженной пластиной второго и т.д. (**c**).



- Заряды последовательно соединённых конденсаторов одинаковы:  

$$q_1 = q_2 = q.$$
- Общее напряжение на концах цепи, состоящей из последовательно соединённых конденсаторов, равно сумме напряжений отдельных конденсаторов:  

$$U_1 + U_2 = U.$$
- Величина, обратная общей электроёмкости батареи последовательно соединённых конденсаторов, равна сумме величин, обратных значениям электроёмкостей отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_{\text{посл}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

- Общая ёмкость цепи, состоящей из последовательно соединенных  $n$  конденсаторов одинаковой ёмкости, в  $n$  раз меньше ёмкости одного конденсатора:

$$C_{\text{посл}} = \frac{C}{n}.$$

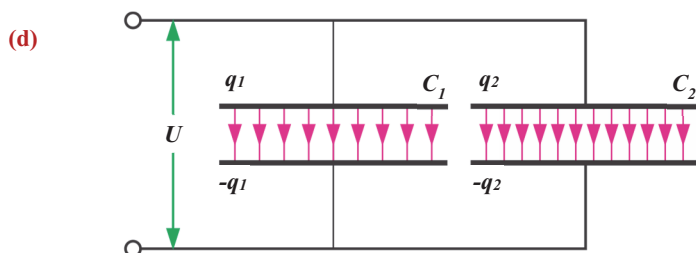
- Напряжение и энергия последовательно соединенных конденсаторов обратно пропорциональны их электрическим ёмкостям:

$$U = \frac{q}{C} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1};$$

$$W = \frac{q^2}{2C} \Rightarrow \frac{W_1}{W_2} = \frac{C_2}{C_1}.$$

### Параллельное соединение конденсаторов

При параллельном соединении положительно заряженные пластины всех конденсаторов соединяют в одной точке, а отрицательно заряженные пластины в другой точке **(d)**.



- Общий заряд параллельно соединенных конденсаторов равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2.$$

- Напряжения на концах параллельно соединенных конденсаторов одинаковы:

$$U_1 = U_2 = U.$$

- Общая электроёмкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме электроёмкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2.$$

- Общая электроёмкость  $n$  числа параллельно соединенных одинаковых конденсаторов в  $n$  раз больше электроёмкости одного конденсатора:

$$C_{\text{пар}} = nC.$$

- Электрические заряды и энергии параллельно соединенных конденсаторов прямо пропорциональны их электроёмкостям:

$$q = UC \Rightarrow \frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2};$$

$$W = \frac{CU^2}{2} \Rightarrow \frac{W_1}{W_2} = \frac{C_1}{C_2}.$$



### Как меняются характеристики конденсатора?

**Задача 2.** Два плоских конденсатора, ёмкости которых равны  $C_1 = 3C$  и  $C_2 = 4C$ , соединены параллельно. Зная, что напряжение на концах первого конденсатора равно  $12\text{ В}$ , а его энергия равна  $96\text{ мДж}$ , вычислите:

- напряжение на концах второго конденсатора;
- общую ёмкость этой батареи конденсаторов;
- энергию второго конденсатора.

### Обсуждение результата:

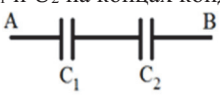
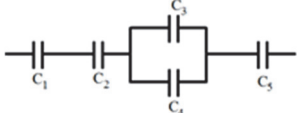
- В каком случае энергия батареи конденсаторов, подключенных к источнику постоянного напряжения больше: при последовательном соединении конденсаторов или при параллельном? Почему?

### СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Ученик 11-го класса Ариф по просьбе бабушки отнес радиоприемник в сервис для устранения неполадок в нем. Выяснилось, что в радиоприемнике перегорел конденсатор ёмкостью  $12,5\text{ мкФ}$ . В сервисе конденсатора такого номинала не оказалось. Однако мастер соединил четыре конденсатора ёмкостями  $C_1 = 2\text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 5\text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 6\text{ мкФ}$  и  $C_4 = 6\text{ мкФ}$  таким образом, что полученная батарея конденсаторов дала требуемый номинал. Радиоприемник заработал.

- Как мастер соединил 4 конденсатора различной ёмкости, чтобы получить общую ёмкость  $12,5\text{ мкФ}$ ? Можете ли вы нарисовать схему этого соединения?

### ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Чем отличается последовательное и параллельное соединения конденсаторов от аналогичных соединений резисторов?			
2	Напряжение между точками А и В равно $9\text{ В}$ . Ёмкости конденсаторов равны $C_1 = 3\text{ мкФ}$ и $C_2 = 6\text{ мкФ}$ . Вычислите: а) заряды конденсаторов $q_1$ и $q_2$ ; б) напряжения $U_1$ и $U_2$ на концах конденсаторов. 			
3	Вычислите общую ёмкость батареи конденсаторов, ёмкость каждого из которых равна $C = 1\text{ мкФ}$ . 			

- ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах основные характеристики следующих соединений: “последовательное соединение конденсаторов”, “параллельное соединение конденсаторов”.

## 1.6. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. СИЛА ЛОРЕНЦА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9 и 10

- При равномерном движении по окружности линейная скорость материальной точки численно равна отношению пройденного пути ко времени, за которое этот путь пройден:  $v = \frac{l}{t} = \frac{2\pi R}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi R}{v}$ .

• При равномерном движении по окружности модуль центростремительного ускорения материальной точки равен отношению квадрата линейной скорости к радиусу окружности:  $a = \frac{v^2}{R}$ .

• Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, называется силой Лоренца:  $F_L = qBv \sin \alpha$ .

Если заряженная частица влетает в магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям индукции, то сила Лоренца принимает максимальное значение:

$$F_{L\max} = qBv.$$

Сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ , её направление определяется правилом левой руки.

• **Правило левой руки для определения направления силы Лоренца:** левую руку следует расположить в магнитном поле так, чтобы вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  входил в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного заряда), тогда отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца.

- Вблизи Северного и Южного полюсов Земли наблюдаются очень красивые природные явления, называемые “полярным сиянием”. Причиной возникновения полярного сияния является действие магнитного поля Земли на поток заряженных частиц в атмосфере.

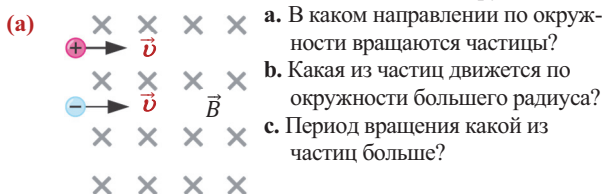


- Какова связь полярного сияния с магнитным полем и потоком заряженных частиц? Откуда появляется этот поток заряженных частиц?
- Почему это явление обычно происходит вблизи полюсов?

### ИССЛЕДОВАНИЕ 1

**В каком направлении вращается частица?**

**Задача 1.** Электрон и протон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору индукции поля с одинаковыми скоростями (а). Обе частицы начинают двигаться по окружности.



### Обсуждение результата:

- Может ли заряженная частица двигаться в однородном магнитном поле прямолинейно и равномерно? Ответ обоснуйте.
- В каком случае заряженная частица в однородном магнитном поле движется по окружности?
- От чего зависят радиус кривизны траектории движения и период обращения частицы при ее движении по окружности в магнитном поле?

• *Магнитное поле – это электромагнитное поле, индукция магнитного поля которого относительно данной системы отсчета отлична от нуля ( $\vec{B} \neq 0$ ), напряженность электрического поля которого равна нулю ( $\vec{E} = 0$ ).*

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца:

$$F_L = qBv \sin \alpha. \quad (1)$$

Так как направление силы Лоренца перпендикулярно направлению скорости частицы ( $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ ), то эта сила не совершает работы:  $A = 0$ . По этой причине сила Лоренца не может изменить модуль скорости и импульса частицы, а также ее кинетическую энергию. Она способна изменить лишь направление движения частицы. Согласно II закону Ньютона, уравнение движения заряженной частицы в неизменном во времени однородном магнитном поле (при условии  $v \ll c$ ) имеет вид:

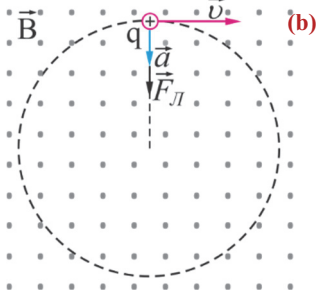
$$ma = |q|Bv \sin \alpha. \quad (2)$$

Если частица влетает в поле в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), то на неё действует максимальная сила Лоренца ( $\sin 90^\circ = 1$ ):

$$F_{max} = |q|Bv.$$

В этом случае уравнение движения частицы:

$$ma = |q|Bv. \quad (3)$$



Сообщая телу центростремительное ускорение (так как  $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ ), сила Лоренца заставляет его вращаться по окружности радиусом  $R$  (b):

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Уравнение движения частицы преобразуется:

$$\frac{mv^2}{R} = |q|Bv. \quad (4)$$

Из выражения (4) можно выяснить, от каких величин зависит радиус окружности, по которой вращается частица:

$$R = \frac{mv}{|q|B} = \frac{p}{|q|B} = \frac{\sqrt{2mE_k}}{|q|B}. \quad (5)$$

Здесь  $p$  и  $E_k$  – соответственно модуль импульса и кинетическая энергия частицы.

• *Радиус окружности, которую описывает заряженная частица в однородном магнитном поле, прямо пропорционален модулю скорости его движения (импульса) и обратно пропорционален модулю вектора магнитной индукции поля.*

Период обращения частицы по окружности зависит от массы частицы, величины заряда и модуля индукции магнитного поля:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}. \quad (6)$$

### Определите знак частицы

**Задача 2.** Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле с определенной скоростью перпендикулярно вектору индукции (вектор индукции направлен к наблюдателю перпендикулярно плоскости рисунка). Модуль магнитной индукции равен 4 Тл. Под действием магнитного поля частица начинает вращаться по окружности радиусом 0,5 м в направлении против часовой стрелки. Зная, что на один полный оборот частица затрачивает 0,01 с, определите:

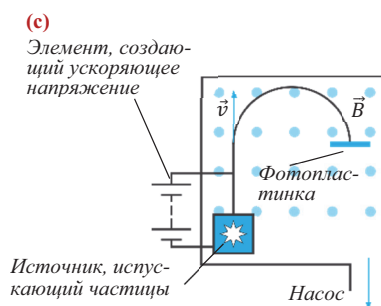
- знак заряда частицы;
- её удельный заряд (отношение заряда частицы к ее массе).

### Обсуждение результата:

- Как можно определить знак заряда частицы, вращающейся по окружности под действием силы Лоренца?
- С помощью какой формулы можно определить удельный заряд частицы?

### СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Прибор, используемый для определения массы частицы, называется “масс-спектрограф”. Принцип его работы заключается в следующем: вакуумная камера прибора помещается в однородное магнитное поле (вектор его индукции направлен к нам перпендикулярно плоскости рисунка). Заряженные частицы сначала ускоряются электрическим полем, а затем, отклоняясь магнитным полем, описывают дугу, оставляя след на фотопластинке (с). Радиус кривизны дуги измеряется. Это позволяет точно вычислить массу частицы с известным значением заряда.



- Как можно вычислить массу частицы по известным значениям ее заряда и радиуса кривизны траектории ее движения?

### ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Вопросы	Знаю		
	слабо	средне	хорошо
Составьте задачи на основе изображенных рисунков.			
<div>1</div>			
<div>2</div>			
<div>3</div>			
<div>4</div>			
<div>5</div>			

- ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте карту понятия “сила Лоренца”.

## 1.7. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. СИЛА АМПЕРА

• ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

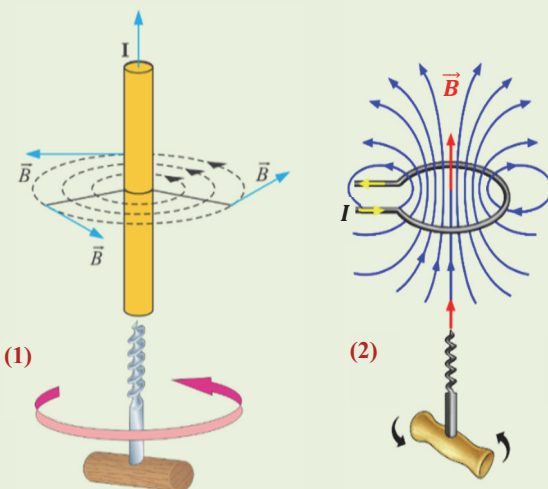
Физика – 9

Направление вектора индукции магнитного поля, созданного электрическим током, удобно определять **правилом правого буравчика**: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика показывает направление вектора индукции магнитного поля, созданного этим током (1). Направление вектора индукции магнитного поля кругового тока также определяется **правилом правого буравчика**: если вращать рукоятку буравчика по направлению кругового тока, то направление поступательного движения буравчика покажет направление вектора индукции магнитного поля, созданного током (2).

• При помещении проводника с током в однородное магнитное поле модуль действующей на него силы Ампера равен произведению модуля индукции магнитного поля, длины этого проводника, силы тока в нем и синуса угла между направлением тока и вектором магнитной индукции:

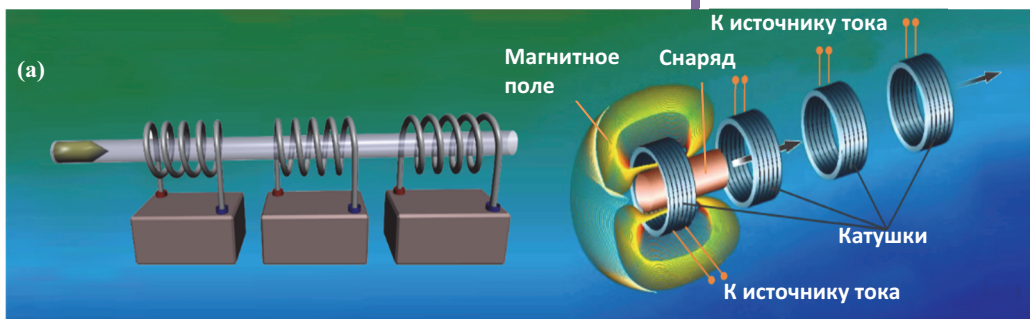
$$F = IBlsin\alpha.$$

Направление силы Ампера определяется правилом левой руки: если расположить левую руку в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, а четыре пальца были вытянуты по направлению тока, то отведенный под  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера.



■ В начале XIX века один из основоположников математической теории электромагнетизма, немецкий математик и физик Карл Фридрих Гаусс (1777–1855) разработал теорию электромагнитной пушки, называемой “пушкой Гаусса”. Принцип её работы основан на взаимодействии катушки с током и железного снаряда (постоянный магнит). На рисунке изображены модель пушки Гаусса и схема принципа его работы (а).

• На каком явлении основан принцип работы пушки Гаусса?



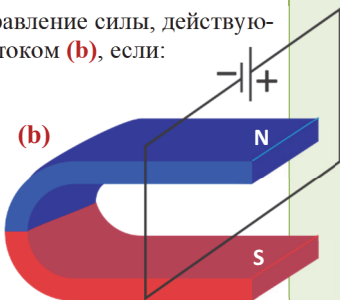
## ИССЛЕДОВАНИЕ

1

### Действие магнитного поля на прямой проводник с током

- **Задача 1.** Как изменится направление силы, действующей на проводник с током (b), если:

- поменять местами полюсы источника тока?
- поменять местами полюсы постоянного магнита?
- одновременно поменять местами и полюсы источника тока, и полюсы постоянного магнита?



### Обсуждение результата:

- От чего зависит модуль силы, с которой магнитное поле действует на прямой проводник с током?
- Как определяется направление действия этой силы?

После того, как датский ученый Х. Эрстед экспериментально установил существование взаимодействия проводника с током и магнитной стрелки, французский физик А. Ампер выяснил, что два параллельных проводника с током взаимодействуют как два постоянных магнита. Стало известно, что между параллельными проводниками с токами одинакового направления взаимодействие носит характер притяжения, а между проводниками с токами противоположного направления – характер отталкивания. Так как электрический ток является упорядоченным движением заряженных частиц, то магнитное взаимодействие является взаимодействием магнитных полей, созданных движущимися заряженными частицами в пространстве.

Магнитное поле действует с определенной силой на любой проводник с током (пробный ток), помещенный в это поле. *Модуль этой силы, называемой силой Ампера, равен произведению силы тока в проводнике, модуля вектора магнитной индукции, длины проводника и синуса угла между направлением тока и вектором индукции магнитного поля:*

$$F_A = IBl \sin \alpha.$$

Известно, что направление силы Ампера определяется правилом левой руки. Если проводник с током перпендикулярен вектору магнитной индукции ( $\sin 90^\circ = 1$ ), то сила Ампера принимает максимальное значение:

$$F_{\max} = IBl.$$

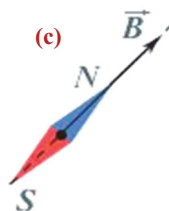
С помощью этой формулы можно выразить физическую суть силовой характеристики магнитного поля – индукции магнитного поля.

- Индукция магнитного поля – векторная величина, численно равная максимальной силе, действующей на элемент тока ( $Il$ ), помещенный в это поле:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}.$$

- За направление вектора магнитной индукции в данной точке поля принимают направление, которое указывает северный полюс свободной магнитной стрелки, помещенной в эту точку поля (c). Единицей измерения магнитной индукции в СИ является тесла (Тл):

$$[B] = \frac{[F_{\max}]}{[I][l]} = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 \text{ Тл}.$$





- 1 тесла – индукция такого магнитного поля, которое на проводник длиной 1 м, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции, и силой тока 1 А, действует с силой 1 Н.

- Магнитное поле, в каждой точке которого числовое значение и направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  одинаковы, называется **однородным магнитным полем**.

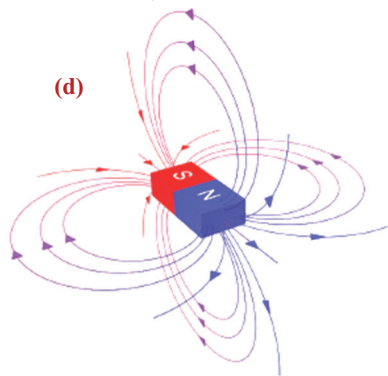
Для магнитного поля выполняется принцип суперпозиции: вектор индукции результирующего магнитного поля, созданного несколькими проводниками с током, равен геометрической сумме векторов индукции отдельных магнитных полей, созданных этими проводниками:  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$ .

С целью визуализации магнитного поля его изображают с помощью линий магнитной индукции (силовые линии поля) **(d)**:

- Линия индукции магнитного поля – линия, касательная к каждой точке которой совпадает с вектором магнитной индукции в этой точке.

Линии индукции магнитного поля замкнутые, они не имеют ни начала, ни конца.

- Поле, силовые линии которого являются замкнутыми, называют **вихревым**.



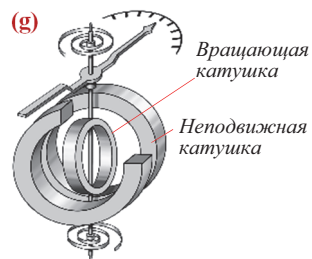
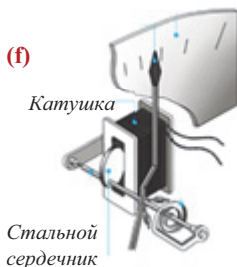
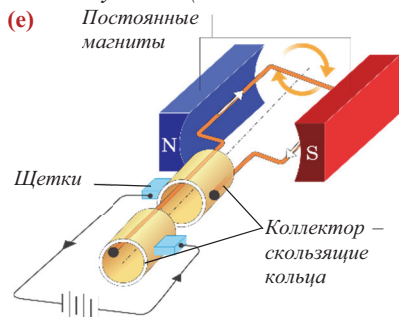
**Применение силы Ампера в электроизмерительных приборах.** Известно, что существуют

различные системы электроизмерительных приборов – амперметра, вольтметра и ваттметра. Это **магнитоэлектрические, электромагнитные и электродинамические системы**. Принцип работы всех этих систем основан на действии магнитного поля на проводник с током.

- Принцип работы приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем, возникающим вследствие прохождения измеряемого тока через проводящую рамку **(e)**.

- Принцип работы прибора электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля, возникающего в результате прохождения измеряемого тока через неподвижную катушку, с подвижным стальным сердечником, помещенным в это поле **(f)**.

- Принцип действия прибора электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по неподвижной и подвижной катушкам (или системам катушек) **(g)**.





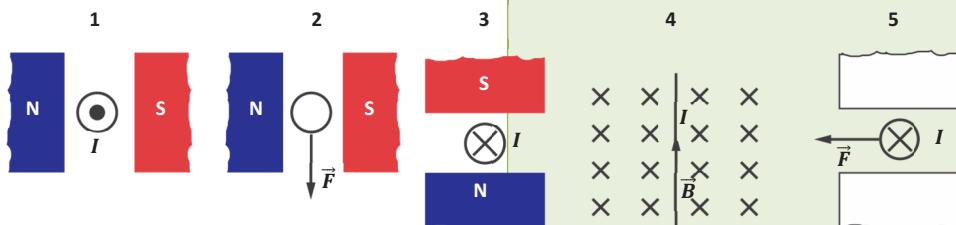
ПРИМЕНЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ

2

Решите задачу

**Задача 2.** Составьте и решите задачи на основе изображенных рисунков.



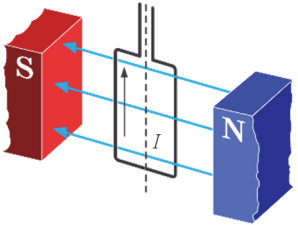
Обсуждение результата:

- Что требуется определить в составленных вами задачах?
- Каким правилом следует пользоваться для решения этих задач?

СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Воспользуйтесь электронными ресурсами и укажите примеры применения силы Ампера в нашей жизни.

ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	В каких случаях магнитное поле не действует на проводник с током? Почему?			
2	От чего зависит характер взаимодействия магнитного поля и проводника с током?			
3	<p>На рисунке изображена рамка с током, помещенная в магнитное поле. Определите направление силы Ампера, действующей на стороны рамки, и направление вращения рамки вокруг оси.</p> 			

- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте карту понятия “сила Ампера”.

## 1.8. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

Физика – 9

После проведения многочисленных опытов М. Фарадей в 1831 году установил, что изменения магнитного поля приводят к возникновению электрического тока в замкнутом проводящем контуре.

• Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре, помещенном в изменяющееся магнитное поле, называют **электромагнитной индукцией**, а возникающий ток – **индукционным током**.

• Возникновение переменного магнитного поля всегда сопровождается созданием в окружающем пространстве вихревого электрического поля.

Вихревое электрическое поле отличается от электростатического:

а) электростатическое поле создается неподвижным электрическим зарядом, а вихревое электрическое поле создается переменным магнитным полем;

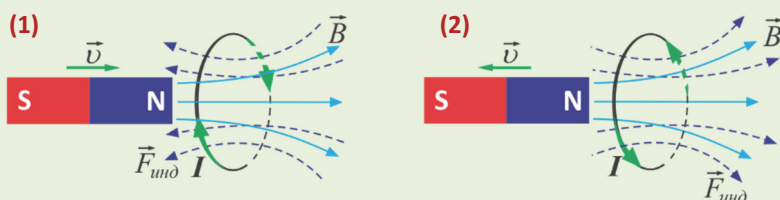
б) линии напряженности электростатического поля не замкнуты: они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. Линии напряженности вихревого электрического поля не имеют ни начала, ни конца – эти линии замкнуты.

В 1833 году русский физик Э. Ленц установил общее правило определения направления индукционного тока, так называемое правило Ленца:

• Индукционный ток принимает такое направление, что созданное им магнитное поле противодействует тому изменению внешнего магнитного поля, которое стало причиной возникновения тока.

При усилении внешнего магнитного поля магнитное поле индукционного тока ослабляет это изменение – вектор индукции магнитного поля индукционного тока направлен против вектора индукции внешнего магнитного поля (1).

При ослаблении внешнего магнитного поля магнитное поле индукционного тока препятствует изменению, то есть стремится к тому, чтобы это поле не ослабло. Вектор индукции магнитного поля индукционного тока направлен так же, как и вектор индукции внешнего магнитного поля (2).



■ Представьте себя в следующей ситуации: совершая туристическую прогулку на природе, вы хотите позвонить другу, однако телефон разряжен. Поблизости нет источника тока, поэтому адаптер превратился в ненужный предмет. Но у вас есть необходимый любому туристу предмет – динамо-машина. Достаточно подсоединить аккумулятор телефона к динамо-машине и несколько минут вращать ее ручку, чтобы аккумулятор снова зарядился.

- На каком явлении основан принцип работы динамо-машины?
- Где ещё вы встречали применение такого простого устройства?



**Изучение явления электромагнитной индукции**

**Оборудование:** гальванометр, катушка с большим числом витков, малая катушка с небольшим числом витков, железный сердечник, постоянный полосовой магнит, источник постоянного тока (выпрямитель), соединительные провода.

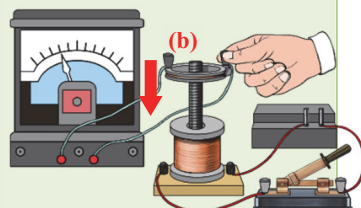
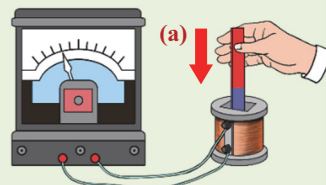
**Ход работы.**

**Опыт 1.** Подсоединив катушку к гальванометру, исследуйте три случая: **а)** постоянный магнит вводится в катушку; **б)** магнит вращается внутри катушки; **с)** магнит выводится из катушки (**а**).

**Опыт 2.** Соберите изображенную на рисунке установку: малую катушку подсоедините к гальванометру, а катушку с сердечником и большим числом витков к выпрямителю и замкните цепь (**б**). Пронаблюдайте явления, происходящие при движении малой катушки вертикально вверх и вниз вдоль железного сердечника и при его неподвижном состоянии.

**Обсуждение результата:**

- Какие общие особенности явлений вы обнаружили в обоих опытах?
- К какому выводу о взаимодействиях магнитного и электрического полей вы пришли?



**Магнитный поток.** Если поместить замкнутый контур (рамку) в однородное магнитное поле, то через площадь  $S$ , ограниченную этим контуром, проходит определенное количество линий магнитной индукции (**с**). Величину, прямо пропорциональную числу этих линий индукции, называют *поток магнитной индукции*, или просто *магнитным потоком*.

• Поток магнитной индукции ( $\Phi$ ) – скалярная физическая величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции, площади контура и косинуса угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади контура:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

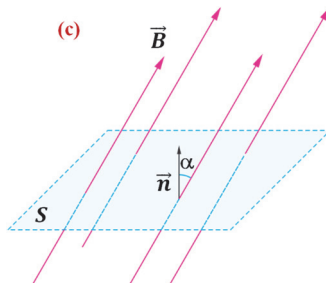
Магнитный поток относится к скалярным величинам, которые могут принимать положительные, отрицательные значения, а также равняться нулю:

– если угол между вектором индукции и нормалью к плоскости контура острый, то магнитный поток принимает положительные значения, а если этот угол тупой – отрицательные;

– если вектор индукции перпендикулярен плоскости контура, то есть параллелен нормали к плоскости, то  $\alpha = 0^\circ \rightarrow \cos 0^\circ = 1$ , тогда магнитный поток, пронизывающий плоскость контура, принимает максимальное значение:

$$\Phi = BS;$$

– если вектор индукции параллелен поверхности, то есть перпендикулярен нормали, то  $\alpha = 90^\circ \rightarrow \cos 90^\circ = 0$ , тогда магнитный поток не проходит через плоскость контура, то есть он равен нулю:  $\Phi = 0$ . Значит, линии магнитной индукции не пронизывают поверхность контура.



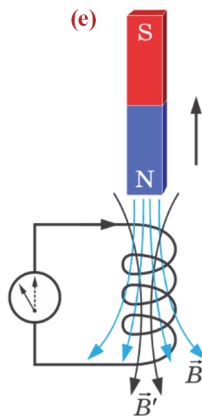
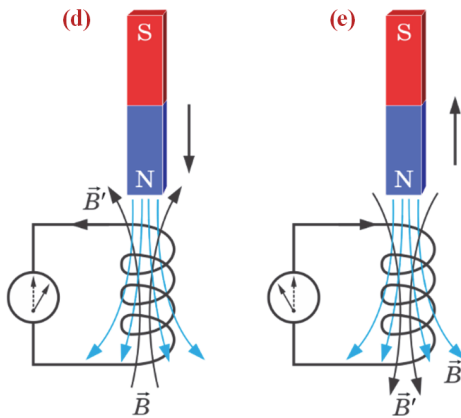
Единицей измерения магнитного потока в СИ является вебер (1Вб):

$$[\Phi] = [B][S] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{А}} = 1 \text{ Вб}.$$

• 1 Вебер – магнитный поток, пронизывающий поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, ограниченную проводящим контуром, расположенным в магнитном поле с индукцией 1 Тл перпендикулярно линиям индукции поля.

**Явление электромагнитной индукции.** В 1831 году английский ученый Майкл Фарадей (1791–1867) открыл явление электромагнитной индукции и показал существование взаимосвязи между электрическим и магнитным полем.

Вы знаете, что при введении в катушку, соединенную с гальванометром, постоянного магнита, и выведении его из катушки в витках катушки возникает индукционный ток. А если магнит неподвижен внутри катушки или совершает вращательное движение внутри катушки, то ток не возникает. Значит, причиной возникновения индукционного тока является изменение магнитного потока, пронизывающего контур (d и e).



• Возникновение электрического тока в проводящем контуре в результате изменений магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную этим контуром, называют явлением электромагнитной индукции.

Направление индукционного тока зависит от того, увеличивается или уменьшается пронизывающий контур магнитный поток.

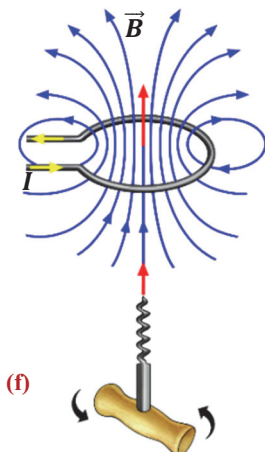
1. Магнитный поток увеличивается ( $\Delta\Phi > 0$ ). Это случай, когда магнит приближается к контуру. В результате магнитный поток

растет, индукционный ток, возникающий в контуре при изменении внешнего поля, создает свое собственное магнитное поле. Это вновь созданное поле отталкивает приближающийся к катушке магнит. Значит, вектор индукции  $\vec{B}$  внешнего поля, создавшего ток в контуре, направлен против вектора  $\vec{B}'$  собственного магнитного

поля контура с током (см. d). В этом случае магнит и контур отталкиваются одноименными магнитными полюсами. Для круговых токов можно применять правило правого буравчика и легко определить, как направлен индукционный ток – его направление совпадает с направлением вращения стрелки часов.

• Правило правого буравчика для кругового тока: при вращении рукоятки буравчика по направлению кругового тока направление его поступательного движения совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля внутри кругового тока (f).

2. Магнитный поток уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ). Это случай, когда магнит выводится из катушки. В результате магнитный поток уменьшается. Возникающий в контуре индукционный ток принимает такое направление,



при котором вектор индукции  $\vec{B}'$  его собственного магнитного поля направлен так же, как и вектор индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ . В этом случае магнит и контур притягиваются, как магниты, противоположными полюсами (см. **е**). На основе правила правого буравчика устанавливается, что индукционный ток направлен против направления вращения стрелки часов.

*Итак, возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток всегда направлен так, что его собственное магнитное поле препятствует тем изменениям внешнего магнитного поля, которые стали причиной возникновения этого тока.*

*Это правило Ленца, позволяющее определить направление индукционного тока.*

ПРИМЕНЕНИЕ		ИССЛЕДОВАНИЕ		2	
<b>Вычислите индукцию магнитного поля.</b> <b>Задача.</b> Магнитный поток, пронизывающий поверхность площадью $60\text{ см}^2$ под углом $60^\circ$ к нормали, равен $1,2\text{ Вб}$ . Вычислите индукцию магнитного поля.					<b>Обсуждение результата:</b> • Какую формулу вы использовали для определения индукции магнитного поля?
■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ					
Воспользовавшись электронными ресурсами, укажите примеры применения явления электромагнитной индукции в быту и технике.					
■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ					
№	Вопросы	Знаю			
		слабо	средне	хорошо	
1	Почему электрический ток, возникающий в проводящем контуре при изменениях внешнего магнитного поля, называют индукционным?				
2	Верно ли с позиций закона сохранения энергии отталкивание (либо притяжение) контура с возникшим при увеличении (или уменьшении) магнитного потока током, от внешнего магнитного поля (к внешнему магнитному полю)? Ответ обоснуйте.				
3	Пользуясь правилом Ленца, определите характер взаимодействия магнита и контура с током, если: а) южный полюс магнита приближается к контуру; б) южный полюс магнита удаляется от контура.				

• **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите эссе на тему “Явление электромагнитной индукции”.

## 1.9. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЭДС ИНДУКЦИИ В ПРОВОДНИКАХ, ДВИЖУЩИХСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 9

- Упорядоченное движение заряженных частиц называется **электрическим током**.

Для существования непрерывного электрического тока в проводнике необходимо выполнение следующих условий:

наличие в проводнике заряженных частиц (носителей заряда), способных свободно перемещаться по проводнику; действие электрической силы, способной перемещать эти частицы в определенном направлении; проводник (цепь, состоящая из проводников), по которому проходит электрический ток, должен быть замкнутым.

За направление электрического тока условно принято направление вектора напряженности электрического поля внутри проводника.

- За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов (против направления движения свободных электронов).

Зависимость силы тока в данном проводнике от напряжения на его концах проводника и от его сопротивления выражается законом Ома для участка цепи постоянного тока.

- Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

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

Индукционный ток, как и любой другой, создается электрическим полем.

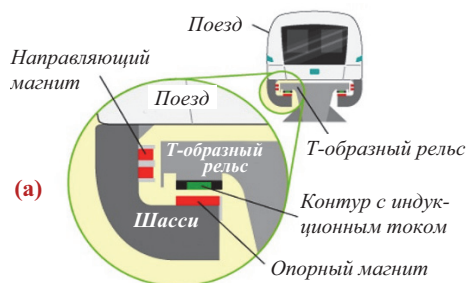
- Существование переменного магнитного поля всегда сопровождается появлением в окружающем пространстве вихревого электрического поля. Именно вихревое электрическое поле (а не переменное магнитное) действует на свободные электроны в замкнутом контуре и способствует возникновению индукционного тока в нем.

Вихревое электрическое поле существенно отличается от электростатического:

- Электростатическое поле создается покоящимися зарядами, а вихревое электрическое – переменным магнитным полем;
- Линии напряженности электростатического поля не замкнуты: они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. Линии напряженности вихревого электрического поля не имеют ни начала, ни конца, они замкнуты как линии индукции магнитного поля.

- Одним из современных видов общественного транспорта является поезд на воздушной подушке, движущийся в подвешенном состоянии левитации – без непосредственного контакта с дорогой. Вместо колес шасси этого поезда, называемого МагЛев, оснащено электромагнитной опорой и направляющими магнитами. Железная дорога состоит из проводящего рельса Т-образной формы, оснащенного электромагнитом, создающим мощный индукционный ток. Такой поезд, испытания которого проводились в Японии вблизи города Фудзюма, показал рекордную скорость  $603 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . На рисунке показана упрощенная схема МагЛева (а).

- На каком явлении основана эта технология?





**С какой скоростью менялся магнитный поток?**

- **Задача 1.** Значение магнитного потока, проходящего через контур, за 0,02 с равномерно уменьшилось от 54 МВб до 12 МВб. Вычислите скорость изменения магнитного потока.

### Обсуждение результата:

- Что означает скорость изменения физической величины?
- Какая физическая величина определяется скоростью изменения магнитного потока? Выскажите свои предположения.

**Вихревое электрическое поле. ЭДС индукции.** Причиной возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре является возникновение вихревого электрического поля вокруг переменного магнитного поля, которое, действуя на свободные электроны в контуре, приводит их в упорядоченное движение – создает индукционный электрический ток. Работа вихревого электрического поля по перемещению положительного единичного заряда по замкнутому проводнику характеризуется физической величиной, называемой электродвижущей силой индукции (ЭДС индукции).

• *Электродвижущая сила индукции – скалярная физическая величина, равная отношению работы, совершенной вихревым электрическим полем при перемещении положительного единичного заряда вдоль замкнутого контура, к величине этого заряда:*

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}. \quad (1)$$

В проведенном исследовании явления электромагнитной индукции вы определили, что значение возникшего в замкнутом контуре индукционного тока пропорционально скорости изменения магнитного потока, проходящего через поверхность, ограниченную этим контуром. Значит, и электродвижущая сила индукции, создающая индукционный ток в проводящем контуре, зависит от скорости изменения внешнего магнитного потока.

• *Если за очень малый промежуток времени  $\Delta t$  магнитный поток изменяется на  $\Delta\Phi$ , то отношение  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  является скоростью изменения магнитного потока.*

**Закон электромагнитной индукции.** На основе вышесказанного можно выразить закон электромагнитной индукции:

• *ЭДС индукции, возникающая в замкнутом проводящем контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, проходящего через ограниченную этим контуром поверхность:*

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2)$$

Знак минус в выражении (2) указывает на то, что магнитный поток индукционного тока препятствует изменению внешнего магнитного потока, породившего индукционный ток.

Если контур состоит из  $N$  числа витков, то выражение (2) принимает вид:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3)$$

Здесь  $\mathcal{E}_i$  – ЭДС индукции, единицей ее измерения является вольт (1В):

$$[E_i] = \frac{[\Delta\Phi]}{[\Delta t]} = 1 \frac{Вб}{с} = 1 В.$$



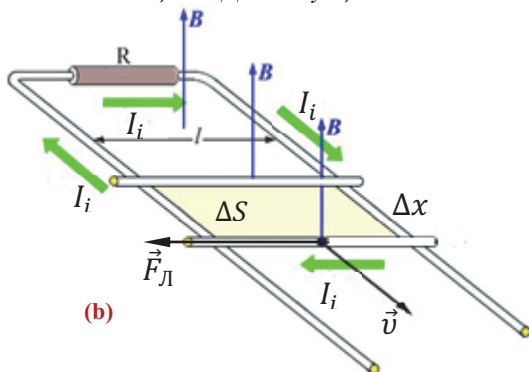
Сила индукционного тока, возникающего в замкнутом проводящем контуре, определяется согласно закону Ома для участка цепи:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{1}{R} \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \quad \text{или} \quad \frac{\mathcal{E}_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4)$$

Здесь  $R$  – сопротивление контура.

**ЭДС индукции в движущихся в магнитном поле проводниках.** При движении проводника в магнитном поле находящиеся внутри него свободные заряженные частицы движутся вместе с ним. По этой причине на каждую частицу действует сила Лоренца. В результате свободные заряды, перемещаясь внутри проводника, совершают упорядоченное движение – в проводнике возникает ЭДС индукции.

Возникающая ЭДС индукции зависит от скорости проводника, длины части



проводника, находящейся в поле, и модуля вектора магнитной индукции. Это легко доказывается на основе закона электромагнитной индукции.

Представим, что проводник длиной  $l$  переместился в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$  на  $\Delta x = v\Delta t$  в направлении, перпендикулярном вектору индукции **(b)**. ЭДС индукции, возникающая при этом в проводнике:

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = \frac{Blv\Delta t}{\Delta t} = Blv.$$

Здесь принято во внимание, что  $\Delta\Phi = B\Delta S$  и  $\Delta S = l\Delta x$  **(см. b)**. Если вектор скорости составляет угол  $\alpha$  с вектором магнитной индукции, то ЭДС индукции определяется так:

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha. \quad (5)$$

Направление индукционного тока в проводнике, движущегося в магнитном поле, удобно определять правилом правой руки:

• Правую руку следует держать в магнитном поле так, чтобы вектор  $\vec{B}$  входил в ладонь, а отогнутый на  $90^\circ$  большой палец показывал направление движения проводника, тогда четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Вычислите ЭДС индукции и силу индукционного тока.**

- **Задача 2.** Магнитный поток, проходящий через контур, за 0,03 с равномерно уменьшился от 48 МВб до нуля. Определите ЭДС индукции и силу индукционного тока, зная, что сопротивление контура равно 6 Ом.

#### Обсуждение результата:

- Чему равно изменение магнитного потока?
- Как вы определили ЭДС индукции и силу индукционного тока?

### СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Принцип работы электронных счетчиков потребления, используемых в быту, основан на применении закона электромагнитной индукции. Например, в электронных счетчиках потребления воды в проводящем электрический ток потоке жидкости возникает ЭДС индукции, пропорциональная скорости жидкости. Индукционный ток в электронной части прибора преобразуется в цифровой сигнал.

- Какие ещё примеры применения закона электромагнитной индукции можно указать (можете воспользоваться электронными ресурсами)?



### ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Проводник длиной 1,8 м перемещается в однородном магнитном поле со скоростью 6 м/с в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции. ЭДС индукции равна 5,4 В. Вычислите индукцию магнитного поля.			
2	Магнитный поток через катушку из 400 витков за 5 секунд равномерно уменьшился от 8 МВб до 3 МВб. Определите ЭДС индукции в катушке.			
3	Чему равна скорость изменения магнитного потока в катушке из 3000 витков, ЭДС индукции в которой равна 120 В?			

- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте карту понятия “Закон электромагнитной индукции”.

## 1.10. ЭДС САМОИНДУКЦИИ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 7, 9 и 10

Инертность – одно из важнейших свойств тела (происходит от латинского слова “inertia” – бездеятельность, ленивость).

• **Инертность** – это свойство тел, выражающееся в том, что на изменение скорости тела всегда требуется определенное время. Явление сохранения телом состояния покоя или прямолинейного равномерного движения при отсутствии действия на тело других тел (когда действующие на тело силы уравновешивают друг друга) называется **инерцией**.

• Мера инертности тела – его масса.

• Энергия, которой обладает тело вследствие своего движения, называется **кинетической энергией**. Кинетическая энергия тела зависит от массы тела и модуля его скорости (не от направления):

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как магнитные свойства разных веществ различны, то индукция магнитного поля, созданного в них одним и тем же источником поля, будет различна. Магнитные свойства веществ характеризуются величиной, называемой **магнитной проницаемостью** вещества.

Магнитная проницаемость вещества показывает, во сколько раз модуль индукции однородного магнитного поля **B** в веществе отличается от индукции этого магнитного поля в вакууме **B<sub>0</sub>**:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \Rightarrow B = \mu B_0.$$

Здесь  $\mu$  (мю) – магнитная проницаемость вещества. Это безразмерная величина.

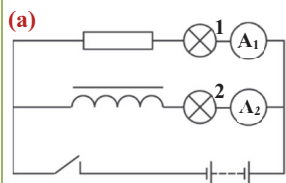
• Прохождение электрического тока через газ при отсутствии внешнего воздействия называется **самостоятельным разрядом**. Одним из видов самостоятельного газового разряда является **искровой разряд**.

• **Искровой разряд** возникает в воздухе при высоком напряжении между электродами и наблюдается в виде светящихся узких каналов зигзагообразной формы. Температура в канале разряда может достигать 10 000 °C, сила тока до 5000 А, напряжение до 10<sup>4</sup> В.

■ Наверно, каждый из вас наблюдал появление кратковременной искры при вынимании вилки прибора в рабочем режиме из электрической розетки. Это значит, что в воздухе между вилкой прибора и электрической розеткой возник самостоятельный разряд с напряжением несколько тысяч вольт. Такая искра иногда приводит к выводу из строя вилки или розетки.

- Почему при отключении электрических приборов от сети в воздухе между контактами возникает искровой разряд?
- По какой причине между контактами может создаваться высокое напряжение?



**Почему лампы начали светить не одновременно?**

**Оборудование:** лампа (2 шт. по 4 В каждая); амперметр (2 шт.); катушка со стальным сердечником; резистор (эталон сопротивления); источник постоянного тока (выпрямитель); ключ; соединительные провода.

**Ход работы:**

1. Соберите цепь по схеме, изображенной на рисунке (a).
2. Замкните ключом цепь, проследите за последовательностью свечения ламп и за изменениями показаний амперметров.
3. Разомкните ключ и проследите за последовательностью погашения ламп.

**Обсуждение результата:**

- Загорание какой из ламп при замыкании ключа запоздало? Как при этом изменились показания амперметров?
- Что вы наблюдали при размыкании цепи? Выскажите свое предположение о причине увиденного явления.

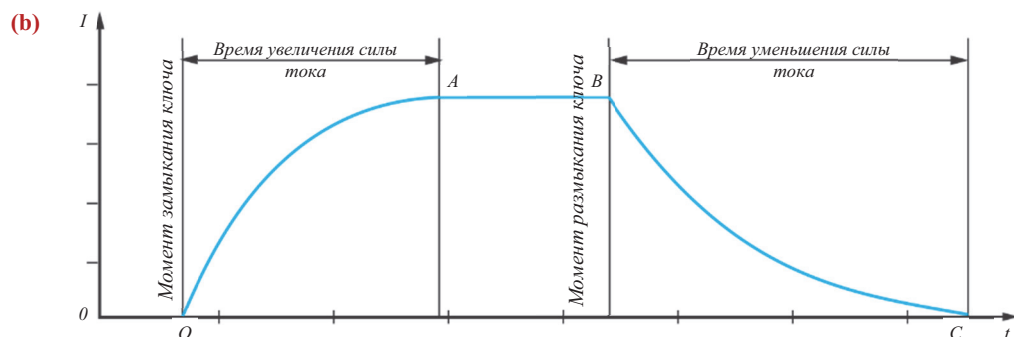
**ПОДСКАЗКА**

Выполните работу, учитывая закон электромагнитной индукции и правило Ленца.

**ЭДС самоиндукции.** Электрический ток, существующий в любом замкнутом контуре, создает собственное магнитное поле (находится в собственном магнитном поле). При изменении силы тока в контуре одновременно происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока приводит к возникновению вихревого электрического поля, и в результате в этом контуре возникает ЭДС индукции.

• *Явление возникновения ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре в результате изменения силы тока в нем называют **самоиндукцией**.*

При увеличении силы тока в замкнутом контуре от нуля до определенного значения увеличивается и проходящий через этот контур магнитный поток. Возникающая в контуре в результате увеличения магнитного потока ЭДС самоиндукции создает индукционный ток, направленный против проходящего по контуру основного тока - индукционный ток замедляет рост основного тока и достижение им максимального значения - на увеличение силы тока до максимального значения уходит определенное время (кривая **ОА, b**).



При размыкании цепи сила тока уменьшается от максимального значения до нуля, вместе с этим уменьшается магнитный поток. Уменьшение магнитного потока

приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции, которая в свою очередь создает в этом контуре индукционный ток, направленный, согласно правилу Ленца, так же, как и основной ток, и замедляющий его уменьшение (кривая **BC**, **b**).

Из вышесказанного становится ясно, что возникающий в контуре собственный магнитный поток прямо пропорционален силе проходящего через контур тока –  $\Phi \sim I$  или:

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

Здесь  $L$  является коэффициентом пропорциональности (между  $\Phi$  и  $I$ ) и называется *индуктивностью контура* (катушки).

*Индуктивность зависит от геометрических размеров контура (катушки), от магнитной проницаемости среды внутри него, от числа витков. Она не зависит от силы тока в контуре и магнитного потока.*

Индуктивность – скалярная величина, единица ее измерения в СИ названа генри (1 Гн), в честь американского ученого Джозефа Генри:

$$[L] = \frac{[\Phi]}{[I]} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \text{ Гн}.$$

• 1 Гн – индуктивность такого контура (катушки), в которой при силе тока 1 А через контур проходит собственный магнитный поток 1 Вб.

Если учесть выражение (1) в законе электромагнитной индукции, то получим, что ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока, проходящего через контур:

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2)$$

Здесь  $\mathcal{E}_{is}$  – ЭДС самоиндукции,  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  – скорость изменения силы тока в контуре.

**Энергия магнитного поля.** Согласно закону сохранения энергии, работа, совершенная при создании ЭДС индукции, будет равна энергии магнитного поля, создавшего его. Для определения этой энергии удобно воспользоваться схожестью явления самоиндукции с явлением инерции. Так, индуктивность  $L$  играет такую же роль при изменениях силы тока  $I$  в электромагнитных процессах, какую играет масса  $m$  – при изменениях скорости  $v$  в механических процессах. Тогда для энергии магнитного поля, создаваемого контуром в электромагнитных явлениях, можно принять выражение, аналогичное выражению кинетической энергии тела в механических явлениях:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (3)$$

Если в этом выражении учесть формулу (1), получим ещё две формулы для энергии магнитного поля:

$$W_m = \frac{\Phi^2}{2L} = \frac{\Phi I}{2}. \quad (4)$$

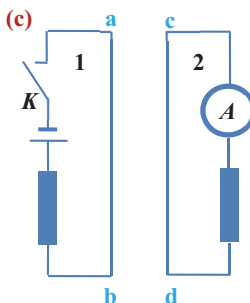
Из теоретических вычислений получено, что *плотность энергии магнитного поля прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции и обратно пропорциональна магнитным свойствам среды:*

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}. \quad (5)$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ .

Вычислите ЭДС индукции и силу индукционного тока.

- **Задача.** Цепи 1 и 2 расположены так, как изображено на рисунке (с). Определите направление индукционного тока на участке  $cd$  цепи 2:
  - а) при замыкании ключа  $K$ ;
  - б) при размыкании ключа  $K$ .



**Обсуждение результата:**

- Какое явление вы использовали при решении задачи?
- К какому выводу вы пришли? Почему?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Чтобы завести двигатель автомобиля, на контакты свечи зажигания следует подать напряжение 10 кВ, чтобы создать между ними мощную искру и воспламенить горючую смесь в цилиндре. При этом следует учесть, что аккумулятор автомобиля может создать только напряжение 12 В.

- За счет чего создается такое высокое напряжение в цепи свечи зажигания автомобиля?



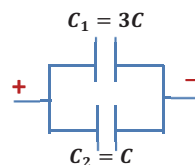
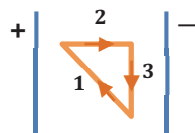
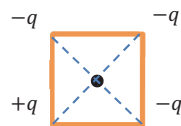
#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	За 0,4 с сила тока в катушке увеличилась от 3 А до 9 А. Возникшая при этом ЭДС самоиндукции равна 12 В. Вычислите индуктивность катушки.			
2	Иногда в вычислениях за единицу индуктивности принимают $1 Гн = 1 \frac{В \cdot с}{А}$ . Докажите верность этого равенства.			
3	На рисунке изображены графики зависимости силы тока от времени для двух одинаковых катушек. В какой из катушек возникает большая ЭДС самоиндукции и во сколько раз?			



- **ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листках физическую суть следующих выражений: “самоиндукция”, “ЭДС самоиндукции”, “индуктивность”, “энергия магнитного поля”, “плотность энергии магнитного поля”.

- 1.1. Чему станет равным заряд каждого из двух одинаковых проводящих шариков с зарядами  $7q$  и  $-13q$  после того, как их привели в соприкосновение и снова развели?
- 1.2. Столовая ложка вмещает 18 г воды. Определите:
  - а) количество молекул воды в ложке;
  - б) количество электронов в одной молекуле воды;
  - с) число всех электронов в воде;
  - д) общий заряд всех электронов в воде.
- 1.3. Во сколько раз сила электромагнитного отталкивания между двумя электронами больше гравитационного притяжения между ними? Масса электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.
- 1.4. Пылинка массой  $m = 2,5 \cdot 10^{-11}$  кг и зарядом  $q = 5 \cdot 10^{-12}$  Кл покоится в однородном вертикальном электрическом поле во взвешенном состоянии. Определите напряженность электрического поля ( $g = 9,8$  Н/кг).
- 1.5. Расстояние между двумя зарядами  $q_1 = 3 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $q_2 = 2 \cdot 10^{-7}$  Кл равно 20 см. Чему равна напряженность результирующего электрического поля этих зарядов в середине прямой, соединяющей заряды.
- 1.6. Каждый из зарядов создает электрическое поле, модуль напряженности которого в центре квадрата равен  $E$ . Найдите напряженность результирующего поля в этой точке.
- 1.7. Вычислите напряженность электрического поля, созданного точечным зарядом  $10^{-8}$  Кл на расстоянии 30 см от него.
- 1.8. Напряженность однородного электрического поля между двумя параллельными плоскими заряженными пластинами, расположенными в вакууме на расстоянии 5 см друг от друга, равна  $10^3$  В/м. Определите:
  - а) разность потенциалов между этими пластинами;
  - б) работу электрического поля при перемещении заряда  $q = 8 \cdot 10^{-6}$  Кл с одной пластины на другую.
- 1.9. Разность потенциалов между двумя плоскими заряженными пластинами, расположенными в вакууме на расстоянии 0,1 м друг от друга, равна 220 В. Чему равна напряженность однородного электрического поля между этими пластинами?
- 1.10. Точечный заряд  $+q$  перемещают в однородном электрическом поле, созданном двумя параллельными плоскими пластинами. Определите:
  - а) работу электрического поля и изменение потенциальной энергии заряда на участке 1 траектории;
  - б) работу электрического поля и изменение потенциальной энергии заряда на участке 2 траектории;
  - с) работу электрического поля и изменение потенциальной энергии заряда на участке 3 траектории.
- 1.11. Как изменится электрическая ёмкость плоского конденсатора, если его заряд увеличить в 6 раз, уменьшив напряжение между его пластинами в 4 раза?
- 1.12. Электрическую ёмкость плоского конденсатора увеличили в 3 раза при постоянном значении напряжения между его пластинами. Определите:
  - а) как изменилась энергия конденсатора?
  - б) как изменился заряд конденсатора?
- 1.13. На рисунке изображена схема соединения двух конденсаторов. Определите:
  - а) соотношение между энергиями конденсаторов;
  - б) соотношение между зарядами конденсаторов;
  - с) соотношение между напряжениями конденсаторов.





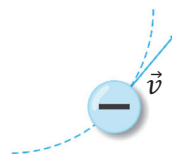
1.14. На рисунке изображена схема соединения двух конденсаторов. Определите:

- соотношение между энергиями конденсаторов;
- соотношение между зарядами конденсаторов;
- соотношение между напряжениями конденсаторов.



1.15. Может ли заряженная частица двигаться прямолинейно и равномерно в однородном магнитном поле? Ответ обоснуйте.

1.16. На рисунке изображена траектория движения электрона в однородном магнитном поле. Определите направление вектора индукции магнитного поля.

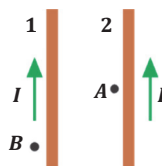


1.17. Электрон движется в однородном магнитном поле со скоростью  $v = 5 \cdot 10^6$  м/с в направлении, перпендикулярном линиям индукции поля. Модуль вектора индукции магнитного поля равен 0,02 Тл. Определите:

- силу Лоренца, действующую на электрон;
- радиус окружности, описываемой электроном.

1.18. Сила тока в параллельных проводниках 1 и 2 одинакова. Определите:

- направление вектора индукции магнитного поля проводника 1 в точке А вблизи проводника 2;
- направление вектора индукции магнитного поля проводника 2 в точке В вблизи проводника 1.

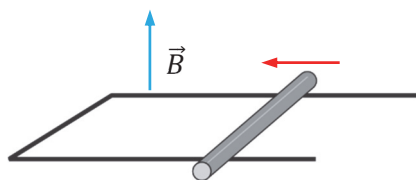


1.19. Определите модуль силы Ампера, действующей на проводник с током, на основе приведенных данных:

- $B = 2$  Тл,  $I = 6$  А,  $l = 75$  см,  $\alpha = 0^\circ$ ;
- $B = 2$  Тл,  $I = 6$  А,  $l = 75$  см,  $\alpha = 30^\circ$ .

1.20. Проводящий стержень движется по горизонтальному металлическому рельсу в магнитном поле, линии индукции которого направлены вертикально вверх. Определите:

- направление индукционного тока, возникающего в стержне;
- направление вектора индукции магнитного поля, созданного замкнутым контуром, состоящим из рельса и стержня, в центре контура;
- направление силы Ампера, действующей на стержень.



## • ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ



- Исследования определили 4 металла, обладающие наибольшим значением удельной электропроводности (при 20°C):

1) Серебро –  $6,8 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$

2) Медь –  $5,9 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$

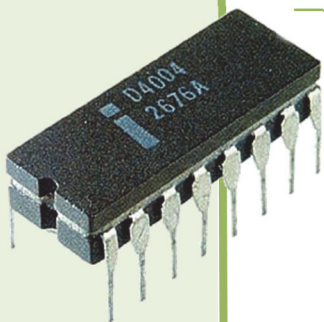
3) Золото –  $4,5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$

4) Алюминий –  $3,8 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$

- **Что такое удельная электропроводность? Как она определяется?**

- Эта украшенная барельефом чаша была приобретена музеем “Метрополитен” (Нью-Йорк, США) в 1870 году за очень большую цену. Уже полтора столетия это произведение удивляет людей сложностью и тонкостью работы мастеров. Но самым удивительным оказалось то, что ни один зритель не почувствовал, что это всего лишь копия ручной работы ювелиров эпохи барокко и маньеризма (XVII век). Только эксперты в лаборатории смогли определить, что эта копия была скопирована с оригинала методом электролиза в 1840 году.

- **Как с помощью метода электролиза можно изготовить предмет такой тонкой работы?**
- **Какие ещё необычные применения электролиза существуют?**

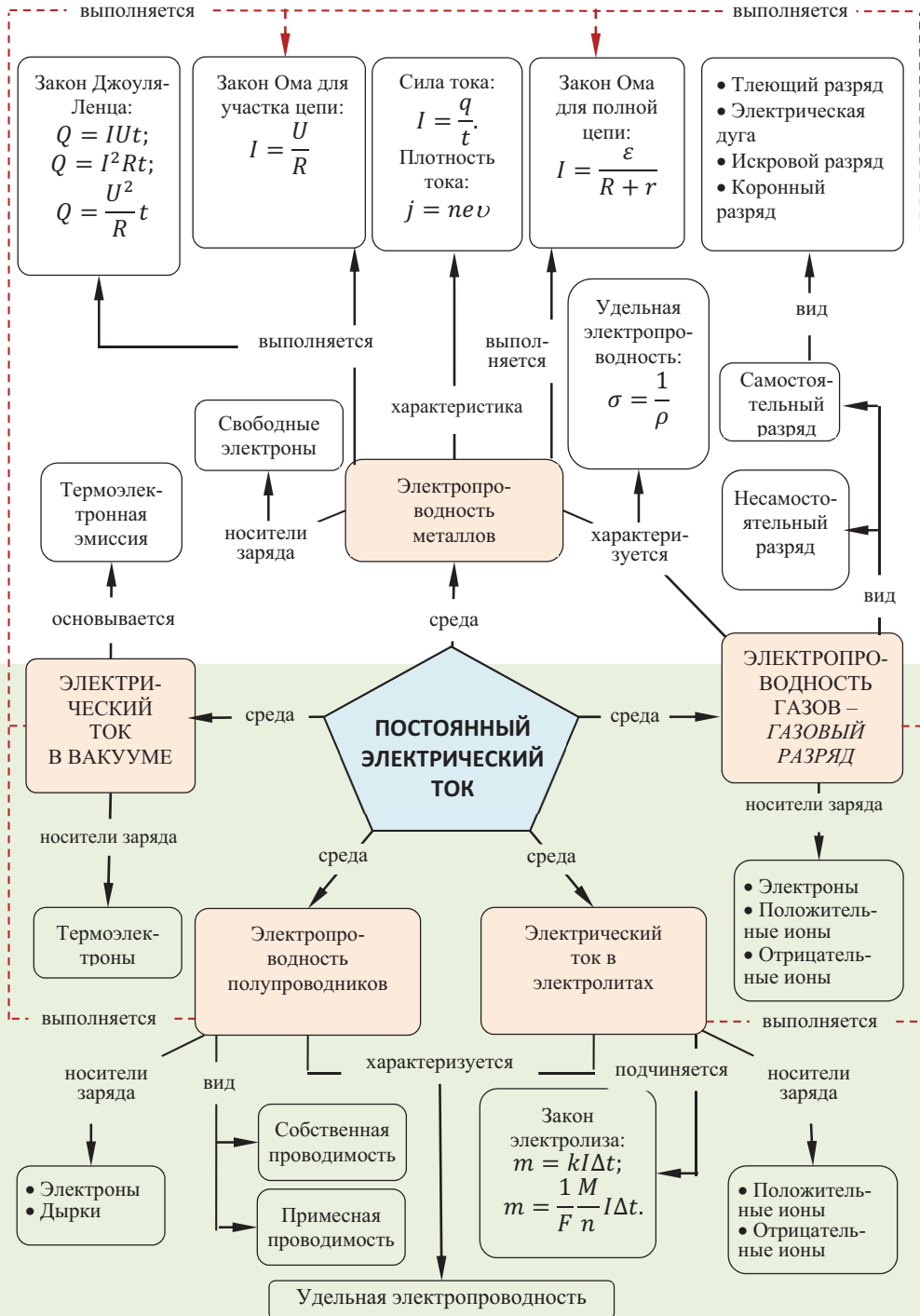


- Корпорация “Intel” (США) изготовила первый микропроцессор “Intel 4004” 15 ноября 1971 года. Этот прибор состоял всего лишь из 2300 транзисторов. Процессор второго поколения “Intel Core”, изготовленный корпорацией в 2011 году, состоял из  $\approx 10^9$  транзисторов. Специалисты утверждают, что в настоящее время на каждого жителя Земли приходится  $\approx 10^6$  транзисторов.

- **Что такое транзистор?**
- **Почему основную часть микросхем (чипов) составляют транзисторы?**



## “Карта понятий” главы



## 2.1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 9

- Проводник – вещество, хорошо проводящее электрический ток. К проводникам относятся: металлы, электролитические растворы и расплавы, плазма. Влажный воздух, тела людей и животных тоже проводят электрический ток.
- За направление электрического тока условно принято направление вектора напряженности электрического поля внутри проводника.
- Физический механизм электропроводности металлических проводников определяется следующими основными положениями классической электронной теории.
- Металлы – физические системы, обладающие кристаллическим строением. В обычном состоянии атом металла, теряя электрон, превращается в положительный ион. Находясь в узлах кристаллической решетки, эти ионы совершают колебательное движение около положения равновесия. Поэтому ионы не могут участвовать в создании электрического тока в металлах.
- Электроны, оторвавшиеся от атомов, в металлах могут свободно перемещаться в пространстве между ионами. Поэтому такие электроны называются **свободными электронами**. Установлено, что концентрация свободных электронов равна  $10^{26} \div 10^{28} \frac{1}{\text{м}^3}$ .
- При отсутствии электрического поля свободные электроны в результате многочисленных столкновений совершают хаотическое движение. Это движение похоже на беспорядочное тепловое движение молекул в газах, поэтому для описания поведения свободных электронов в металлах используют **модель электронного газа**.
- При соединении металлического проводника к источнику тока созданное в нем электрическое поле придает хаотическому движению свободных электронов упорядоченность в определенном направлении. Скорость упорядоченного движения каждого свободного электрона при этом зависит от двух факторов: а) числа ударов с ионами; б) электрического поля. Скорость упорядоченного движения свободных электронов в металлах очень мала.

- Из истории вам известно, что скифы хоронили своих погибших в боях воинов с большими почестями. Тела их закапывали в курганах вместе с их оружием и большим количеством украшений, изготовленных из драгоценных металлов. По этой причине впоследствии эти курганы превратились в средство наживы для воров. Но как можно было определить курганы-захоронения среди обычных холмов? Предусмотрительные вору во время грозы внимательно следили за тем, в какой холмик ударит молния. Они считали, что молния “чувствует” спрятанные под толщей земли металлы и ударяет по местам их захоронения.

- Имеет ли физическое предположение о том, что молния “ударит” в место захоронения драгоценных металлов? Обоснуйте свои гипотезы.



### Чему равна скорость хаотического движения свободных электронов в металле?

**Задача 1.** Определите скорость хаотического движения электронов в металле при температуре  $T = 300\text{ K}$  (комнатная температура). Используйте информацию, что согласно закону сохранения энергии эту скорость можно определить на основе формулы:

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}).$$

**Обсуждение результата:**

- Чему равна скорость хаотического движения свободных электронов в металле?
- Какая из скоростей свободных электронов внутри металла больше: скорость хаотического движения, или скорость упорядоченного движения? Обоснуйте свое предположение.

### 1. Электрическая проводимость. Удельная электропроводность.

• *Электропроводность (электрическая проводимость, или просто проводимость) – это свойство вещества, выраженное в его способности проводить электрический ток. Это свойство вещества характеризуется физической величиной, называемой удельной электропроводностью (или удельной проводимостью).*

• *Удельная электропроводность – скалярная физическая величина, численно равная обратному значению удельного сопротивления вещества:*

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$  – удельная проводимость вещества, единицей ее измерения в СИ является  $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ .

В зависимости от значений удельной электропроводности вещества делятся на 3 группы: 1. Проводники – вещества, хорошо проводящие электрический ток, – их удельная электропроводность  $\sigma > 10^6 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ . 2. Диэлектрики (изоляторы) – вещества, плохо проводящие электрический ток, – их удельная электропроводность  $\sigma < 10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ . К диэлектрикам относятся: газы, некоторые жидкости (дистиллированная вода, масло и др.), стекло, каучук, керамика, пластмасса и др. 3. Полупроводники – вещества, по своей проводящей способности находящиеся между проводниками и диэлектриками. К полупроводникам относятся: германий, кремний, олово, некоторые оксиды и сульфиды, теллуриды и др.

**II. Электропроводность металлов.** По удельной проводимости металлы делятся на две группы: обладающие высокой или слабой электропроводностью (см. **таблицу 2.1**).

Согласно классической электронной теории электропроводности металлов:

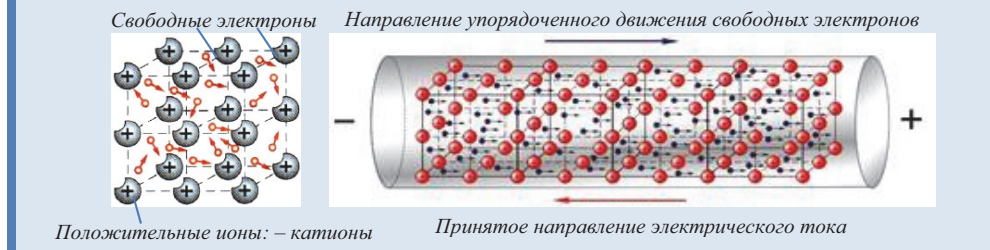
1. Металлы имеют кристаллическое строение: в узлах её кристаллической решетки находятся положительные ионы, потерявшие электроны. Эти ионы совершают только колебательное движение около положения равновесия.
2. Количество свободных электронов в единице объёма металлов (их концентрация) приблизительно равно числу атомов в единице объёма (например, концентрация свободных электронов в меди  $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ).
3. Свободные электроны совершают хаотическое движение по всему объёму кристаллической решетки.
4. Совершая хаотическое движение, электроны сталкиваются только с ионами.
5. Сталкиваясь с ионами, электроны передают им всю свою кинетическую энергию.
6. Движение свободных электронов подчиняется законам Ньютона.
7. При помещении металлического проводника во

**Таблица 2.1.** Удельное сопротивление и удельная проводимость некоторых металлов

Вещество	$\rho$ , $\text{Ом} \cdot \text{м}$	$\sigma$ , $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$
Серебро	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^7$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^7$
Золото	$2,22 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^7$
Алюминий	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^7$
Вольфрам	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^7$
Платина	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^7$
Железо	$12 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^6$
Свинец	$20 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^6$
Никель	$40 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^6$
Нихром	$110 \cdot 10^{-8}$	$9,1 \cdot 10^5$

внешнее электрическое поле (при создании разности потенциалов на его концах) хаотическое движение свободных электронов приобретает упорядоченный характер – в металлическом проводнике возникает электрический ток.

Коллективизированные свободные электроны совершают непрерывное хаотическое движение внутри металла подобно молекулам идеального газа. Этот коллективизированный “электронный газ”, взаимодействуя с положительными ионами кристаллической решетки, создает сильную металлическую связь. При возникновении электрического поля внутри металла на свободные электроны действует электрическая сила  $\vec{F} = e\vec{E}$  против направления вектора напряженности. Эта сила придает хаотическому движению электронов направленный характер. В то же время столкновения с ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки, оказывают тормозящее действие на движение электронов. В результате действия двух этих сил скорость упорядоченного движения свободных электронов остается постоянной – в металле возникает постоянный электрический ток. Однако за направление электрического тока принято, согласно предложению французского учёного Ампера, данному в 1820 году, направление движения положительных зарядов (направление напряженности внешнего электрического поля).



Физическими величинами, характеризующими электрический ток в металлах, являются сила тока и плотность тока.

• Сила тока – скалярная физическая величина, численно равная количеству заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени. Если за малое время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника прошел заряд  $\Delta q$ , то сила тока:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'(t). \quad (2)$$

Значит, сила тока равна первой производной электрического заряда по времени.

• Электрический ток называют постоянным, если сила этого тока не меняет с течением времени своё направление и числовое значение:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3)$$

Единицей измерения силы тока в СИ является ампер:  $[I] = 1 \text{ A}$ .

Единица силы тока ампер определена на основе магнитного действия электрического тока.

• 1А – это сила постоянного электрического тока, который при прохождении по каждому из двух параллельных прямых бесконечно длинных тонких проводников в вакууме, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает на каждом участке проводников длиной 1 м силу взаимодействия  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ .

Сила тока зависит от заряда частиц ( $q_0$ ), их концентрации в проводнике, скорости их движения и площади поперечного сечения проводника:

$$I = q_0 n v S. \quad (4)$$

Так как в металлах носителями заряда являются свободные электроны ( $e$ ), выражение (4) для металлов приобретет вид:

$$I = e n v S. \quad (5)$$



• **Плотность тока** – физическая величина, численно равная отношению силы тока в проводнике к площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S}. \quad (6)$$

Плотность тока является векторной величиной, направление которой совпадает с направлением тока в проводнике. Единицей измерения плотности тока в СИ является ампер на квадратный метр:  $[j] = 1 \frac{A}{m^2}$ .

Если учесть выражение (5) в выражении (6), то для плотности тока в металлическом проводнике получим:

$$j = env. \quad (7)$$

ПРИМЕНЕНИЕ	ИССЛЕДОВАНИЕ	2	Обсуждение результата:	
<p><b>Чему равна скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике?</b></p> <p><b>Задача 2.</b> Сила тока в металлическом проводнике площадью поперечного сечения <math>0,5 \text{ см}^2</math> равна <math>12 \text{ А}</math>. Определите среднюю скорость упорядоченного движения свободных электронов, если их концентрация в проводнике равна <math>5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}</math> (заряд электрона <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}</math>).</p>			<ul style="list-style-type: none"><li>С помощью какой формулы определили скорость упорядоченного движения свободных электронов?</li><li>Что является причиной очень малого значения скорости упорядоченного движения свободных электронов в металлическом проводнике?</li></ul>	
<p>■ <b>СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ</b></p> <p>Вы наверно обращали внимание, что при замыкании любой цепи мгновенно все потребители в ней начинают работать – лампа зажигается, компьютер, нагреватель и др. сразу включаются.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>С какой скоростью электрический ток распространяется в замкнутом проводнике?</li><li>Можно ли утверждать, что скорость распространения тока в проводнике и скорость упорядоченного движения свободных электронов одинаковы?</li><li>Что означает прохождение электрического тока по проводнику?</li></ul>				
<p>■ <b>ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ</b></p>				
№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Сила тока в лампе равна $0,5 \text{ А}$ . Сколько электронов проходит через поперечное сечение нити накала лампы за 1 секунду ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ )?			
2	Сила тока в цепи двигателя стиральной машины $12 \text{ А}$ . Вычислите заряд, прошедший через двигатель за 1 час.			
3	Какие ещё заряженные частицы, кроме свободных электронов, есть в металлах? Где они находятся? А) Атомы; в узлах кристаллической решетки Б) Отрицательные ионы; в узлах кристаллической решетки С) Положительные ионы; в узлах кристаллической решетки Д) Положительные и отрицательные ионы; в узлах кристаллической решетки Е) Отрицательные ионы; в постоянных для каждой из них точках			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Отметьте в рабочих листах “основные выводы, вытекающие из классической электронной теории электропроводности металлов” и определения понятий “электропроводность”, “удельная проводимость”, “сила тока”, “плотность тока”.



## 2.2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 9

Электрическое сопротивление проводника  $R$  является его основной характеристикой. Единицей измерения сопротивления в СИ является Ом:  $[R] = \frac{[U]}{[I]} = 1 \frac{B}{A} = 1 \text{ Ом}$ .

- Сопротивление проводника зависит от его длины, площади его поперечного сечения и материала, из которого он изготовлен:  $R = \frac{1}{S} \rho$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление.

- Удельное сопротивление – физическая величина, численно равная сопротивлению проводника из данного материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ .

Удельное сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен, а единицей его измерения в СИ является ом-метр:  $[\rho] = \frac{[S]}{[I]} \cdot [R] = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{м}} \cdot \text{Ом} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

- Сопротивление металлического проводника зависит от температуры. В небольших интервалах изменения температуры сопротивление проводника линейно зависит от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t) \text{ или } R = R_0(1 + \alpha \Delta T).$$

Здесь  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

- Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению электрического сопротивления проводника, происходящему при изменении его температуры на  $1^\circ\text{C}$  (или  $1 \text{ K}$ ):  $\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \Delta t} = \frac{R - R_0}{R_0 \Delta T}$ .

Для чистых металлов температурный коэффициент сопротивления  $\alpha > 0$  и для разных металлов имеет различные значения.

- Температура, при которой сопротивление проводника уменьшается до нуля, называется критической температурой, проводимость при этой температуре называется сверхпроводимостью.

Одним из современных медицинских диагностических приборов является *сверхпроводящий квантовый интерферометр*. Этот прибор осуществляет магнитоэнцефалографию человеческого мозга. Данная технология позволяет измерять параметры слабых магнитных полей элементарных электрических токов, возникающих в результате взаимодействий нейронов мозга, и визуализировать их. В результате выясняется источник заболевания мозга и стадия развития болезни.

- Чем отличаются сверхпроводники от обычных проводников?

- Почему основные части чувствительных приборов изготавливают из сверхпроводников?



### От чего зависит удельное сопротивление металлического проводника?

**Задача 1.** Основная часть электрического нагревателя состоит из проводника, изготовленного из сплава специально подобранных металлов. Какие проводники выбирают для изготовления нагревателя:

- а) обладающие большим удельным сопротивлением или малым?
- б) большей длины или меньшей?
- с) с большой площадью поперечного сечения или меньшей?

**Обсуждение результата:**

- От чего зависят сопротивление и удельное сопротивление металлического проводника?

**Закон Ома для участка цепи.** Существование разности потенциалов на концах проводника – необходимое условие возникновения электрического тока в нем. Разность потенциалов (электрическое напряжение) на концах произвольного участка цепи численно равна работе по перенесению заряда 1 Кл по этому участку:

$$U = \frac{A}{q}. \quad (1)$$

Сила тока, проходящего через участок цепи, зависит от напряжения на концах участка. Эту зависимость в 1827 году экспериментально установил немецкий ученый Георг Ом (1787–1854), и поэтому её называют **законом Ома**:

- Сила тока на определенном участке цепи прямо пропорциональна напряжению на её концах и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Зависимость силы тока в проводнике от напряжения на его концах называют **вольт-амперной характеристикой (ВАХ)** проводника. Для металлических проводников ВАХ представляет собой прямую, проходящую через начало координат **(а)**.

- Произведение сопротивления участка цепи на силу проходящего по нему тока называют падением напряжения на этом участке (проводнике):

$$U = IR. \quad (3)$$

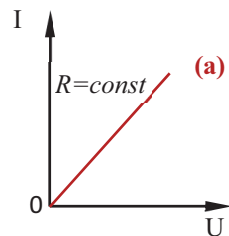
Здесь  $R$  – сопротивление проводника, является одной из его основных характеристик. Сопротивление данного проводника имеет определенное значение, не зависящее от силы тока в нем и напряжения на его концах.

- Сопротивление металлического проводника зависит от материала, из которого он изготовлен, его геометрических параметров и температуры:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Сопротивление проводника измеряют прибором, называемым **омметром (б)**. Сопротивление на устройстве обозначается символом  $\Omega$  (омега). Для этого достаточно прикоснуться соединительными проводами прибора к концам металлического проводника, сопротивление которого измеряется.

**Зависимость сопротивления металлов от температуры.** Электрическое сопротивление – мера противодействия проводника возникновению в нем электрического тока. Согласно классической электронной теории



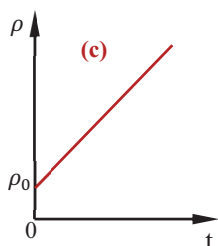
причиной сопротивления металлического проводника являются столкновения свободных электронов в нем с положительными ионами, совершающими колебательное движение в узлах его кристаллической решетки. С ростом температуры проводника время, затраченное каждым свободным электроном на прохождение расстояния свободного пробега (расстояния между двумя последовательными столкновениями с ионами), уменьшается, а амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки увеличивается. В результате растет число столкновений электронов с ионами. При этом скорость электронов, передавшую кинетическую энергию ионам полностью, уменьшается почти до нуля. А это приводит к возрастанию сопротивления проводника.

Опыты показывают, что относительное изменение сопротивления металлического проводника прямо пропорционально изменению его температуры:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha \Delta T, \quad (5)$$

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (6)$$

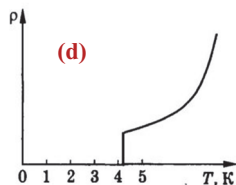
Здесь  $R_0$  – сопротивление проводника при 273 K (0°C),  $R$  – сопротивление проводника при температуре  $T$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.



• Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при изменении его температуры на 1 K (1°C).

При нагревании проводника его геометрические размеры изменяются незначительно, поэтому эти изменения можно не учитывать. В таком случае с учетом формулы (4) получим, что удельное сопротивление металлического проводника линейно зависит от температуры (с):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (7)$$



**Сверхпроводимость.** В 1911 году голландский физик Х. Камерлинг-Оннес (1853 – 1926), охлаждая чистую ртуть (без примеси) в жидком гелии, обнаружил, что удельное сопротивление ртути постепенно уменьшается, однако при достижении температуры 4,2 K оно резко падает до нуля (d). Это явление назвали *сверхпроводимостью*. За проведенные работы Камерлинг-Оннес был удостоен Нобелевской премии по физике в 1913 году.

• **Сверхпроводимость** – свойство вещества, выраженное в обладании бесконечной удельной проводимостью при температурах ниже некоторого значения, называемого критической температурой.

В 1986 году немецкий физик Йоханнес Беднорц (1950 г.) и швейцарский физик Карл Мюллер (1927 г.) обнаружили способность керамики на основе оксидов меди, лантана и бария переходить в сверхпроводящее состояние при 30 K. За работы по *высокотемпературной проводимости* они были удостоены Нобелевской премии по физике в 1987 году. В настоящее время сверхпроводимость керамики с различными примесями стала возможной при более высоких температурах 100 K ÷ 169 K. После проведения многочисленных экспериментов были выявлены необыкновенные свойства сверхпроводников. Например, установлено, что если в электромагните, изготовленном из сверхпроводящей керамики, с помощью источника тока создать электрический ток,

то сила тока в этом электромагните продолжительное время остается неизменной даже после удаления источника тока. При прохождении тока через такие электромагниты в них тепло не выделяется (в сверхпроводниках тепловое действие тока отсутствует), поэтому они могут создавать и поддерживать сильное магнитное поле продолжительное время. Сверхпроводники применяются в ускорителях элементарных заряженных частиц, в управлении высокотемпературной плазмой и др.

## ПРИМЕНЕНИЕ

## ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Сравните удельные проводимости проводников**

**Задача 2.** На рисунке изображены ВАХ двух проводников. По графикам определите:

- у какого проводника сопротивление больше?
- вычислите сопротивление каждого проводника;
- сравните удельные сопротивления проводников.

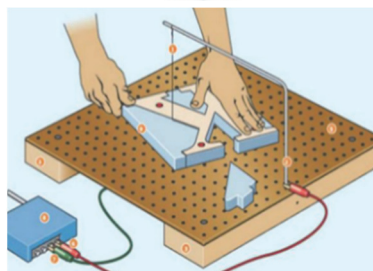
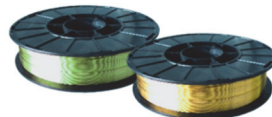
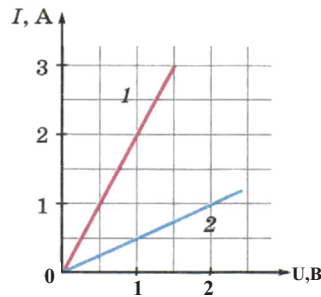
**Обсуждение результата:**

- Как можно объяснить физический механизм существования сопротивления проводника на основе классической электронной теории?
- Какой из проводников обладает большим удельным сопротивлением? Почему?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Устройство для резки пенопласта следует снабдить проволокой из металла с определенными свойствами. Для этого необходимо определить, от какой из двух представленных катушек с разными металлическими проволоками следует отрезать определенный кусок. В нашем распоряжении инструменты: линейка, микрометр, омметр.

- Проводник из какого материала следует отобрать для резки пенопласта?
- Как можно установить, из какого материала изготовлена проволока?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Можно ли на основе формулы $R = \frac{U}{I}$ утверждать, что электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально напряжению на его концах и обратно пропорционально силе тока в нем? Почему?			
2	Почему с понижением температуры удельная электропроводность металлического проводника увеличивается, а его удельное сопротивление уменьшается?			
3	Длина медной проволоки 8 м, её масса 89 г. Чему равно сопротивление этой проволоки (плотность меди равна $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; удельное сопротивление $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах определения понятий и выражений: “закон Ома для участка цепи”, “падение напряжения”, “сопротивление металлического проводника”, “удельное сопротивление”, “сверхпроводимость”.

## 2.3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

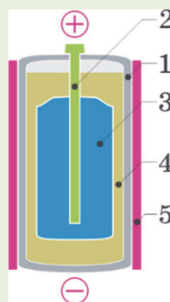
### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8

Для продолжительного существования электрического тока в проводнике необходимо непрерывно поддерживать разность потенциалов на его концах: необходимо обеспечить непрерывное накопление зарядов на концах проводника.

- С этой целью используют устройства, называемые источником тока или генератором.
- В источниках тока происходит разделение зарядов: положительные заряды собираются на одном полюсе, а отрицательные – на другом полюсе источника тока.
  - Источник тока, принцип работы которого основан на химической реакции, называют *гальваническим элементом*. Он назван в честь итальянского биолога Луиджи Гальвани: проводя опыты на животных, он обнаружил явление электризации при сокращениях мышц.

Современные сухие гальванические элементы состоят из цинкового сосуда (1) с угольным стержнем (2) внутри. Угольный стержень помещают в полотняный мешочек (3) со смесью оксида марганца с углем. Мешочек окружен клейстером (4), полученным при смешении муки и раствора нашатыря. Цинковый сосуд с содержимым помещают в картонную коробку (5) и заливают сверху слоем смолы. В результате химических реакций внутри элемента угольный стержень заряжается положительно, а цинковый сосуд отрицательно.



Электрическую цепь составляют из различных необходимых элементов:

- а) источник тока; б) потребитель энергии (лампа, электрический звонок, электронагреватель, телевизор и др.); в) ключ (замыкающее и размыкающее устройство); д) электроизмерительные приборы (амперметр, вольтметр и др.); е) соединительные провода.

► При прохождении электрического тока по участку цепи в ней происходит потеря энергии, которая выделяется в виде тепла. Но ток через цепь проходит не переставая. Это значит, что потери энергии в цепи непрерывно восполняются извне.

• Может ли быть источником этой энергии электростатическое поле?

► В новостях одного из телеканалов была передана следующая информация: “... При пожаре, произошедшем в доме жителя деревни, человеческих жертв нет, однако все имущество уничтожено огнём. В отчете Министерства по чрезвычайным ситуациям, как причина пожара указывается возникновение короткого замыкания при использовании жителями дома самодельного нагревательного устройства”.

- Что такое короткое замыкание?
- Почему короткое замыкание становится причиной пожара?



### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

Какую “роль” выполняет батарея в цепи?

**Задача 1.** На большинстве используемых в быту батареек написано 1,5 В. На что указывает эта надпись?

**Обсуждение результата:**

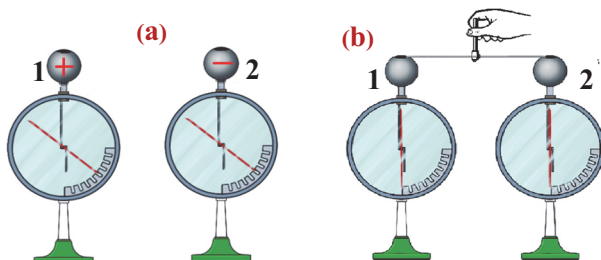
- Что означает маркировка 1,5 В на батарейках?
- Какую “роль” выполняет батарейка (или аккумулятор) в цепи?



**Сторонние силы.** Металлические сферы двух одинаковых электрометров зарядим зарядами противоположного знака и соединим проводом (а и б). Электрическое

поле, созданное разностью потенциалов между сферами, приводит к упорядоченному движению свободных электронов в проводе. В результате возникает электрический ток и сразу прекращается – электрометры разряжаются. Это значит, что разность потенциалов между сферами станет равна нулю, электрическое поле исчезнет и электрический ток в проводнике прекратится.

Для существования электрического тока в течение продолжительного времени следует поддерживать разность потенциалов между металлическими сферами 1 и 2. Для этого используют специальные устройства – источники тока.



Электростатическое поле перемещает свободные электроны только из части проводника с меньшим потенциалом в часть с большим потенциалом, задача источника тока заключается в возвращении этих электронов обратно в часть с меньшим потенциалом (на отрицательный полюс) (c). Значит, в источнике тока свободные электроны должны двигаться в направлении, противоположном направлению сил, действующих на них со стороны электрического поля. А это возможно в том случае, если в источнике тока на частицы действуют силы неэлектростатического происхождения.

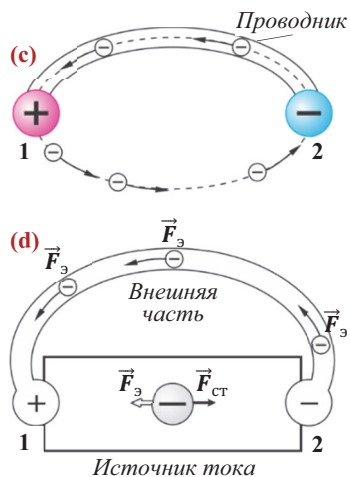
• Все силы, действующие на электрически заряженные частицы и не являющиеся силами электростатического происхождения, называют **сторонними силами**.

• **Источник тока** – устройство, в котором создаются сторонние силы, действующие на свободные заряженные частицы.

Природа сторонних сил может быть химической (в гальваническом элементе), тепловой (в термоэлементе), световой (в фотоэлементе) и др.

Отметим, что необходимость сторонних сил для существования постоянного тока в цепи является результатом закона сохранения энергии. Так как электростатическое поле является потенциальным, то работа этого поля при перемещении заряженных частиц вдоль замкнутой цепи равна нулю. Прохождение электрического тока по цепи сопровождается потерями энергии – проводник нагревается и выделяет тепло по закону Джоуля-Ленца. Поэтому в цепи должен быть другой источник энергии, в результате работы которого будут восполняться потери энергии. Сторонние силы должны быть непотенциальными, чтобы их работа вдоль замкнутой цепи была отлична от нуля. В процессе совершения ими работы носители заряда приобретают энергию внутри источника тока. При подсоединении проводника к полюсам источника свободные электроны в них движутся под действием электростатических сил, а внутри источника их двигают сторонние силы (d).

**Электродвижущая сила.** Вы уже знаете, что отличная от нуля работа электрического поля по созданию электрического тока характеризуется физической величиной, называемой *электродвижущей силой*





индукции (см. тема 1.9). В источниках постоянного тока действие сторонних сил характеризуется физической величиной, называемой электродвижущей силой (ЭДС).

• *Электродвижущая сила источника тока – физическая величина, равная отношению работы сторонних сил при перемещении заряда вдоль замкнутого контура к величине этого заряда:*

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст.}}{q}. \quad (1)$$

**Закон Ома для полной цепи.** Из вышесказанного следует, что постоянный электрический ток существует в замкнутой цепи только при наличии источника тока. Замкнутая (или полная) цепь состоит из двух участков – внешнего и внутреннего. Внешний участок цепи может состоять из потребителей, соединительных проводов и электроизмерительных приборов. Внутренний участок цепи находится внутри источника тока. Сопротивление внешнего участка цепи называется *внешним сопротивлением* ( $R$ ), а сопротивление источника тока называется *внутренним сопротивлением* ( $r$ ). Поэтому полное сопротивление цепи равно сумме этих двух сопротивлений:

$$R_{п} = R + r. \quad (2)$$

ЭДС источника тока равна сумме падений напряжений на внешнем и на внутреннем участках замкнутой цепи:

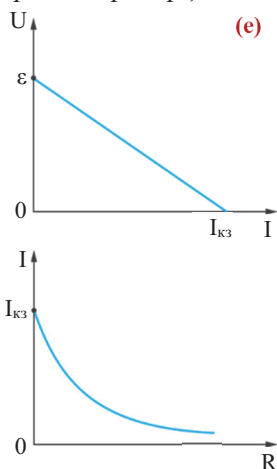
$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (3)$$

Из формулы (3) получим для силы тока:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (4)$$

Последняя формула является математическим выражением закона Ома для полной (замкнутой) цепи.

• *Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.*



Математически закон Ома можно выразить и следующим образом:

$$\mathcal{E} = U + Ir. \quad (5)$$

Здесь  $U$  – напряжение на полюсах источника при замкнутой цепи. Если цепь постоянного тока разомкнута ( $R \rightarrow \infty$ ), то  $I = 0$  и  $U = \mathcal{E}$  (е).

Следовательно, для измерения ЭДС источника тока следует в незамкнутой цепи подсоединить вольтметр к полюсам источника.

При коротком замыкании полюсов источника ( $R = 0$ ) сила тока будет определяться только внутренним сопротивлением источника тока. Поэтому эту силу тока называют *силой тока короткого замыкания* (см: е):

$$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (6)$$

Так как внутреннее сопротивление источников мало, сила тока короткого замыкания принимает очень большое значение, и это может привести к воспламенению и выходу из строя источника тока.



Из выражения (5) можно определить падение напряжения на концах внешнего участка замкнутой цепи:

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (7)$$

Мощность тока внешнего участка цепи (её иногда называют полезной мощностью):

$$P_{\text{полез}} = IU = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (8)$$

При  $R = r$  мощность тока, выделяемая на сопротивление  $R$ , будет максимальной. Полная же мощность цепи:

$$P_{\text{полн}} = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}. \quad (9)$$

Отношение полезной мощности цепи к её полной мощности называется коэффициентом полезного действия (КПД):

$$\eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100\% = \frac{IU}{I\mathcal{E}} \cdot 100\% = \frac{U}{\mathcal{E}} \cdot 100\%$$

или

$$\eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100\%. \quad (10)$$

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Подтвердите математическое выражение закона Ома для полной цепи.**

**Задача 2.** Докажите, что сила тока в полной цепи определяется выражением  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ .

**Подсказка.** 1. Учтите, что при прохождении тока по полной цепи на внешнем и внутреннем участках цепи выделяется тепло Джоуля–Ленца. 2. Напишите формулу Джоуля–Ленца для обоих участков и закон сохранения энергии для полной цепи.

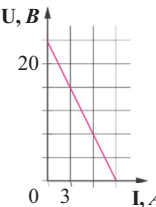
**Обсуждение результата:**

- Чем отличаются законы Ома для полной цепи и для участка цепи?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

- Почему при соединении полюсов батарейки медной проволокой она сразу нагревается, а батарейка приходит в негодное состояние?

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

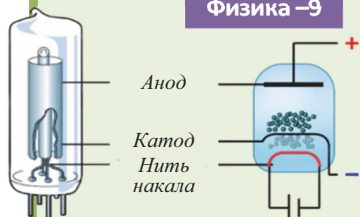
№	Вопросы		Знаю		
			слабо	средне	хорошо
1	На рисунке изображен график зависимости $U(I)$ для источника тока. Определите: а) ЭДС источника; б) силу тока короткого замыкания; в) внутреннее сопротивление источника; г) внешнее сопротивление цепи при значении силы тока $I = 4 \text{ А}$ .				
2	При равенстве внешнего сопротивления $3 \text{ Ом}$ сила тока равна $2 \text{ А}$ , при равенстве внешнего сопротивления $6 \text{ Ом}$ сила тока равна $1,5 \text{ А}$ . Определите: а) внутреннее сопротивление источника; б) ЭДС источника.				

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах определения следующих понятий: “закон Ома для полной цепи”, “сторонние силы”, “источник тока”, “сила тока короткого замыкания», “ЭДС замкнутой цепи”, “КПД полной цепи”.

## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

Физика –9



- Явление испускания электронов сильно нагретым металлом называют **термоэлектронной эмиссией**.

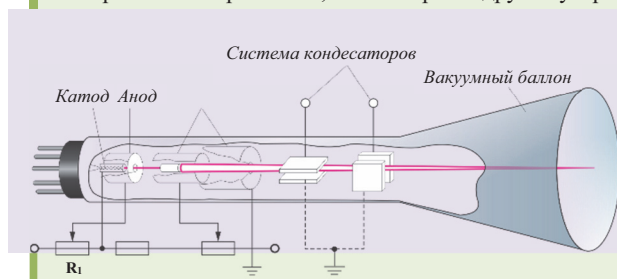
Если к замкнутой электрической цепи подсоединить устройство, в котором происходит термоэлектронная эмиссия, и придать испускаемым электронам направленное движение, то такое устройство может обеспечить одностороннее прохождение электрического тока в цепи.

- Вакуумный баллон с катодом и анодом внутри, принцип работы которого основан на явлении термоэлектронной эмиссии, называется **двухэлектродной электронной лампой**, или **вакуумным диодом**.

Главное свойство вакуумного диода заключается в том, что в нем электроны могут двигаться только в одном направлении – от катода к аноду. Так, электроны, испарившиеся с поверхности нагретого катода, образуют вокруг него электронное облако. При подсоединении катода к отрицательному полюсу источника тока, а анода к его положительному полюсу испарившиеся с поверхности металла электроны под действием созданного между электродами поля совершают упорядоченное движение к аноду. При достижении электронами катода цепь замыкается и по ней проходит ток.

- Вакуумный прибор, в котором с ускорением узкого электронного пучка происходит преобразование электрического сигнала в видимый, называется **электронно-лучевой трубкой**.

Электронно-лучевая трубка долгие годы была важной частью компьютеров, осциллографов, электронных микроскопов, телевизоров и других устройств.

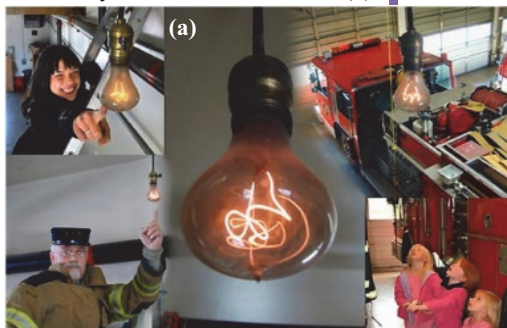


- Что такое вакуум?

- Вакуум – “друг” или “враг” человека? Ответ обоснуйте примерами.

- В одной из пожарных частей города Ливермор (США, штат Калифорния) светится самая “долгоиграющая” лампочка в мире. Эта лампа накаливания мощностью 4 Вт попала в Книгу рекордов Гиннеса, так как начала светить в 1901 году и светит по сей день **(а)**.

- Как вы думаете, что является причиной “долголетия” этой лампочки?
- Может ли лампочка с не поврежденной спиралью, но сломанным стеклянным баллоном продолжать светить как прежде **(б)**? Почему?



**Задача 1.** Основываясь на приобретенных знаниях, вставьте ключевые слова вместо пропусков и допишите предложения.

Самая простая лампа, действие которой основано на явлении \_\_, является электронной лампой или \_\_. Вакуумный диод представляет собой стеклянный (или керамический) баллон, воздух внутри которого \_\_ до  $10^{-6} - 10^{-7}$  мм рт. ст. Он оснащен двумя электродами, называемыми \_\_ и \_\_. Подсоединяя катод к \_\_ полюсу источника \_\_, а анод к его \_\_ полюсу, обеспечивается односторонняя проходимость \_\_ в цепи. Таким образом, \_\_ в вакууме являются электроны.

**Обсуждение результата.**

- Почему вакуумная лампа имеет одностороннюю проходимость?

**Ключевые слова:**

давление;  
термоэлектронная  
эмиссия;  
катод;  
вакуум;  
носители  
электрического заряда;  
отрицательный;  
положительный;  
электрический ток;  
двухэлектродный;  
постоянный ток;  
разреженный;  
анод;  
вакуумный диод.

**Электропроводность вакуума.** Вакуум (лат. “*vacuus*” – пустой) – среда, в которой нет атомов и молекул.

- В технике и прикладной физике под вакуумом понимают сильно разреженное состояние среды (в которой давление во много раз меньше атмосферного).

В вакуумной камере (сосуд, в котором создается вакуум) длина свободного пробега (среднее расстояние, которое частица пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего) газовых молекул больше размеров камеры или расстояния между электродами внутри вакуумной камеры. Поэтому в вакуумной камере газовые молекулы, можно сказать, друг с другом не сталкиваются. Они сталкиваются лишь со стенками сосуда и с электродами.

Вакуум является идеальным диэлектриком (не проводит электрический ток) именно потому, что в нем нет частиц среды, следовательно, нет свободных носителей заряда.

Чтобы в вакууме возник электрический ток, следует искусственным образом ввести в него свободные заряженные частицы и создать в нем электрическое поле. В качестве источника свободных заряженных частиц можно использовать металлы. Естественно, чтобы электрон покинул металл и перешел в вакуум, ему следует преодолеть кулоновские силы притяжения ионов кристаллической решетки (с). Для этого следует совершить работу против этих сил. Работу, которую нужно совершить для выхода электрона из металла в вакуум, называют *работой выхода*.

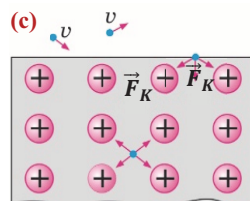
- Работа выхода ( $A_{\text{вых}}$ ) – минимальное значение энергии, которой должен обладать электрон для выхода из металла в вакуум. Работа выхода зависит только от рода металла. Металл могут покинуть электроны, кинетическая энергия которых:

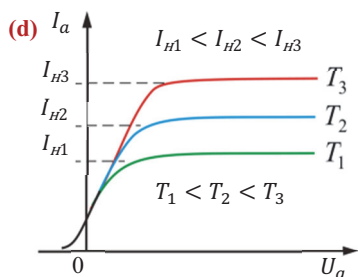
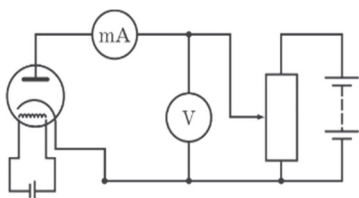
$$\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вых}} \quad (1)$$

- Явление испускания электронов металлом называется *электронной эмиссией*.

Свободные электроны внутри металла вследствие непрерывного взаимодействия с ионами не обладают достаточной кинетической энергией, чтобы покинуть металл. Увеличить энергию электронов можно, сообщив им дополнительную энергию.

Дополнительную энергию электронам можно сообщить различными способами, например, нагревая металл до высокой температуры или облучая поверхность металла световыми, ультрафиолетовыми и другими лучами. При нагревании





металла до высокой температуры кинетическая энергия свободных электронов в нем увеличивается, и при определенной температуре они покидают металл – происходит *термоэлектронная эмиссия*. Принцип работы таких приборов, как вакуумный диод, электронно-лучевая трубка, трубка X-лучей (рентгеновская трубка), основан на явлении термоэлектронной эмиссии.

**Вольтамперная характеристика (ВАХ) вакуумного диода.** Одной из основных характеристик электронных приборов является его ВАХ. Экспериментально установлено, что ВАХ вакуумного диода носит нелинейный характер (d). Причина этого заключается в следующем: при увеличении разности потенциалов (напряжения) между электродами достигается такое его значение, при котором все электроны, покинувшие катод, доходят до анода. Несмотря на дальнейшее увеличение напряжения сила тока в анодной цепи

диода остается неизменной – возникает так называемый *ток насыщения*. Сила тока насыщения зависит от числа электронов, покинувших катод за единицу времени:

$$I_H = \frac{eN}{t}. \quad (2)$$

Значение силы тока насыщения зависит от температуры катода: с ростом температуры катода растет и число электронов, покинувших металл в единицу времени, и сила тока насыщения увеличивается (см: d).

**Электронный пучок и его свойства.** Электроны, вылетевшие с поверхности спирали вакуумной лампы в результате её нагрева, ускоряются разностью потенциалов (напряжением) между катодом и анодом и направляются к аноду. Согласно закону сохранения энергии работа электрического поля над электроном равна увеличению его кинетической энергии:

$$\frac{m_e v^2}{2} = e(\varphi_a - \varphi_k) = eU. \quad (3)$$

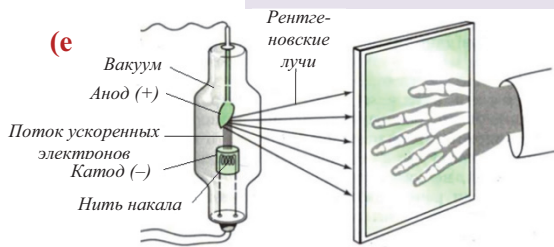
Здесь  $\varphi_a$  и  $\varphi_k$  – потенциалы анода и катода соответственно.

Если в аноде вакуумной лампы сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пройдет через это отверстие и образует электронный пучок. Свойства такого пучка установлены экспериментально: 1) *попадая на поверхность тел, электронный пучок нагревает её*; 2) *падая на поверхность металлов, может оторвать электроны с его поверхности*; 3) *торможение быстрых электронных пучков веществом приводит к возникновению рентгеновских лучей*; 4) *при бомбардировке электронным пучком некоторых веществ, например, стекла, сульфидов цинка и кадмия и др., наблюдается свечение этих веществ*; 5) *электронные пучки отклоняются электрическим полем*; 6) *электронные пучки отклоняются магнитным полем*.

**Рентгеновская трубка.** В стеклянной трубке создается вакуум, и нагревание помещенного внутри трубки катода приводит к испарению электронов с его поверхности (термоэлектронная эмиссия). Вылетевшие с катода электроны разгоняются электрическим полем, созданным между катодом и анодом, разность потенциалов

между которыми равна десяткам киловольт. При столкновении с анодом электроны испытывают резкое торможение, теряя большую часть приобретенной энергии, и возникает рентгеновское излучение (*X-rays radiation*) (е). За открытие этого излучения (в 1895 году) немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923) стал первым в истории физики лауреатом Нобелевской премии, которую получил в 1901 году.

Рентгеновские лучи невидимы для человеческого глаза, однако эти лучи способны проникать через толстые слои непрозрачных для света тел (прозрачность вещества для этих лучей зависит от его состава и от толщины слоя). Это свойство рентгеновских лучей широко используется в медицине для диагностики болезней внутренних органов человека. Эти лучи обнаруживаются по их действию на фотопленку или по свечению некоторых кристаллов под действием облучения ими.



#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

#### Где скорость электронов больше, в вакууме или в металле?

**Задача 2.** Напряжение между анодом и катодом вакуумного диода равно 300 В. Чему будет равна скорость электрона вблизи анода, если свое движение он начинает вблизи катода из состояния покоя (заряд и масса электрона равны:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ;  $m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ )? Электрическое поле считать однородным.

#### Обсуждение результата:

- Где электрон движется быстрее, в вакууме или в металле? Почему?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

- Где ещё, кроме медицинской диагностики, применяют рентгеновские лучи?

**Подсказка:** используйте информацию с электронного адреса:

<https://shkolazhizni.ru/computers/articles/15033/>.

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Движение каких носителей заряда представляет собой электрический ток в вакууме? Как они попадают в вакуум?			
2	Работа выхода электрона из серебра равна $6,9 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . С какой минимальной скоростью вылетит электрон из серебра?			
3	Как изменяется внутренняя энергия тела при попадании электронного пучка на поверхность тела?			
4	От чего зависит энергия электронного пучка в вакууме?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листках определения следующих понятий: “вакуум”, “электронная эмиссия”, “термо-электронная эмиссия”, “работа выхода”, “сила тока насыщения” и примеры применения электропроводности вакуума.

**Проект.** Подготовьте постер-презентацию по следующим темам:

1. Вильгельм Конрад Рентген (в группах).
2. Применение рентгеновского излучения (в группах).

## 2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

### • Обсуждение проекта •

#### Презентация групп

#### Обсуждение постера по теме “Вильгельм Конрад Рентген”:

- Кто такой Вильгельм Конрад Рентген?
- Как он обнаружил рентгеновское излучение?
- Как он назвал эти лучи?
- Какой награды был удостоен Рентген за свою работу?

#### Обсуждение постера по теме “Применение рентгеновского излучения”:

- Для каких целей используется рентгеновское излучение в медицине?
- В каких областях науки широко используется рентгеновское излучение?
- Как применяется рентгеновское излучение на производстве?
- В чем заключается вред, наносимый рентгеновским излучением?

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика –9

В обычном состоянии газ является диэлектриком. Существуют два способа создания свободных носителей заряда в газах: 1. Ионизация нейтральных атомов и молекул газа под воздействием внешних факторов, которые в этом случае называют

**ионизаторами**. К ним относятся нагревание до высокой температуры, облучение, “бомбардировка” высокоскоростными частицами и др. 2. Внесение в газ свободных заряженных частиц (электронов, ионов) извне. Например, пламя свечи или спиртовой горелки поставляет в воздух положительные и отрицательные ионы. Если эти частицы оказываются в электрическом поле, то, двигаясь направленно, создают электрический ток. Можно наблюдать это на опыте: если в пространство между пластинами заряженного воздушного конденсатора внести пламя свечи, то конденсатор сразу разрядится – воздух между пластинами превращается в проводник электрического тока.

• Прохождение электрического тока через газ называют **газовым разрядом**. Электрический ток в газах представляет собой направленное движение электронов, положительных и отрицательных ионов, созданных в газе под действием ионизатора или внесенных в газ извне. После прекращения действия ионизатора электроны и положительные ионы, притягиваясь друг к другу, снова образуют нейтральные атомы – происходит рекомбинация частиц. В результате газ снова превращается в диэлектрик, и несмотря на наличие внешнего электрического поля, газовый разряд прекращается.

• Газовый разряд, существующий только под действием внешнего ионизатора, называют **не-самостоятельным газовым разрядом**.

• Газовый разряд, существующий в газе после прекращения действия внешнего ионизатора, называют **самостоятельным газовым разрядом**. Самостоятельный газовый разряд возникает в результате ударной ионизации, которая осуществляется ускоренными электронами и заключается в эмиссии электронов нового поколения с поверхности катода. Существуют четыре вида самостоятельного газового разряда:

**Тлеющий разряд** – наблюдается при малых давлениях ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  мм рт. ст.) и напряжении между электродами в несколько сот вольт.

**Искровой разряд** – возникает при существовании высокого напряжения между электродами. Характерными его проявлениями являются мгновенность и быстрота.

**Дуговой разряд (электрическая дуга)** – интенсивная термоэлектронная эмиссия с поверхности сильно нагретого катода.

**Коронный разряд** – возникает вокруг острых концов металлов, обладающих большим электрическим зарядом.

- Каждый день вы пользуетесь различными видами электрических выключателей. С их помощью вы включаете и выключаете свет в комнатах, подсоединяете потребители в электрическую цепь и безопасно отсоединяете их от сети.

- На чем основано действие электрических выключателей?





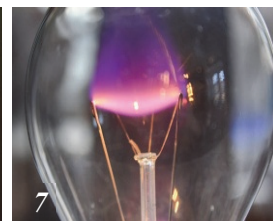
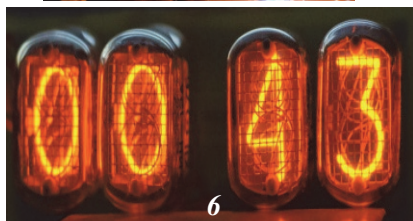
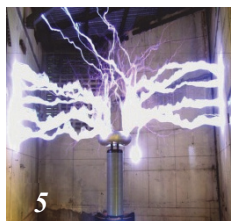
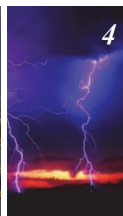
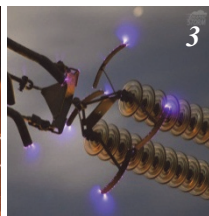
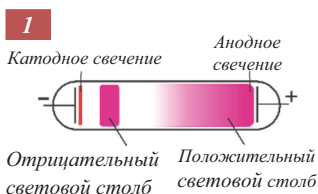
# ИССЛЕДОВАНИЕ

1

Определите, к какому виду самостоятельного газового разряда относятся приведенные примеры?

**Задача 1.** Проанализируйте 7 приведенных рисунков и, определив, к какому виду самостоятельного газового разряда они относятся, отметьте их номера под соответствующими ключевыми словами.

Дуговой разряд	Тлеющий разряд	Коронный разряд	Искровой разряд



## Обсуждение результата:

- Объясните разницу между физическими механизмами возникновения различных видов самостоятельного газового разряда.
- При каких условиях может возникнуть самостоятельный, и несамостоятельный газовый разряд?

**Газовый разряд.** В обычных условиях газы состоят из нейтральных атомов и молекул и поэтому являются диэлектриками – они не проводят электрический ток. Чтобы газ превратился в проводник электрического тока, его следует ионизировать.

• *Ионизация – процесс превращения нейтрального атома (или молекулы) газа в ион в результате потери или приобретения электрона.*

Для отрыва электрона от нейтрального атома и превращения его в положительный ион необходимо совершить работу против сил взаимного кулоновского притяжения электрона к ядру.

• *Минимальная энергия, необходимая для отрыва электрона от нейтрального атома, называется энергией ионизации ( $W_i$ ).*

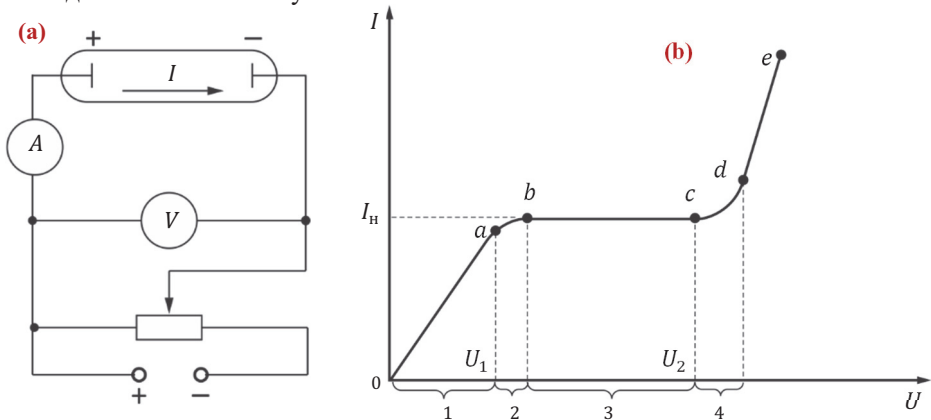
Ионизация газа может быть осуществлена различными способами:

- внесением пламени в газовую среду (пламя содержит в своем составе большое число положительных и отрицательных ионов);
- нагреванием газа до такой высокой температуры (выше  $10^5$  K), которая способна ионизировать газ. Это называют *термической ионизацией*;
- облучением газа рентгеновскими, радиоактивными и космическими лучами;
- созданием в газе сильного электрического поля.



Если в ионизированном газе создать электрическое поле, то через газ проходит электрический ток – возникает газовый разряд. Существует два вида газового разряда: несамостоятельный и самостоятельный газовый разряд.

**ВАХ газового разряда.** Вольт-амперная характеристика газа была определена экспериментально. С помощью ионизатора газ между электродами (катодом и анодом) в стеклянном сосуде ионизируется, т.е. распадается на электроны и положительные ионы (а). Затем начинается постепенное увеличение напряжения между электродами от нулевого значения. Как видим из ВАХ (б), в слабом электрическом поле (при малых значениях напряжения) сила тока растет прямо пропорционально напряжению (см. б, *участок Оа* графика). На этом участке изменения параметров происходят согласно закону Ома.



При дальнейшем увеличении напряжения пропорциональность между силой тока и напряжением нарушается (*участок ab*). Начиная со значения напряжения  $U_1$  сила тока не зависит от напряжения – возникает явление насыщения (*участок графика bc*). Это означает, что все образованные под действием ионизатора электроны и ионы, двигаясь упорядоченно, участвуют в создании тока. Итак, *участок Оа* графика соответствует *несамостоятельному газовому разряду*.

Значение силы тока насыщения определяется следующим выражением:

$$I_H = \frac{neV}{t}. \quad (2)$$

Здесь  $n$  – число электронно-ионных пар, созданных ионизатором за время  $t$  в единице объема,  $e$  – элементарный заряд,  $V$  – объем пространства между электродами.

Если продолжать увеличивать напряжение, то при некотором его значении ( $U_2$ ) небольшие изменения напряжения приводят к резкому возрастанию силы тока. Дело в том, что сильное электрическое поле увеличивает кинетическую энергию электронов, и когда её значения превышают энергию ионизации нейтральных молекул газа, т.е. при

$$\frac{m_e v^2}{2} \geq W_H, \quad (3)$$

электроны, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, ионизируют их атомы. Это явление называется *ионизацией ударами электронов*. В результате число электронов и ионов, а значит, и сила тока в газе резко возрастает (*участок графика cd*).

При ещё больших значениях напряжения кинетическая энергия положительных ионов в электрическом поле возрастает, и в результате последовательных ударов ионов о катод выбиваются все новые электроны – возникает вторая эмиссия электронов. Одновременно происходит термоэлектронная эмиссия с катода, нагретого до очень высокой температуры. В результате число носителей заряда в газе, а значит и сила проходящего через него тока резко возрастает (*участок **de** графика*). Таким образом, когда выполняется условие (3), происходит самостоятельный газовый разряд.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2

**Что подразумевают под ионизацией газа?**

**Задача 2.** Объём газа между электродами ионизирующей трубки 0,25 л. Сила тока насыщения в ионизированном газе  $I_n = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ . Сколько электронно-ионных пар образуется в единице объёма за 2 секунды ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ )? Электрическое поле считать однородным.

**Обсуждение результата:**

- Почему под ионизацией газа подразумевают образование электронно-ионных пар в нем?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

- Почему, в отличие от обычных электролиний линии высокого напряжения не покрывают слоем изоляции?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Может ли газовый разряд протекать за счет отрицательных ионов? Ответ обоснуйте.			
2	При каких условиях возникает самостоятельный газовый разряд?			
3	Под действием ионизатора число ионов в газе растёт до какого-то предела, затем остается неизменным. Почему?			
4	Разряд молнии длился 1 мс. При этом сила тока в разряде молнии равнялась 60 кА. Определите прошедший заряд.			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листах определения следующих понятий: “газовый разряд”, “самостоятельный разряд”, “несамостоятельный разряд”, “энергия ионизации”, “длина свободного пробега”, нарисуйте ВАХ для самостоятельного и несамостоятельного разрядов.

## 2.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика– 9

- Вещества (соль, кислота и щелочь), растворы (или расплавы) которых проводят электрический ток, называются **электролитами**.

- Процесс распада в жидкости нейтральных молекул на положительные и отрицательные ионы называется **электролитической диссоциацией**.
- Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов.
- Процесс выделения вещества на электродах при прохождении электрического тока через электролит называется **электролизом**.
- Масса вещества, выделенного на электродах при электролизе, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит. Этот закон электролиза, установленный английским ученым М. Фарадеем, математически выражается следующим образом:

$$m = k \cdot q, \quad \text{или} \quad m = kIt.$$

Здесь  $m$  – масса выделившегося на электродах вещества,  $q$  – заряд, прошедший через электролит,  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый электрохимическим эквивалентом.

- Электрохимический эквивалент вещества численно равен массе вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит заряда 1 Кл. Разные вещества обладают различным значением электрохимического эквивалента.

- Неотъемлемой частью огромного количества современных устройств, от мобильных телефонов до автомобилей, являются электрохимические элементы и аккумуляторы.

В гигантских электролитических ваннах, испаряющих ядовитые пары, из расплавленных при высоких температурах бокситов методом электролиза получают алюминий, используемый в дальнейшем для изготовления от обычной банки для колы до авиационной промышленности. Вокруг нас много предметов, покрытие которых осуществлено методом электролиза (ювелирные изделия, хромированные ручки дверей и окон и др.). Не случайно это явление изучается в отдельном разделе науки – электрохимии.

- В чем заключается физическая основа этого явления?

### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

#### Какие носители заряда осуществляют электрический ток в растворе?

**Оборудование:** источник постоянного тока (выпрямитель ВС-24), электролитическая ванна, дистиллированная вода, соль  $\text{CuCl}_2$ , амперметр, вольтметр, ключ, реостат, соединительные провода.

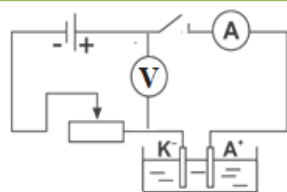
**Ход работы:** 1. Соберите электрическую цепь по приведенной схеме.

2. Налейте в электролитическую ванну дистиллированной воды и замкните цепь, наблюдая за показаниями электроизмерительных приборов.

3. Разомкните цепь, добавьте в воду немного соли  $\text{CuCl}_2$ . Замкнув снова цепь, следите за показаниями приборов.

#### Обсуждение результата:

- Каков результат вашего опыта?
- Объясните процесс явления электролиза при добавлении в воду соли  $\text{CuCl}_2$ .
- Какие частицы электроносителей обеспечили электропроводность в солевом растворе?



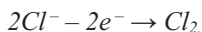
**Явление электролиза.** Опыт приводит к следующим выводам:

1. Жидкости, как и газы, могут быть как диэлектриками, так и проводниками.

2. При растворении соли  $\text{CuCl}_2$  в воде происходит электролитическая диссоциация. В растворе образовались свободные носители зарядов: положительные ионы меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ) и отрицательные ионы хлора ( $\text{Cl}^-$ ). При замыкании цепи положительные ионы, двигаясь к катоду, и отрицательные ионы, двигаясь к аноду, осуществили электрический ток через раствор. Делая из этого выводы, можно дать следующее определение электролитам:

- Электролиты – это вещества, расплавы или растворы, проводящие электрический ток за счет ионов, образовавшихся вследствие диссоциации.
- Электролиты – твердые или жидкие вещества в растворенном (или расплавленном) состоянии, полностью или частично состоящие из ионов.
- Так как электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов, то такую проводимость называют ионной.

3. При замыкании цепи дошедшие до анода ионы хлора  $\text{Cl}^-$ , отдав свой лишний электрон электроду, нейтрализуются реакцией окисления и выделяются на поверхности анода в виде пузырьков:



Дошедшие до катода ионы меди  $\text{Cu}^{2+}$ , забирая у этого электрода по два электрона, превращаются в нейтральные атомы меди и, откладываясь на аноде, образуют на нем слой меди:  $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}_0$ . Происходит процесс электролиза. Значит, прохождение тока через раствор электролита сопровождается выделением вещества на электродах.

Сила тока, проходящего через электролит, при постоянном значении сопротивления линейно зависит от напряжения – закон Ома для электролитов выполняется (а). Однако график не пересекает начало координат, он несколько смещен вправо. Это объясняется тем, что некоторое значение напряжения идет на поляризацию опущенных в раствор электролита электродов.

Поляризация электродов – отклонение заряда электрода от его равновесного значения в процессе электролиза. В результате поляризации от своего равновесного значения отклоняются и значения потенциалов электродов.

С ростом температуры сопротивление (удельное сопротивление) электролита линейно уменьшается. Это происходит потому, что с ростом температуры интенсивность теплового движения частиц в растворе электролита увеличивается и соответственно растет степень диссоциации (б):  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ .

Здесь  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, он обладает отрицательным значением,  $\rho_0$  – значение удельного сопротивления электролита при  $0^\circ\text{C}$ .

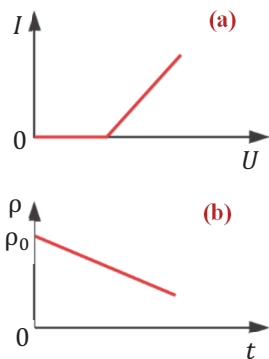
**Закон электролиза.** Этот закон в 1836 году был выдвинут английским ученым М.Фарадеем. В нем установлена закономерная зависимость между величинами, характеризующими явление электролиза. Эту зависимость можем определить и мы. Для этого обозначим массу иона  $m_{0i}$ , количество дошедших до катода за время  $\Delta t$  ионов –  $N_i$ :

$$m = m_{0i} \cdot N_i. \quad (1)$$

Масса иона определяется на основе значения молярной массы химического элемента:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A}. \quad (2)$$

Здесь  $N_A$  – число Авогадро,  $M$  – молярная масса химического элемента. Количество дошедших до катода ионов за время  $\Delta t$  равно отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего за это время через раствор к заряду иона  $q_{0i}$ :



$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}} = \frac{I \Delta t}{q_{0i}}. \quad (3)$$

Здесь учтено, что  $\Delta q = I \Delta t$ . Заряд иона определяется его валентностью ( $n$ ):

$$q_{0i} = n \cdot e. \quad (4)$$

Если учесть выражения (2), (3) и (4) в формуле (1), то выяснится, от каких величин зависит масса выделившегося на электроде вещества:

$$m = \frac{M}{n \cdot e \cdot N_A} \cdot \Delta q \quad (5)$$

или

$$m = \frac{M}{n \cdot e \cdot N_A} \cdot I \Delta t. \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности в формуле (6) при множителе  $I \Delta t$  постоянен для данного вещества. Если обозначить его через  $k$ :

$$k = \frac{M}{n \cdot e \cdot N_A}, \quad (7)$$

то получим математическое выражение I закона электролиза:

$$m = k \cdot \Delta q, \quad (8)$$

или

$$m = k \cdot I \Delta t. \quad (9)$$

• *Масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении электрического тока через электролит, прямо пропорциональна силе тока в нем и времени прохождения тока.*

Коэффициент пропорциональности  $k$  называют *электрохимическим эквивалентом вещества*. Его физическая суть легко определяется при учете выражений (2) и (4) в формуле (7):

$$k = \frac{m_{0i}}{q_{0i}}. \quad (10)$$

• *Электрохимический эквивалент вещества численно равен отношению массы иона к его заряду. Величина, обратная этому отношению ( $\frac{q}{m}$ ), называется **удельным зарядом**.*

Произведение элементарного заряда на число Авогадро называют *постоянной Фарадея (или числом Фарадея)*:

$$F = e \cdot N_A. \quad (11)$$

• *Постоянная Фарадея численно равна заряду, прошедшему через раствор электролита за время, в течение которого на электроде выделяет 1 моль вещества:*

$$F = \frac{M}{n} \cdot \frac{\Delta q}{m} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta q}{\nu}. \quad (12)$$

Здесь  $\nu$  – количество вещества. Значение постоянной Фарадея, определенное в результате эксперимента:

$$F = e \cdot N_A = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}.$$

Если учесть выражение (11) в формуле (7), получим ещё одно выражение для электрохимического эквивалента:

$$k = \frac{M}{nF}. \quad (13)$$

Отношение молярной массы к валентности называют **химическим эквивалентом вещества**:

$$x = \frac{M}{n}. \quad (14)$$

Если учесть в выражении (13) выражение (14), выяснится связь между химическим и электрохимическим эквивалентом вещества:

$$k = \frac{x}{F}. \quad (15)$$

Эта зависимость называется **II законом электролиза**.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

Докажите следующее.

**Задача 1.** Докажите, что объединенный закон Фарадея имеет вид  $m = \frac{M}{F_n} I \Delta t$ .

2. Докажите, что отношение электрохимических эквивалентов вещества равно отношению его химических эквивалентов:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{x_1}{x_2}.$$

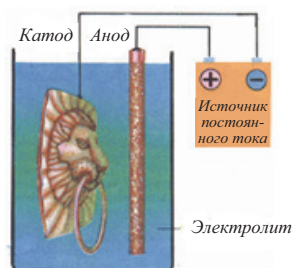
**Обсуждение результата:**

- Какова физическая суть I закона электролиза?
- Какова физическая суть электрохимического эквивалента вещества?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Изготовление металлических копий рельефных предметов называется **гальванопластикой**. Для получения металлической копии предметов, например, металлической монеты, медали, барельефа и др., изготавливают его образец из пластического материала (глина, воск и др.). Поверхность полученного образца покрывается графитовой пылью, затем образец в виде катода опускают в электролитическую ванну. Далее ...

- Завершите объяснение процесса гальванопластики.
- Почему в процессе гальванопластики поверхность предмета покрывают графитовой пылью?
- Как следует продолжить процесс гальванопластики, чтобы получить серебряную копию образца, например, барельефа?



#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какова природа носителей заряда в электролитах?			
2	От чего зависит сопротивление электролитов?			
3	В чем состоит физическая суть II закона электролиза?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листках определения или объяснения понятий “электролит”, “электролитическая диссоциация”, “электролиз”, “ионная проводимость”, “I закон электролиза”, “II закон электролиза”.

**Проект.** Подготовьте постер-презентацию на тему “Применение электролиза”.

## 2.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

### • Обсуждение проекта •

#### Презентация групп

**План обсуждений постеров на тему “Применения электролиза”:**

- Гальванопластика • Гальваностегия • Электрометаллургия
- Электролитическая очистка и покрытие • Очистка металлов • Получение тяжелой воды •

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

Чистый полупроводник (не имеющий в составе постороннего вещества) обладает **собственной проводимостью**. Существует два вида собственной проводимости: **1. Электронная или n-типа – электрическая проводимость**, осуществляемая движением свободных электронов в полупроводнике. n – первая буква латинского слова “*negativ*” (отрицательный).

**2. Дырочная или p-типа – электрическая проводимость**, образованная перемещениями дырок в полупроводнике. p – первая буква латинского слова “*pozitiv*” (положительный).

- Собственная электрическая проводимость чистых полупроводников осуществляется одинаковым количеством свободных электронов и дырок. К полупроводникам относятся: 12 элементов средних групп (IV, V и VI группы) периодической системы химических элементов (указаны розовым цветом в таблице); соединения элементов II и IV групп, а также III и V групп; можно сказать, большинство неорганических веществ.

Свойства полупроводниковых веществ формируются на основе ковалентной (парно-электронной) химической связи. При добавлении небольшого количества примеси в чистый полупроводник его электропроводность резко возрастает. Причина этого заключается в возникновении, наряду с собственной проводимостью, дополнительной примесной проводимости.

- Если примесь легко отдает свои валентные электроны и этим увеличивает число свободных электронов в полупроводнике, то такая примесь называется *донорной примесью* (от лат. “*donor*” – дарю). Полупроводник с донорной примесью обладает электронной примесной проводимостью (проводимость *n-типа*).
- Если примесь забирает дополнительные валентные электроны и этим увеличивает число дырок, то такая примесь называется акцепторной примесью (от лат. “*akceptor*” – принимающий). Полупроводник с акцепторной примесью обладает дырочной примесной проводимостью (проводимость *p-типа*).

	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
4	Be	B	C	N	O		
		13	14	15	16	17	
		Al	Si	P	S	Cl	
		31	32	33	34	35	
		Ga	Ge	As	Se	Br	
		49	50	51	52	53	54
		In	Sn	Sb	Te	I	Xe
			82	83	84	85	
			Pb	Bi	Po	At	

- В 1833 году Майкл Фарадей установил, что с ростом температуры электрическая проводимость сульфида серебра ( $Ag_2S$ ) также растет. В своем знаменитом произведении “Экспериментальные исследования по электричеству” он так пишет об этом: “Я не знаю другого вещества, кроме сульфида серебра в нагретом состоянии, электрическая проводимость которого могла бы сравниться с проводимостью металлов, и даже в отличие от металлов увеличивала свою проводимость. Однако, если хорошо поискать, наверно такие вещества можно обнаружить”. Продолжения исследований Фарадея привели в конце XIX века к открытию таких веществ, которые по электрической проводимости не были похожи ни на металлы, ни на диэлектрики. Кроме того, опыты выяснили второе необычное свойство этих веществ. Так, при нагревании места спайки контакта сульфида теллура или сульфида олова с металлом там возникала очень значительная ЭДС. В результате этот контакт очень хорошо проводил ток только в одном направлении и почти не проводил в противоположном. Эти вещества назывались *полупроводниками*. Необычные свойства полупроводников нашли своё правильное объяснение в начале XX века.

- Этим объяснениям уже 100 лет; как бы вы объяснили причину увеличения электрической проводимости полупроводников с увеличением температуры?



**Задача 1.** Перенесите таблицу в рабочие листки и, описав свойства веществ по их электропроводности, завершите её.

Вещество	Образец	Носители заряда	Удельное сопротивление при нагревании:
Металлы			
Растворы электролитов			
Полупроводники			
Диэлектрики			

### Обсуждение результата:

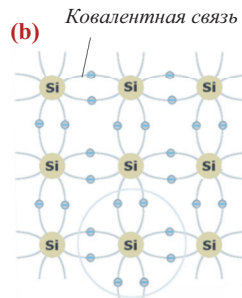
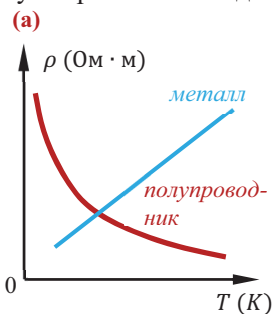
- Каких носителей зарядов будет больше в чистом полупроводнике без примесей при увеличении его температуры? Почему?
- Какие изменения происходят в электропроводности полупроводника при добавлении примеси?

**Полупроводники. Собственная проводимость полупроводников.** Полупроводниками являются вещества, удельное сопротивление которых при комнатной температуре находится в широком диапазоне:  $10^{-3} \div 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Это больше удельного сопротивления металлов ( $10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) и меньше удельного сопротивления диэлектриков ( $10^{10} \div 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). При температуре, близкой к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводника очень велико, с ростом температуры оно уменьшается (а). Причина этого заключается в физико-химических свойствах полупроводников. Рассмотрим их.

Полупроводники составляют компактную группу в периодической системе химических элементов (в основном элементы IV–VI групп). Наиболее широко используемыми в науке и технике полупроводниками являются *германий* и *кремний*. Эти элементы обладают 4-мя валентными электронами. Поэтому в кристалле каждый атом образует 4 ковалентные связи с соседними атомами. Электронные оболочки ближайших атомов, перекрывая друг друга, образуют парно-электронную связь (b).

В полупроводниковом кристалле такие связи достаточно прочны и при низких температурах, можно сказать, свободные электроны в полупроводниках не образуются. Это значит, что при низких температурах удельное сопротивление полупроводников огромно и они не проводят электрический ток. Когда полупроводниковый кристалл подвергается таким внешним воздействиям, как нагревание, облучение или др., кинетическая энергия валентных электронов может достигнуть значений, при которых они, разрывая связь, покидают атом – становятся свободными. В результате в месте разрыва химической связи (кристаллической решетки полупроводника) нарушается электрическая нейтральность – в месте, которое покинул электрон, образуется избыток положительного электрического заряда. Оставленное электроном пустым вакантное место в химической связи называется дыркой. Дырка ведет себя как положительный заряд, равный по модулю заряду электрона.

Освобожденное электроном вакантное место занимает валентный электрон соседнего атома, восстанавливая нейтральность этого места.



Однако при этом дырка образуется в соседнем атоме, потерявшем электрон. Таким образом, в чистом полупроводнике свободные электроны и дырки образуются одновременно, и заряды их по модулю равны. Поэтому при создании электрического поля в полупроводнике электрическая проводимость в нем осуществляется одновременным упорядоченным движением и свободных электронов, и дырок в противоположных направлениях. Значит, в полупроводниках электрический ток образуется движением двух видов носителей зарядов, свободных электронов и дырок.

Электропроводность чистых полупроводников (без примесей) называют **собственной проводимостью**.

**Примесная проводимость полупроводников.** На электропроводность полупроводников сильное действие оказывает наличие примеси в их составе. Существует два вида примеси: **донорная** и **акцепторная**.

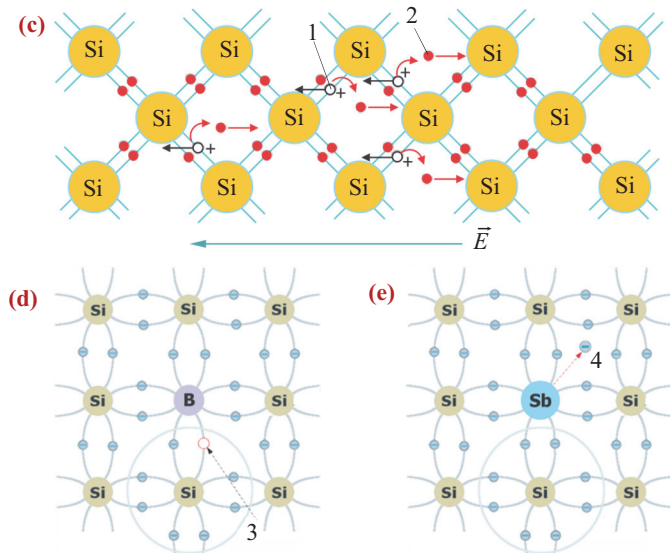
**Донорной** называют примесь, легко отдающую свои электроны в качестве свободных электронов проводимости. Это происходит тогда, когда число валентных электронов добавляемой к чистому полупроводнику примеси оказывается больше числа валентных электронов самого полупроводника. Поэтому в полупроводниках с донорной примесью электроны являются основными, а дырки – неосновными носителями заряда. Полупроводники, основными носителями заряда в котором являются электроны, называются **полупроводниками n-типа**.

**Акцепторной** называют примесь, которая может увеличить число дырок в полупроводнике. Это происходит в случае, когда число валентных электронов примеси оказывается меньше числа валентных электронов самого полупроводника. Поэтому в полупроводниках с акцепторной примесью дырки являются основными, а электроны – неосновными носителями заряда. Полупроводники, основными носителями заряда в котором являются дырки, называются **полупроводниками p-типа**.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2

Можете ли вы объяснить механизм электропроводности полупроводника?

**Задача 2.** Проанализируйте приведенные схемы.



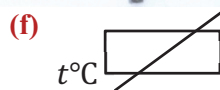
### Обсуждение результата:

- По схеме (с) определите:
  - 1) Схема кристалла какого полупроводника изображена: чистого или с примесью?
  - 2) Что обозначено цифрами 1 и 2?
  - 3) Что произойдет при помещении кристалла в электрическое поле?
- По схеме (d) определите:
  - 1) Что изображено на схеме?
  - 2) Что обозначено цифрой 3?
  - 3) Полупроводник какого типа получится, если к **Si** добавить в виде примеси бор (**B**)? Почему?
- По схеме (e) определите:
  - 1) Что изображено на схеме?
  - 2) Что обозначено цифрой 4?
  - 3) Полупроводник какого типа получится, если добавить к **Si** в виде примеси **Sb**? Почему?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Полупроводниковый термистор – прибор, применяемый почти во всех областях электротехники. С его помощью можно определить и регулировать температуру фреона холодильника, вакуумной камеры стиральной и посудомоечной машин, масла двигателя автомобиля и температуру других электрических систем (f).

- На каком свойстве полупроводников основан принцип работы термистора?
- Как можно определить температуру с помощью термистора? Выразите свое предположение в общем виде.



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

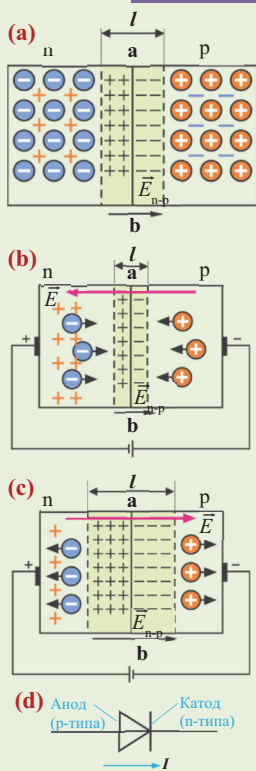
№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Чем отличается электропроводность полупроводников от электропроводности металлов, газов, электролитов и вакуума?			
2	Чем отличается примесная проводимость полупроводника от его собственной проводимости?			
3	Полупроводник какого типа получится, если к кристаллу полупроводника IV группы добавить в виде примеси элемент V группы? Почему?			
4	Полупроводник какого типа получится, если к кристаллу полупроводника VII группы добавить в виде примеси элемент III группы? Почему?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочих листках объяснения понятий “полупроводник”, “собственная проводимость”, “примесная проводимость”, “полупроводник n-типа”, “полупроводник p-типа”.

## 2.8. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД. ТРАНЗИСТОР

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9



• **Полупроводниковый диод** – прибор, состоящий из одного p-n перехода и двух контактов для соединения в электрическую цепь. Полупроводниковый диод, обладая p-n переходом, проводит постоянный ток только в одном направлении. Односторонняя проводимость полупроводникового диода указывается особым знаком на схемах электрической цепи (d).

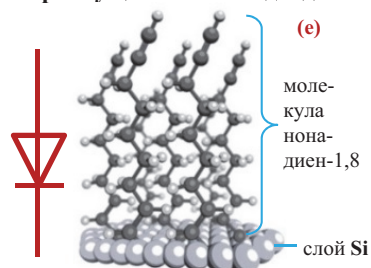
В месте соприкосновения двух полупроводниковых кристаллов p- и n-типа образуется электронно-дырочный переход (p-n переход). При этом электроны кристалла n-типа и дырки кристалла p-типа, приходя в движение, участвуют в диффузии в противоположных направлениях. В результате в области p-n перехода кристалла образуется слой, состоящий из двух разноименно заряженных слоев. Диффузия электронов и дырок прекращается, когда электрическое поле, образованное между разноименными зарядами двойного слоя ( $\vec{E}_{n-p}$ ), начинает препятствовать дальнейшему перемещению электронов из n-области в p-область, а дырок из p-области в n-область (a). При подсоединении кристалла с p-n переходом к цепи постоянного тока он хорошо проводит ток только в одном направлении. Если часть кристалла n-типа соединена с отрицательным, а часть p-типа с положительным полюсом источника тока, то под действием электрического поля источника электроны из n-зоны и дырки из p-зоны начнут двигаться в противоположных направлениях к поверхности ab. Прошедшие границу раздела электроны, замещая дырки, уменьшают толщину l слоя ab, значит, и общее электрическое сопротивление кристалла (b). Такое соединение частей кристалла полупроводника называют прямым, электрический ток через него проходит без препятствий. Если часть кристалла n-типа соединить с положительным, а часть p-типа с отрицательным полюсом источника тока, то под действием электрического поля источника электроны n-области кристалла и дырки её p-области будут двигаться в противоположных направлениях от пограничной поверхности ab. В результате толщина двуслойной части кристалла (ab) увеличивается, что приводит к увеличению и общего электрического сопротивления кристалла (c). В этом случае по цепи электрический ток, можно сказать, не проходит: возникает обратный переход.

■ Ученые университета Барселоны (Испания) в 2017 году продемонстрировали, как одна молекула, помещенная на поверхности Si, работает как полупроводниковый диод. Эта молекула, названная нонадиен-1,8, составлена из 9 атомов углерода и 12 атомов водорода ( $C_9H_{12}$ ) (e). Положительной особенностью этого самого маленького из существующих, даже по молекулярным меркам, диодов является его способность работать при комнатной температуре. Отрицательной особенностью является кратковременность его стабильной работы.

**Источник:** Albert C. Aragonès, Nadim Darwish, Simone Ciampi, Fausto Sanz, J. Justin Gooding & Ismael Díez-Pérez. Single-molecule electrical contacts on silicon electrodes under ambient conditions // Nature Communications. 2017. 8. DOI:10.C 1038 /ncomms 15056.

• На чем основан принцип работы полупроводникового диода?

• Почему ученые стараются создать диоды микро размера? В чем преимущество такого диода?



## Почему диод обладает односторонней проводимостью?

**Оборудование:** демонстрационный диод (из “набора полупроводниковых приборов”), источник постоянного тока (4-х вольтный выпрямитель), резистор, амперметр, ключ, соединительные провода.

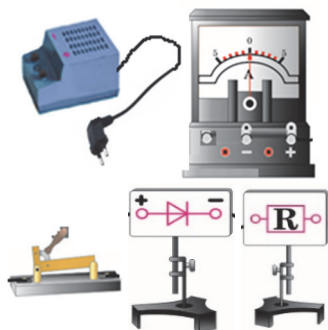
**Ход работы:** 1. Нарисуйте последовательную цепь, состоящую из источника тока, диода, резистора, амперметра и ключа.

2. Соберите цепь по этой схеме и, замкнув ключ, запишите показания амперметра.

3. Разомкните цепь, отсоедините диод и, соединив его клеммы в цепь в обратном порядке, повторите опыт.

**Обсуждение результата:**

- При каком соединении диода в цепь он проводил ток? Почему?

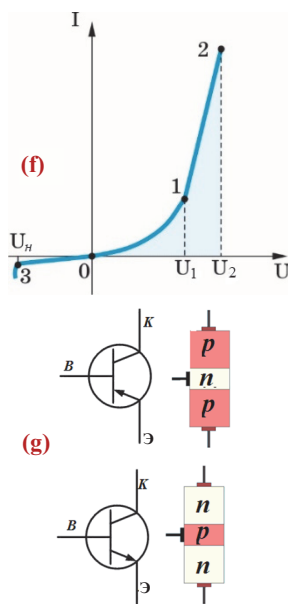


**p-n переход: полупроводниковый диод.** Односторонний переход, образованный на границе соприкосновения двух полупроводниковых кристаллов разных типов, называется **p-n переходом**.

• Полупроводниковый диод (от двух греческих слов: “ди” – два + “одос” – путь) – прибор, состоящий из одного p-n перехода и оснащенный двумя выходами для соединения к внешней электрической цепи.

Через диод ток проходит, когда на его p-область подается положительное напряжение. На ВАХ диода ясно видна разница между его прямым и обратным переходами (f). Участок графика 0–3 соответствует обратному переходу и, можно сказать, не зависит от напряжения. На участке 0–1 сила тока растет с ростом напряжения нелинейно, а на участке 1–2 – линейно. Главная задача диода заключается в выпрямлении переменного тока, основанного на односторонней проводимости p-n перехода.

**Транзистор.** Для усиления электрических колебаний и их преобразования (управления ими) используют приборы, называемые транзисторами (образовано из двух английских слов: “transfer” – нести + “resistor” – сопротивление). Другими словами, транзистор регулирует силу тока в электрической цепи аналогично тому, как обычный кран регулирует поток вытекающей из него воды. Транзистор состоит из трёх полупроводниковых слоев: крайние слои представляют собой полупроводники одинакового типа, промежуточный слой – очень тонкий слой полупроводника другого типа. Крайние слои называют, соответственно, **эмиттер** (анг. “emit” – испускать, отдавать) и **коллектор** (анг. “collect” – собирать), а средний слой называется **базой**. Существует два типа транзисторов: **pnp** и **npn**. Для подсоединения в цепь транзистор имеет три выхода, и в зависимости от типа указывается особыми символами на схеме электрической цепи (g).



К электрической цепи транзистор подключается с помощью двух источников тока. При этом переход *эмиттер-база* будет прямым, а переход *база-коллектор* обратным (**h**). Например, в транзистор типа *pnp*, усиливаемый сигнал подается на цепь эмиттера, а в цепи коллектора получается усиленный сигнал. Когда обе цепи разомкнуты, основные носители заряда в эмиттере – дырки переходят в базу. Из-за незначительной толщины базы дырки не успевают соединиться с её электронами и  $\approx 95\%$  их числа переходят в коллектор. Сила тока в цепи эмиттера ( $I_э$ ) равна сумме сил токов в базе и коллекторе:

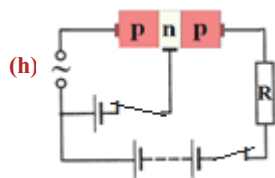
$$I_э = I_б + I_k, \quad (1)$$

в этом случае сила тока в цепи эмиттера, можно сказать, равна силе тока в цепи коллектора:

$$I_э \approx I_k. \quad (2)$$

Поэтому сила тока в цепи коллектора меняется синхронно с силой тока в цепи эмиттера. В результате на резисторе R возникает синхронно меняющееся напряжение (**см.: h**). Если при этом сопротивление окажется большим, происходит резкое увеличение ( $\approx 10^5$  раз) напряжения в цепи эмиттера. В соответствии с выражением (2) мощность на резисторе во много раз больше мощности, потраченной в цепи эмиттера.

Транзистор был изобретен в 1948 году американскими учеными Уильямом Шокли, Вальтером Браттейном и Джоном Бардиным. За эту работу они были удостоены Нобелевской премии по физике в 1956 году.



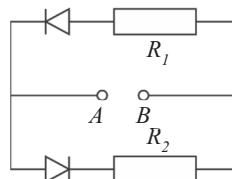
#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

#### Через какой резистор проходит электрический ток?

**Задача 1.** На рисунке показана схема цепи, состоящей из двух диодов. К точкам А и В подсоединены полюсы источника постоянного тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 2 Ом. Сопротивления резисторов равны  $R_1 = 3 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ .



- Через какой из резисторов будет протекать ток, если к точке А цепи соединен отрицательный, а к точке В положительный полюс источника тока?
- Через какой из резисторов будет протекать ток, если к точке А цепи соединен положительный, а к точке В отрицательный полюс источника тока?
- Чему будет равно общее сопротивление цепи, если к точке А соединен: положительный полюс источника? отрицательный полюс источника?
- Чему будет равна сила тока в цепи при соединении к точке А: положительного полюса источника? отрицательного полюса источника?

#### Обсуждение результата:

- Как следует соединить диод к цепи, чтобы он проводил ток? Почему?
- Как вы определили общее сопротивление цепи и силу тока в ней при соединении положительного полюса источника к точке А цепи?



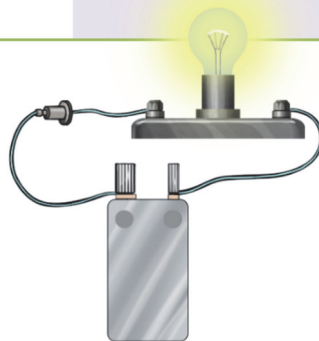
### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

**Определите знаки полюсов батарейки.**

**Оборудование:** батарейка, полупроводниковый диод, соединительные провода.

**Ход работы:** Определите знаки полюсов батарейки с помощью полупроводникового диода. Для этого сначала начертите схему цепи, а затем соберите её.

- Как с помощью диода определить знаки батарейки?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какие частицы являются носителями заряда при прямом и обратном соединении диода с <i>p-n</i> переходом?			
2	Полупроводниковый диод, источник тока и лампа соединены последовательно. Если поменять местами полюсы источника: а) как изменится сила тока в цепи, если диод неисправен? б) как изменится сила тока в цепи, если диод исправен?			
3	Сила тока в цепи эмиттера и коллектора равна соответственно 12 мА и 11,4 мА. Какой процент от силы тока в цепи эмиттера составляет сила тока в цепи базы?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе о понятиях “*p-n* переход”, “полупроводниковый диод”, “транзистор”.



## 2.9. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА:

### ПРИМЕНЕНИЕ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ (Урок-презентация)

Приблизительный план презентации:

#### **План**

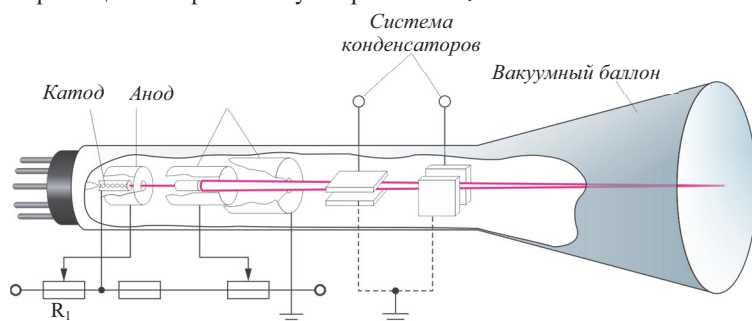
1. Введение
2. Основные части полупроводниковых устройств
3. Терморезистор
4. Фоторезистор
5. Фотодиод
6. Полупроводниковые выпрямители
7. Светодиод
8. Фототранзистор
9. Солнечная батарея
10. Интегральные схемы (чипы) и др.

Подготовьте электронную презентацию или постер-презентацию о применении полупроводников в науке, технике и производстве. С этой целью можете воспользоваться нижеприведенными электронными адресами:

#### **Электронные ресурсы:**

1. <http://elibrary.bsu.az/kitablar/1002.pdf>
2. <https://az.wikipedia.org/wiki/Yarımkeçiricilər>
3. [https://az.wikipedia.org/.../Kateqoriya:Yarımkeçirici\\_cihazlar](https://az.wikipedia.org/.../Kateqoriya:Yarımkeçirici_cihazlar)
4. [elshad777.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://elshad777.blogspot.com/p/blog-page_21.html)
5. [www.wikiwand.com/az/Kateqoriya:Yarımkeçirici\\_cihazlar](http://www.wikiwand.com/az/Kateqoriya:Yarımkeçirici_cihazlar)
6. <https://www.slideshare.net/MirNamik/yarmkec-mbm2014>
7. <https://prezi.com/upcuvgyppdko/yar-iletkenler-ve-kullanm-alarlar/>
8. <http://www.ahmetozkurt.net/TES101/ders9.pdf>
9. <http://www.elektrikport.com/haber-roportaj/nissandan-akilli-park-teknolojisine-sahip-sandalyeler/17086#ad-image-0>
10. <http://slideplayer.biz.tr/slide/2701879/>
11. <http://engelliler.gen.tr/f61/yari-iletkenler-16935/>
12. [http://studbooks.net/755598/pedagogika/poluprovodniki\\_sovremennom\\_mire](http://studbooks.net/755598/pedagogika/poluprovodniki_sovremennom_mire)
13. <http://worldofschool.ru/fizika/kondens/tv-tela/p-provodnik/poluprovodniki-v-nashej-zhizni-primenenie-poluprovodnikov-kratko>

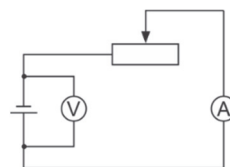
- 2.1. Сила тока в цепи лампы карманного фонаря равна 0,24 А. Сколько электронов проходит через поперечное сечение спирали лампы в течение 5 минут ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ )?
- 2.2. Определите скорость упорядоченного движения электронов в проводнике площадью поперечного сечения  $4 \text{ мм}^2$ , силой тока 6 А и концентрацией свободных электронов  $6 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ).
- 2.3. При какой температуре сопротивление провода из серебра в 4 раза меньше его сопротивления при  $0^\circ \text{C}$  ( $\alpha_{\text{Ag}} = 0,004 \text{ K}^{-1}$ )?
- 2.4. Почему спираль накаливания лампы перегорает при замыкании включателя цепи?
- 2.5. Как изменится яркость светящегося пятна на экране электронно-лучевой трубки при перемещении вправо ползунка реостата  $R_1$ ?



- 2.6. Искровой разряд между электродами выпрямителя высокого напряжения “Разряд-1” возник при расстоянии между ними, равном 8 мм. Чему равно напряжение между электродами в этот момент?

**Примечание:** при атмосферном давлении, когда напряженность электрического поля между электродами равна  $3000 \frac{\text{В}}{\text{мм}}$ , возникает “прокол”, вызывающий искровой разряд в воздухе.

- 2.7. Молния наблюдалась при разности потенциалов между поверхностью Земли и облаком в  $1,2 \cdot 10^6 \text{ кВ}$ . Чему было равно расстояние между облаком и поверхностью Земли?
- 2.8. Сила тока в электрической цепи, состоящей из источника тока с ЭДС, равной 3 В, и проводника сопротивлением 6 Ом, равна 0,4 А. Определите внутреннее сопротивление источника и силу тока короткого замыкания.
- 2.9. Электрическая цепь состоит из источника тока с внутренним сопротивлением 2 Ом и ЭДС 2 В, реостата с максимальным сопротивлением 8 Ом, амперметра и вольтметра. Определите:
  - а) максимально возможное значение силы тока;
  - б) минимально возможное значение силы тока;
  - в) максимально возможное значение напряжения;
  - г) минимально возможное значение напряжения.

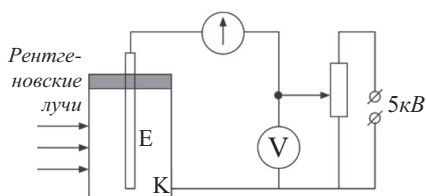


- 2.10. Ион какого химического элемента в электролите обладает электрическим зарядом  $e$ ,  $2e$  и  $3e$ ?

Химический элемент	Валентность	Электрохимический эквивалент, $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$	Молярная масса, $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
Ag	1	1,1	108
Al	3	0,093	27
Au	3	0,69	199
Cu	2	0,33	64
Fe	3	0,19	57

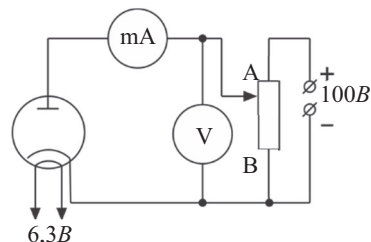
- 2.11. Масса какого вещества, выделившегося на электроде при электролизе, будет больше, если время протекания процесса и сила тока в цепи будут одинаковы (вещества из таблицы, данной в задании 2.10)?

- 2.12. На рисунке изображена ионизирующая металлическая камера. Камера, оснащенная электродом, заполнена газом, плотно закрыта и подключена к электрической цепи. Как изменится сила тока насыщения в цепи устройства, если повышением интенсивности рентгеновского излучения увеличить в 2 раза ионизацию газа?



- 2.13. Как изменятся показания миллиамперметра и вольтметра, если в цепи, к которой подключен вакуумный диод, ползунок потенциометра перевести скольжением из точки А в точку В?

**Примечание:** потенциометр – устройство для регулирования напряжения в цепи.

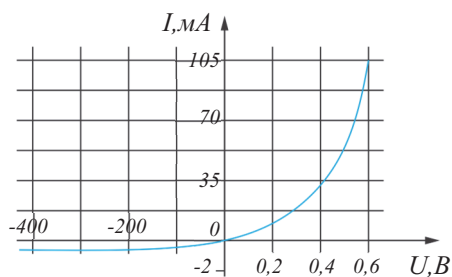


- 2.14. В полупроводнике направление электрического тока совпадает с направлением тока, создаваемые упорядоченным движением электронов и дырок. Однако, учитывая, что электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, как бы вы объясняли одинаковое направление электрического тока?

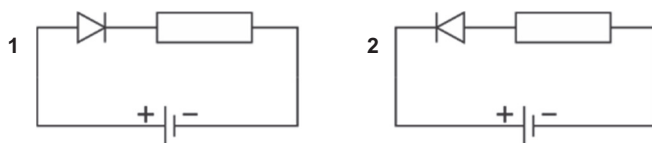
- 2.15. Какой тип полупроводника (**n-типа** или **p-типа**) получится при добавлении к кремнию в виде примеси: индия, сурьмы (олова), фосфора, скандия и галлия? Воспользуйтесь таблицей Менделеева.

2.16. На рисунке изображена ВАХ диода. Чему равна сила тока в диоде:

- при  $U_{nn} = 0,4 \text{ В}$  (в режиме прямого перехода)?
- при  $U_{on} = -400 \text{ В}$  (в режиме обратного перехода)?



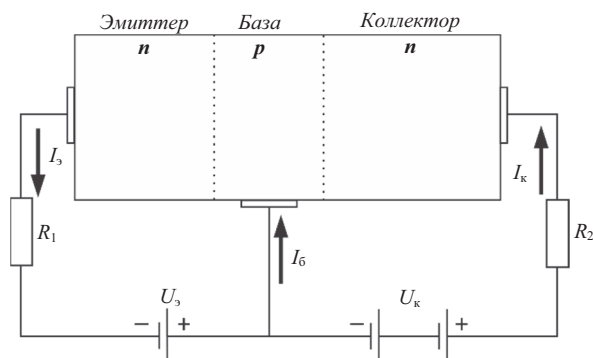
2.17. По какой цепи протекает электрический ток? Почему?



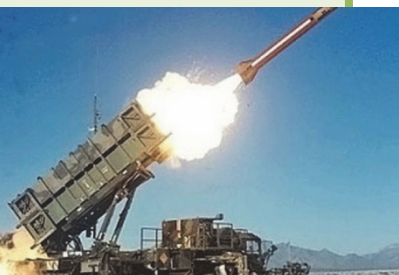
2.18. В каком полупроводнике концентрация носителей заряда больше: в полупроводнике с собственной проводимостью или в полупроводнике с примесной проводимостью?

2.19. Как меняется толщина контактного слоя диода при прямом и обратном соединении?

2.20. Каково соотношение между электрическими напряжениями и мощностями на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ , соединенных в цепь с транзистором?



## • ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



- Зенитно-ракетные комплексы “Patriot” (США) и “С-400” (РФ) считаются самыми усовершенствованными системами обороны против воздушных атак врага. С помощью электромагнитных волн, излучаемых радарными системами, осуществляется очень точное определение координат любой летающей в воздухе цели, способной представлять опасность для территории страны и при необходимости – её моментальное уничтожение точным ракетным ударом.

- **Что представляет собой электромагнитная волна?**
- **Как с помощью электромагнитных волн определяются точные координаты цели?**

- Самой большой плотиной в мире является плотина ГЭС “Три ущелья”, построенная на реке Янцзы в Китае. Станция имеет 32 генератора мощностью 700 МВт каждый, что в общем составляет 22 400 МВт. Для сравнения – общая мощность 6 генераторов Мингячевирской ГЭС равна 420 МВт.

- **На чем основан принцип работы генератора ГЭС?**

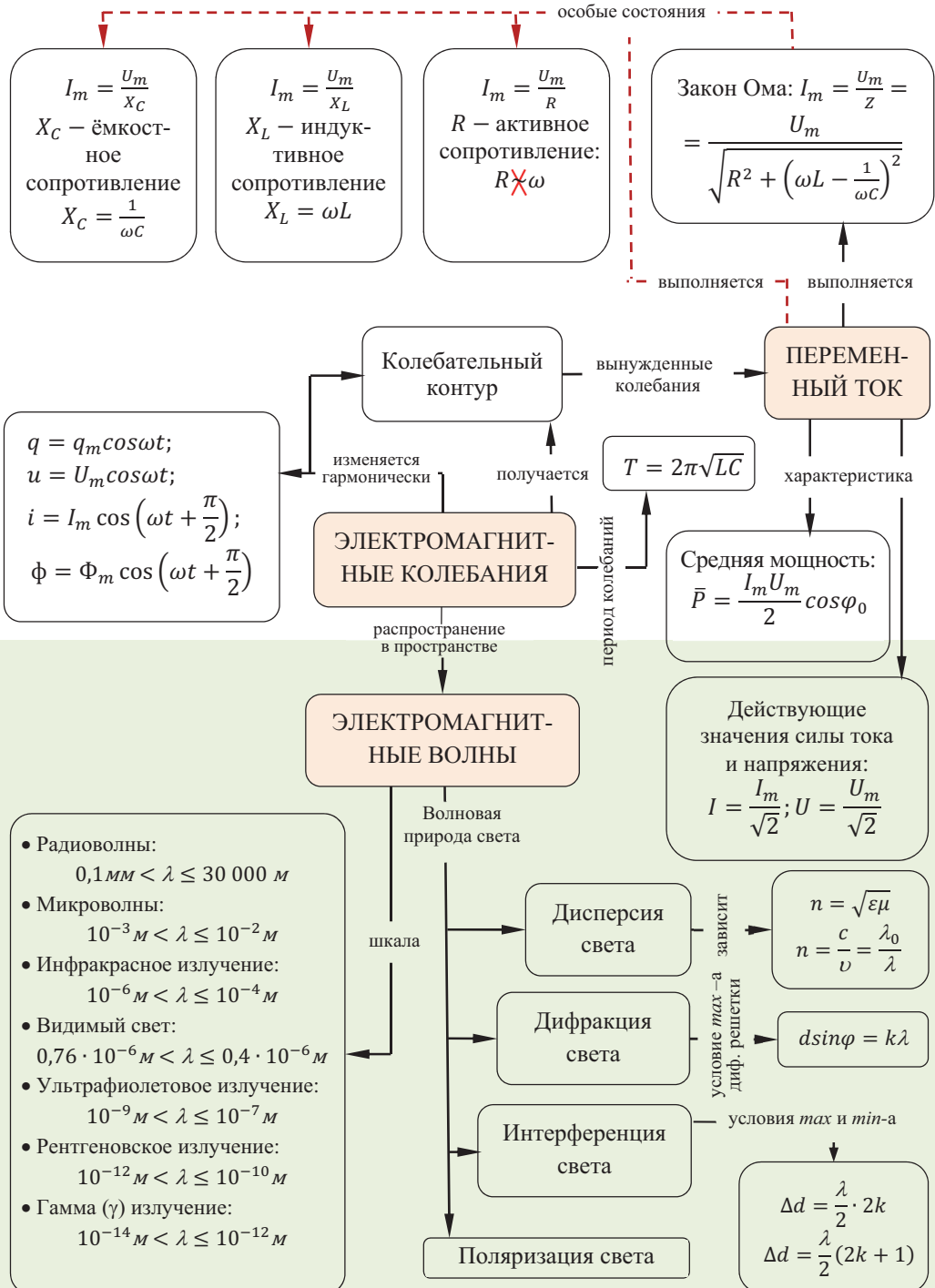


- **Поляризационный фильтр (поляроид, или светофильтр)** – очень полезный аксессуар фотоаппаратов и кинокамер. Он настолько важен для фотографов-пейзажистов, что они не снимают его с объектива фотоаппарата. Поляроид уменьшает отблески отраженного от гладких поверхностей света, обеспечивая этим прозрачность воды, стекла и др.

- **Что такое поляроид?**
- **Как он обеспечивает четкую видимость пейзажей?**



## “Карта понятий” главы



### 3.1. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

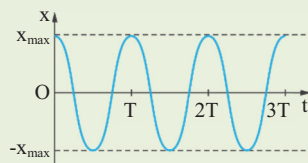
#### Физика – 7 и 10

- Механическое колебательное движение – перемещение тела или системы тел в противоположных направлениях около положения устойчивого равновесия.

- Периодическое колебательное движение – это движение тела или системы тел, повторяющееся через равные промежутки времени.
- Свободные колебания – это колебания, происходящие в замкнутой системе под действием внутренних консервативных сил.

- Гармоническое колебание – это свободное колебание системы, в процессе которого величины, характеризующие движение, изменяются по закону синуса или косинуса.

На рисунке изображен график изменения координаты тела по закону косинуса:  $x = x_{\max} \cos \omega t$ .



- Амплитуда – максимальное отклонение колеблющегося тела от положения устойчивого равновесия.

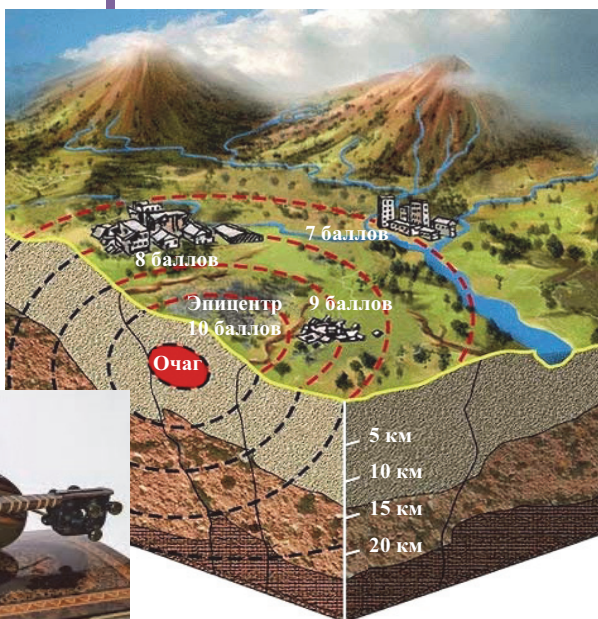
- Частота колебаний – физическая величина, равная числу колебаний за 1 секунду:  $\nu = \frac{N}{t}$ .
- Период колебаний – время, затраченное на одно полное колебание:  $T = \frac{t}{N}$ .

Частота и период колебаний – величины, обратные друг другу:  $T = \frac{1}{\nu}$ , или  $\nu = \frac{1}{T}$ .

- Циклическая частота – физическая величина, в  $2\pi$  раз большая частоты колебаний, равная числу колебаний за  $\approx 6,28$  секунды ( $2\pi \approx 6,28$ ):  $\omega = 2\pi\nu$ .

- – Землетрясение, звучание струн тара и кяманчи, звук бубна, излучение Солнца, рентгеновское излучение и др. – совершенно отличающиеся физические процессы. Но их объединяет общий признак.

#### • Что это за признак?





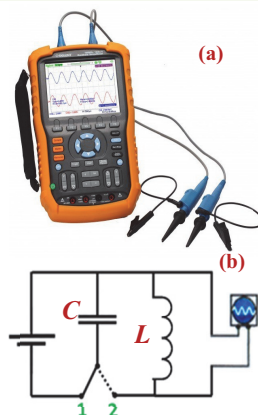
## ИССЛЕДОВАНИЕ 1

### Что происходит в цепи, содержащей заряженный конденсатор и катушку?

**Оборудование:** источник постоянного тока, цифровой осциллограф SIGLENT SHS1102, конденсатор (100 мкФ), катушка, двухполюсный ключ, соединительные провода.

**Описание прибора.** Осциллограф (лат. “oscillo” – качаюсь + греч. “graf” – пишу) – устройство, позволяющее наблюдать, записывать и измерять колебания зависящих от времени параметров электрических сигналов, подаваемых на его вход (а).

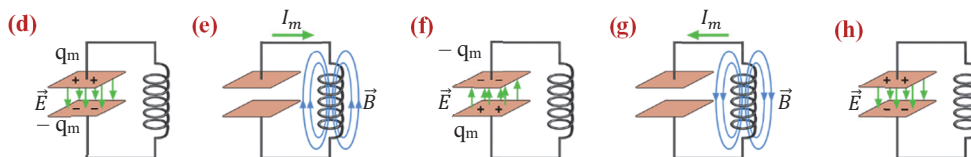
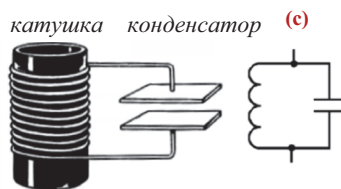
**Ход работы:** 1. Соберите электрическую цепь на основе показанной схемы (б). 2. Замкните ключ на позиции 1 и зарядите конденсатор. 3. Переведя ключ в положение 2, соедините конденсатор с катушкой и следите за экраном осциллографа.



### Обсуждение результата:

- Что наблюдалось на экране осциллографа при подсоединении заряженного конденсатора к катушке?
- К какому выводу можно прийти после выполнения опыта: что происходит в цепи, состоящей из заряженного конденсатора и катушки?

Обратимся к простой электрической цепи (с), содержащей конденсатор ёмкостью  $C$  и катушку индуктивностью  $L$ . Такую цепь называют **LC-контуром**. Если в LC-контуре зарядить конденсатор, то он сразу начинает разряжаться, а в катушке возникает ток. В результате происходящей самоиндукции сила тока в катушке постепенно растет и после полной разрядки конденсатора достигает максимального значения (d и e). Однако этот ток, сохранивший своё направление в результате самоиндукции, начинает снова заряжать конденсатор, и сила тока постепенно уменьшается. В момент, когда пластины конденсатора заряжаются зарядами, равными начальному значению, но противоположного знака, сила тока становится равной нулю (f). Перезарядка конденсатора через катушку периодически повторяется (g и h).



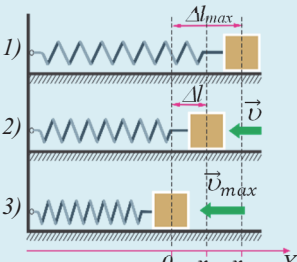
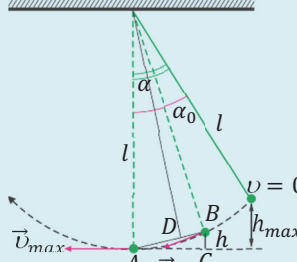
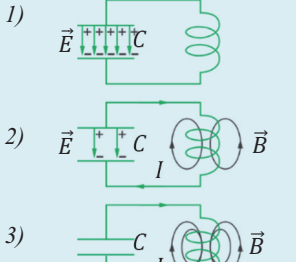
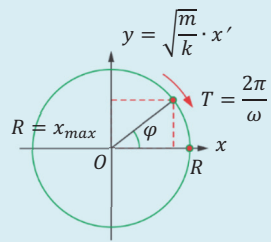
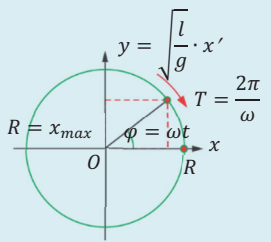
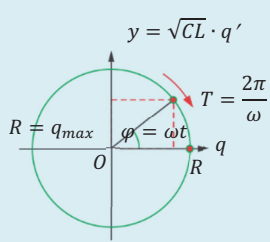
Таким образом, в LC-контуре происходят периодические изменения электрического и магнитного полей, т.е. характеризующих их величин – электрического заряда, силы тока и напряжения. В этом случае говорят, что в идеальном LC-контуре созданы **свободные электромагнитные колебания**. Поэтому обычно такой LC-контур называют **идеальным колебательным контуром** (контур, в котором не происходит потери энергии).

- Свободные электромагнитные колебания – это периодические изменения электрического и магнитного полей и характеризующих их величин – электрического

заряда, силы тока, напряжения и др., происходящие в колебательном контуре без поступления в него энергии от посторонних источников.

Несмотря на различие в происхождении механических и электромагнитных колебаний, они характеризуют единое свойство материи, заключающееся в периодичности происходящих процессов, вследствие этого подчиняются общим закономерностям – они описываются похожими уравнениями. Поэтому удобно (выгодно) исследовать электромагнитные колебания в аналогии с механическими, например, колебаниями пружинного и математического маятников (**таблица 3.1.**).

**Таблица 3.1.**

Механические колебания в пружинном маятнике	Механические колебания в математическом маятнике	Электромагнитные колебания в LC-контуре
1	2	3
		
<p>Согласно закону сохранения энергии:</p> $\frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}$ <p>После упрощений получится:</p> $x^2 + \frac{m}{k} \cdot v^2 = x_m^2$	<p>Согласно закону сохранения энергии:</p> $mgh + \frac{mv^2}{2} = mgh_m$ <p>После упрощений получится:</p> $x^2 + \frac{l}{g} \cdot v^2 = x_m^2$	<p>Согласно закону сохранения энергии:</p> $\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$ <p>После упрощений получится:</p> $q^2 + CL \cdot I^2 = q_m^2$
<p>Если учесть, что <math>v = x'</math>:</p> $x^2 + \left( \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot x' \right)^2 = x_m^2$	<p>Если учесть, что <math>v = x'</math>:</p> $x^2 + \left( \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot x' \right)^2 = x_m^2$	<p>Если учесть, что <math>I = q'</math>:</p> $q^2 + (\sqrt{CL} \cdot q')^2 = q_m^2$
 <p>Согласно формуле окружности:</p> $x^2 + y^2 = R^2$ $x = x_m \cos \omega t; \varphi_0 = 0$	 <p>Согласно формуле окружности:</p> $x^2 + y^2 = R^2$ $x = x_m \cos \omega t; \varphi_0 = 0$	 <p>Согласно формуле окружности:</p> $q^2 + y^2 = R^2$ $q = q_m \cos \omega t; \varphi_0 = 0$

Продолжение **таблицы 3.1.**

1	2	3
$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \rightarrow x^2 + \left(\sqrt{\frac{m}{k}} \cdot x'\right)^2 = x_m^2 \rightarrow y = \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot x' \\ x^2 + y^2 = R^2 \rightarrow x^2 + \left(\sqrt{\frac{l}{g}} \cdot x'\right)^2 = x_m^2 \rightarrow y = \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot x' \\ x^2 + y^2 = R^2 \rightarrow q^2 + (\sqrt{LC} \cdot q')^2 = q_m^2 \rightarrow y = \sqrt{LC} \cdot q' \end{cases}$		
<p>Циклическая частота пружинного маятника:</p> $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$ $x = x_m \cos \omega t,$ $\varphi_0 = 0,$ $v = x' = -\omega x_m \sin \omega t,$ $a = v' = -\omega^2 x_m \cos \omega t$ $v_m = \omega x_m,$ $a_m = \omega^2 x_m.$	<p>Циклическая частота математического маятника:</p> $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}},$ $x = x_m \cos \omega t,$ $\varphi_0 = 0,$ $v = x' = -\omega x_m \sin \omega t,$ $a = v' = -\omega^2 x_m \cos \omega t$ $v_m = \omega x_m,$ $a_m = \omega^2 x_m.$	<p>Циклическая частота колебательного контура:</p> $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$ $q = q_m \cos \omega t,$ $\varphi_0 = 0,$ $I = q' = -\omega q_m \sin \omega t,$ $I' = q'' = -\omega^2 q_m \cos \omega t$ $I_m = \omega q_m.$
<p>Период и частота колебаний пружинного маятника зависят от:</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}};$ $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$	<p>Период и частота колебаний математического маятника зависят от:</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}};$ $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$	<p>Период и частота электромагнитных колебаний зависят от:</p> $T = 2\pi \sqrt{LC};$ $\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}.$
<p>The graph shows three sinusoidal functions plotted against time <math>t</math>. The vertical axis is labeled with <math>x; v; a;</math> and <math>q; I; I'</math>. The horizontal axis is labeled <math>t</math> and has markers for <math>\frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi, \frac{5\pi}{2}</math> and <math>\frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}, T, \frac{5T}{4}</math>. The functions are: <math>x = x_{max} \cos \omega t</math> (red curve, starting at <math>x_{max}</math>), <math>v = -\omega x_{max} \sin \omega t</math> (green curve, starting at 0), and <math>a = -\omega^2 x_{max} \cos \omega t</math> (blue curve, starting at <math>-a_{max}</math>). The same set of curves is repeated for the mathematical pendulum and the LC circuit, with <math>q</math> and <math>I</math> instead of <math>x</math> and <math>v</math>.</p>		

**Определите характеристики электромагнитных колебаний.**

**Задача.** Максимальное значение заряда конденсатора при электромагнитных колебаниях равно 1,5 мкКл, а максимальное значение силы тока 7,5 мА. Определите:

- циклическую частоту колебаний;
- период колебаний;
- ёмкость конденсатора, если индуктивность катушки 4 мГн;
- максимальное значение силы тока, если максимальное значение заряда 12 мкКл ( $\pi = 3$ ).

**Обсуждение результата:**

- С помощью какой формулы вы определили максимальное значение силы тока ( $I_{max}$ ), зная, согласно условию задачи, значения циклической частоты ( $\omega$ ), периода колебаний ( $T$ ), ёмкости конденсатора ( $C$ ) и максимального заряда ( $q_{max}$ )?

**■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

Космос можно считать идеальным вакуумом. Это значит, что если вы окажетесь в открытом космосе, то, предположительно, вы не будете слышать никаких звуков.

**• Почему предполагается, что в космосе полная тишина?**

Однако космическими спутниками NASA были приняты какие-то звуки из космоса, похожие на звуки из фильмов ужасов, и отправлены обратно.

**• Что распространяет в космическом вакууме звуки, рожденные в космическом пространстве?****■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

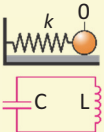
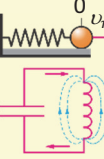
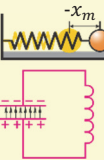
№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какие колебания в колебательном контуре называются свободными?			
2	От каких физических величин зависит период электромагнитных колебаний?			
3	По какому закону меняются со временем электрический заряд конденсатора колебательного контура и проходящий через его катушку электрический ток?			
4	Возникнут ли в LC-контуре электромагнитные колебания, если катушку в нем заменить резистором?			
5	Являются ли электромагнитные колебания, возникающие в идеальном колебательном контуре, затухающими или нет? Почему?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте и занесите в рабочий листок карту понятия “Электромагнитные колебания”.

### 3.2. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ (Урок-презентация)

Подготовьте электронную презентацию по теме “Превращения энергии при электромагнитных колебаниях”. С этой целью вы можете воспользоваться аналогией превращений энергии при механических колебаниях пружинного маятника (**таблица 3.2**).

**Таблица 3.2.**

	<p>Пружинный маятник покоится. Механическая энергия пружинного маятника в состоянии покоя равна нулю. Конденсатор не заряжен. Энергия электрического и магнитного полей в контуре равна нулю.</p>
<p> <math>v = 0</math>  <math>x = x_m</math>  <math>W_{\Pi} = \frac{kx_m^2}{2}</math>  <math>W_K = 0</math> </p> <p><b><math>t = 0</math></b></p>  <p> <math>i = 0</math>  <math>q = q_m</math>  <math>W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}</math>  <math>W_{\text{м}} = 0</math> </p>	<p>В момент времени <math>t = 0</math>, сжимая пружину, шарiku сообщается запас потенциальной энергии. Конденсатор заряжается. Между его обкладками возникает электрическое поле, обладающее запасом электрической энергии.</p>
<p> <math>x = 0</math>  <math>v = v_m</math>  <math>W_{\Pi} = 0</math>  <math>W_K = \frac{mv_m^2}{2}</math> </p> <p><b><math>t = \frac{1}{4}T</math></b></p>  <p> <math>q = 0</math>  <math>i = I_m</math>  <math>W_{\text{э}} = 0</math>  <math>W_{\text{м}} = \frac{LI_m^2}{2}</math> </p>	<p>Сжатую пружину отпускают. Под действием силы упругости шарик с увеличивающейся скоростью движется к положению равновесия. В момент времени <math>t = \frac{1}{4}T</math> пружина оказывается в положении равновесия, вся потенциальная энергия шарика превращается в кинетическую. Конденсатор разряжается. В катушке возникает электрический ток. В момент времени <math>t = \frac{1}{4}T</math> конденсатор полностью разряжается, энергия его электрического поля превращается в энергию магнитного поля катушки.</p>
<p> <math>x = -x_m</math>  <math>v = 0</math>  <math>W_{\Pi} = \frac{kx_m^2}{2}</math>  <math>W_K = 0</math> </p> <p><b><math>t = \frac{1}{4}T</math></b></p>  <p> <math>q = -q_m</math>  <math>i = 0</math>  <math>W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}</math>  <math>W_{\text{м}} = 0</math> </p>	<p>Пружинный маятник по инерции проходит положение равновесия и в момент времени <math>t = \frac{1}{2}T</math> достигает крайнего правого положения. Кинетическая энергия шарика превращается в потенциальную энергию пружины. В момент времени <math>t = \frac{1}{2}T</math> в результате изменения (уменьшения) магнитного поля конденсатор снова заряжается. Энергия магнитного поля катушки превращается в энергию электрического поля конденсатора.</p>

Продолжение **таблицы 3.2.**

$x = 0$ $v = -v_m$ $t = \frac{3}{4}T$ $q = 0$ $i = -I_m$  $W_{\Pi} = 0$ $W_{\text{к}} = \frac{mv_m^2}{2}$ $W_{\text{э}} = 0$ $W_{\text{м}} = \frac{LI_m^2}{2}$	<p>Пружинный маятник движется влево.</p> <p>В момент времени <math>t = \frac{3}{4}T</math> потенциальная энергия пружины превращается в кинетическую энергию шарика. Соответственно конденсатор разряжается. Ток разрядки создает магнитное поле в катушке. В этом случае ток течет в противоположном направлении. Энергия электрического поля контура превращается в энергию магнитного поля.</p>
$x = x_m$ $v = 0$ $t = T$ $q = q_m$ $i = 0$  $W_{\Pi} = \frac{kx_m^2}{2}$ $W_{\text{к}} = 0$ $W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_{\text{м}} = 0$	<p>В момент времени <math>t = T</math> пружина маятника сжимается до крайнего левого положения. Кинетическая энергия шарика превращается в потенциальную энергию пружины. Конденсатор заряжается как в момент времени <math>t = 0</math>. Энергия магнитного поля катушки превращается в энергию электрического поля конденсатора.</p>

Полная энергия идеального колебательного контура в произвольный момент времени равна сумме энергий электрического и магнитного полей:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} \cdot \cos^2 \omega t + \frac{LI_{\text{max}}^2}{2} \cdot \sin^2 \omega t.$$

Однако в реальных колебательных контурах потребители обладают электрическим сопротивлением и поэтому потери энергии на его преодоление неизбежны. Это значит, что в реальном контуре энергия электрического поля не может полностью превратиться в энергию магнитного поля, некоторая его часть выделяется в виде тепла. Поэтому свободные электромагнитные колебания в реальном контуре являются затухающими.

Составьте план презентации, используя аналогию колебаний.





### 3.3. ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ: ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 11

● *Электрический ток, в котором сила тока не меняет свое численное значение и направление, называется **постоянным***. Источниками постоянного тока являются электрофорная машина, различные виды батарей (гальванический элемент), аккумулятор, солнечная батарея и используемый в физической лаборатории выпрямитель тока. Через поверхность  $S$ , ограниченную замкнутым контуром (рамкой), помещенным в однородное магнитное поле, проходит поток магнитной индукции.

● Поток магнитной индукции ( $\Phi$ ) – скалярная физическая величина, численно равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади контура, помещенного в это магнитное поле, и косинуса угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади контура:  $\Phi = BScos\alpha$ .

● Возникновение электрического тока в проводящем контуре в результате изменений магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную этим контуром, называют явлением **электромагнитной индукции**.

● ЭДС индукции, возникающая в замкнутом проводящем контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного

потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром:  $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Сила индукционного тока, возникающая в замкнутом проводящем контуре, согласно закону Ома для замкнутой цепи равна:  $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

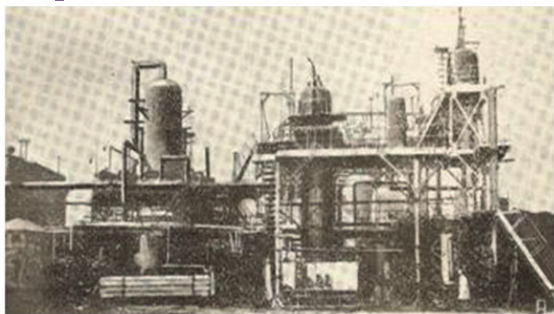
● Возникновение ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре в результате изменений силы тока в нем, называют явлением **самоиндукции**.

При увеличении силы тока в замкнутом контуре от нуля до некоторого значения магнитный поток, пронизывающий этот контур, тоже увеличивается. В результате возникающая ЭДС самоиндукции создает в контуре электрический ток, направленный против протекающего по нему основного тока.



■ Впервые в Европе в начале XX века в Баку были введены в эксплуатацию две электростанции, производящие и передающие переменный ток в промышленном масштабе: Бибиэбатская электрическая станция (1901) и Белгородская (ныне Акшехер) электростанция (1902). В марте 1906 года началась передача электроэнергии Балаханскому нефтяному месторождению, находящемуся на расстоянии 8,5 км от Белгородской электростанции. Для сравнения приведем даты использования электроэнергии в крупных городах Европы: Хельсинки – в 1940 году; Стокгольм – в 1960 году. В США перевод всей страны на использование переменного тока завершился только в 2007 году.

- В чем отличие переменного тока от постоянного?
- Как получается переменный ток?



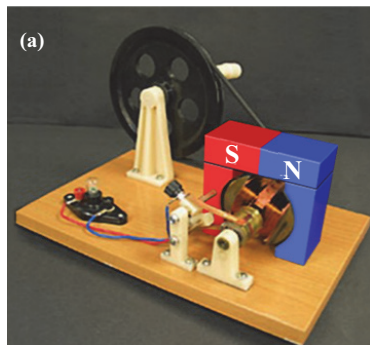
“Установка по термохимическому смягчению морской воды”, впервые в мире построенная в Баку для парового котла электростанции. Баку, 1902 г.

**Оборудование:** модель генератора, снабженная лампой.

**Ход работы:** вращайте вал генератора с постоянной скоростью, одновременно наблюдая за свечением лампы **(а)**.

**Обсуждение результата:**

- Что необычное наблюдалось в свечении лампы, несмотря на равномерное вращение вала генератора?
- Какие предположения можно выдвинуть, проделав опыт?



**Вынужденные электромагнитные колебания.** Вы выяснили, что в реальном колебательном контуре электромагнитные колебания всегда являются затухающими. Чтобы они были незатухающими, необходимо периодически сообщать энергию колебательному контуру. С этой целью к колебательному контуру последовательно подсоединяют источник **(b)**, ЭДС которого меняется по гармоническому закону, например, по закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (1)$$

На схеме электрической цепи источник переменного тока обозначают символом " $\sim$ ". В выражении (1)  $\varepsilon_m$  – максимальное (амплитудное) значение ЭДС,  $\omega$  – циклическая частота изменения ЭДС. Под действием источника с изменяющейся ЭДС в LC-контуре возникают вынужденные электромагнитные колебания.

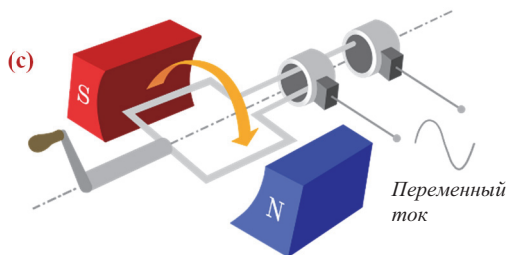
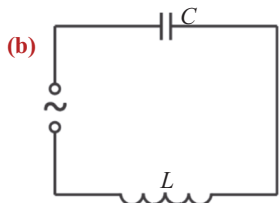
• *Вынужденные электромагнитные колебания – изменения электрического заряда, силы тока и напряжения, возникающие в контуре под действием переменной ЭДС внешнего источника тока с частотой, равной циклической частоте  $\omega$ .*

Вынужденные электромагнитные колебания можно рассматривать как переменный ток, проходящий через контур, содержащий резистор, конденсатор и катушку.

• *Переменный ток – это ток, направление и характеризующие параметры которого периодически меняются со временем.*

Переменный ток приводит в движение электрические двигатели на заводах и фабриках, используется в быту в осветительных системах и приводит в действие почти все электрические приборы и др.

**Получение переменного тока.** Устройство, производящее переменный ток, называется *генератором переменного тока*, или *индукционным генератором*. Принцип работы генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Самая простая модель такого генератора состоит из проводящего контура, вращающегося в однородном магнитном поле **(c)**.



При вращении с циклической частотой  $\omega$  проводящего контура в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  магнитный поток, проходящий через контур, меняется по гармоническому закону:

$$\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t. \quad (2)$$

Согласно закону электромагнитной индукции, в контуре возникает ЭДС, меняющаяся по периодическому закону:

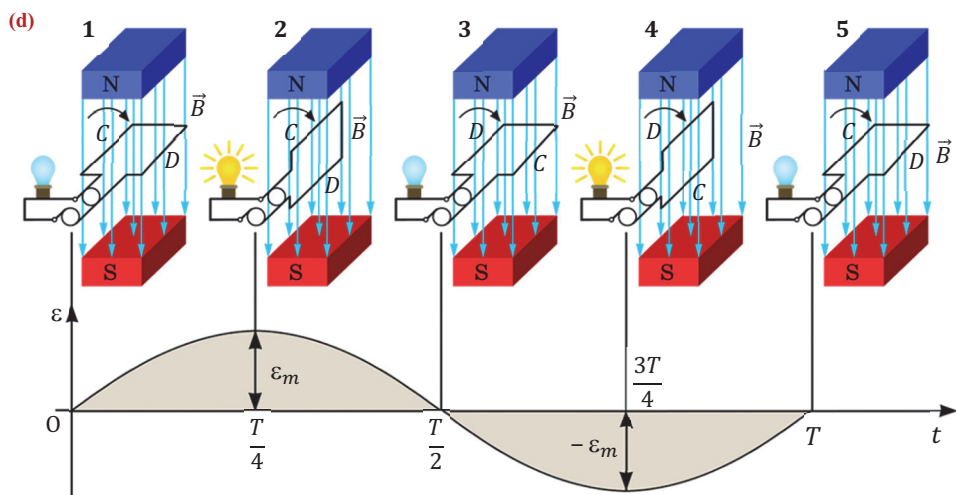
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t) = -(\Phi_m \cos \omega t)' = \Phi_m \omega \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

В результате на полюсах источника возникает напряжение, меняющееся по закону синуса:

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (3)$$

Если к полюсам контура генератора подсоединить потребитель, например, лампу, то через нее будет проходить меняющийся по гармоническому закону индукционный ток – лампа периодически будет то ярко загораться, то гаснуть **(d)**:

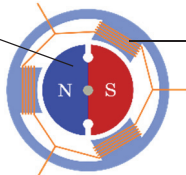
$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (4)$$



В выражениях (2), (3) и (4) символы  $\Phi$ ,  $u$ ,  $i$  – мгновенные значения соответственно магнитного потока, напряжения и силы тока, а символы  $\Phi_m$ ,  $U_m$  и  $I_m$  – максимальные (амплитудные) значения соответствующих величин,  $\varphi_0$  – разность фаз между напряжением и силой тока.

Генераторы переменного тока бывают различной конструкции. Обычно они состоят либо из катушки (ротора) с большим числом витков, способной вращаться в магнитном поле неподвижного постоянного магнита (статора), либо, наоборот, из двухполюсного магнита (ротора), способного вращаться внутри неподвижной катушки (статора). На тепловых электростанциях используются генераторы, состоящие из двухполюсных магнитных роторов **(e)**.

**(e)** **Ротор** – вращающаяся часть генератора, состоит из постоянного магнита или электромагнита.



**Статор** – неподвижная часть генератора, состоит из проводящих витков.

Вращаясь с частотой  $3000 \frac{\text{оборот}}{\text{мин}} \left( 50 \frac{\text{оборот}}{\text{с}} \right)$ , такой ротор 50 раз в секунду меняет полюсы магнита. В результате в генераторе создается ток, изменяющийся с частотой 50 Гц. Однако используемые на гидроэлектростанциях (ГЭС) гидрогенераторы невозможно вращать с такой частотой. Поэтому гидрогенераторы снабжаются не двухполюсными, а многополюсными роторами. В результате в медленно вращающемся генераторе с многополюсным ротором можно получить электрический ток, изменяющийся с высокой частотой **(f)**.



Гидрогенераторы ГЭС (фрагмент)

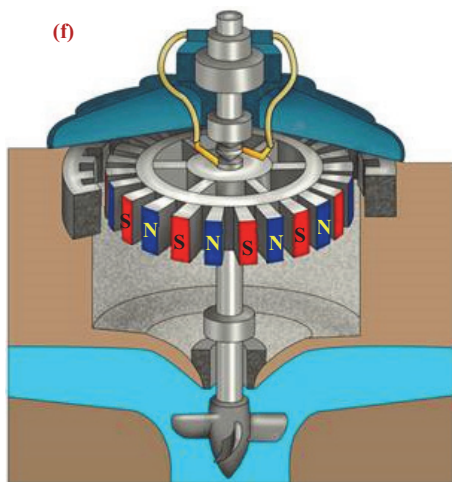


Схема гидрогенератора

**Другие величины, характеризующие переменный ток.** При прохождении электрического тока по проводнику происходит процесс частичного превращения электрической энергии во внутреннюю, в результате проводник нагревается. В цепи переменного тока, несмотря на периодические изменения мгновенного значения мощности, среднее значение мощности остается постоянным в любом периоде:

$$\bar{P} = \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cdot \cos \varphi_0. \quad (5)$$

Здесь  $\cos \varphi_0$  является коэффициентом мощности и показывает, какая часть электрической энергии бесповоротно превратилась в механическую, или внутреннюю энергию. Выражение (5) можно записать и таким образом:

$$\bar{P} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi_0 = IU \cos \varphi_0. \quad (6)$$

Отношения  $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$  и  $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$  называют соответственно действующими значениями силы переменного тока и его напряжения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{в} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

• Действующее значение силы тока равно силе такого постоянного тока, который выделяет в нем за равное время такое же количество тепла, что и переменный ток.

- Амперметр и вольтметр, используемые в цепи переменного тока, измеряют действующие значения силы тока и напряжения.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2

**Объясните получение переменного тока в замкнутом контуре.**

**Задача.** Объясните согласно приведенной схеме (d) возникновение переменного индукционного тока в контуре, вращающемся в однородном магнитном поле.

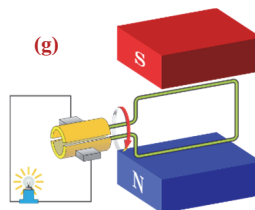
**Обсуждение результата:**

- При каком положении вращающегося в однородном магнитном поле контура сила возникшего индукционного тока принимает максимальное значение? Почему?
- Что вы можете сказать о направлении индукционного тока, протекающего по сторонам контура C и D в его положениях 2 и 4?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

На рисунке приведена схема генератора постоянного тока (g). Сравните ее с упрощенной схемой генератора переменного тока (c или d).

- В чем разница между строением (конструкцией) этих генераторов?
- Как получается, что в одном из генераторов возникает постоянный, а в другом переменный ток?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Как обеспечивается получение незатухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре?			
2	Каким опытом можно смоделировать работу генератора переменного тока?			
3	ЭДС меняется по закону $\varepsilon = 120 \sin 80\pi t$ . Определите период, частоту и амплитудное значение ЭДС.			
4	На основе данного графика определите: а) амплитудное значение колебаний напряжения; б) период и частоту колебаний; в) уравнение зависимости напряжения от времени.			
5	Сила тока в осветительной сети равна 10 А. Чему равно амплитудное значение силы тока?			

### ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?

В рабочих листах составьте карту понятия “переменный ток”.

**Проект. “Война токов”.** Используя электронные ресурсы, подготовьте реферат о продолжавшемся 100 лет противостоянии между двумя американскими изобретателями и их изобретениями: “Производство и эксплуатация постоянного тока” Томаса Эдисона и “Производство и эксплуатация переменного тока” Николы Теслы.

### 3.4. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОДЕРЖАЩИЕ РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР И КАТУШКУ

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8 и 11

В микросхемах используют различные резисторы.

Связь между силой тока на участке цепи, напряжением на его концах и сопротивлением участка определяется

законом Ома:  $I = \frac{U}{R}$ .

Здесь  $R$  – сопротивление участка (проводника).

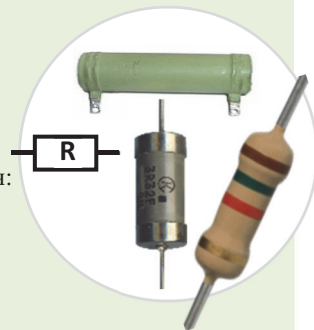
Сопротивление проводника зависит от его геометрических размеров и материала, из которого изготовлен:

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

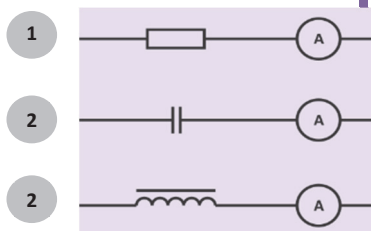
- Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока в нем на напряжение на его концах и на время прохождения тока:  $A = IUt$ .

- Мощность электрического тока равна отношению работы тока ко времени, за которое эта работа совершена:

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



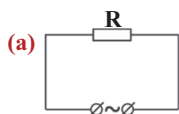
- Изображенные на рисунке участки 1, 2 и 3 соединены последовательно в цепь с одним и тем же источником переменного тока. Стало известно, что сила тока на участке с конденсатором имеет большее значение.



- Почему сила переменного тока на участке с конденсатором относительно больше, чем на участке с катушкой?
- Чем оборачивается большое значение сопротивления резистора в цепи переменного тока?

#### Активное сопротивление в цепи переменного тока.

Резистор в цепи переменного тока, сопротивление которого определяется выражением  $R = \rho \frac{l}{S}$ , называется *активным сопротивлением*. В электрической цепи с активным сопротивлением определенная часть электрической энергии превращается во внутреннюю энергию. Предположим, что в цепи с активным сопротивлением напряжение меняется по закону синуса (а):  $u = U_m \sin \omega t$ . Соотношения между соответствующими величинами, характеризующими это состояние, приведено в таблице 3.3.





**Таблица 3.3.** Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Соотношения между характеристиками	Графики характеристик
<p>Согласно закону Ома:</p> $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$ <p>В цепи, состоящей только из резистора, сила тока <math>i</math> и напряжение <math>u</math> колеблются в одинаковых фазах.</p> <p>Поэтому: <math>\varphi_0 = 0</math> и <math>\cos \varphi_0 = 1</math>.</p> <p>В этом случае средняя мощность:</p> $\bar{P} = \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cdot \cos \varphi_0 = \frac{I_m \cdot U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2}.$ <p>Мгновенная мощность:</p> $P = iu = i^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t.$ <p>• В цепи переменного тока, содержащей только резистор, активное сопротивление, амплитудные значения силы тока и напряжения не зависят от частоты переменного тока.</p>	

**Конденсатор в цепи переменного тока.** Как будут меняться величины, характеризующие переменный ток, в цепи переменного тока с конденсатором?

#### ИССЛЕДОВАНИЕ 1

#### В каком случае в цепи с конденсатором существует ток?

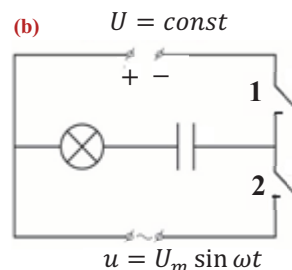
**Оборудование:** конденсатор (100 мкФ), лампа (4В), источники постоянного и переменного тока, ключ (2 шт.), соединительные провода.

#### Ход работы:

1. Соберите цепь, руководствуясь схемой (б). 2. Замкнув ключ 1, подсоедините конденсатор к источнику постоянного напряжения и наблюдайте за происходящим.
3. Разомкните ключ 1 и затем, замкнув ключ 2, подсоедините конденсатор к источнику переменного тока, одновременно продолжая наблюдать за происходящим.
4. Подсоедините лампу непосредственно к источнику переменного тока без конденсатора и сравните ее свечение (излучение) со свечением в цепи с конденсатором.

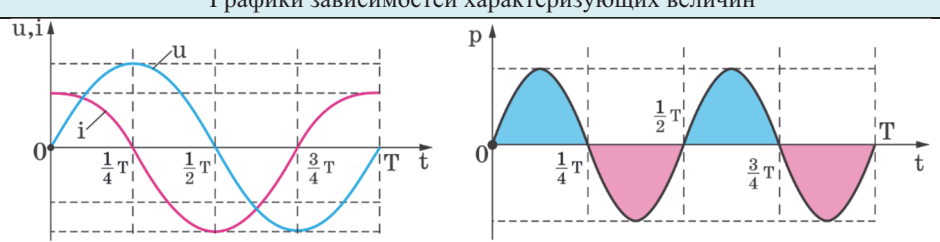
#### Обсуждение результата:

- При соединении конденсатора в какой цепи электрический ток существовал, и лампа светилась? Почему?
- В какой цепи переменного тока лампа светила ярче: с конденсатором или без? Почему?



При подсоединении конденсатора к источнику постоянного тока по цепи проходит кратковременный ток, лампа на миг загорается и сразу гаснет. Причиной кратковременности тока является наличие диэлектрика между пластинами конденсатора. Конденсатор, подсоединенный к источнику переменного тока, периодически перезаряжаясь, обеспечивает ток в цепи и свечение лампы. Если лампа подсоединена к источнику переменного тока напрямую без конденсатора, то она светит ярче, чем в той же цепи с конденсатором. Уменьшение яркости свечения лампы свидетельствует о сопротивлении, которое создает конденсатор в этой цепи. Сопротивление, созданное конденсатором, называют *ёмкостным сопротивлением* и обозначают символом  $X_C$ . Соотношения между величинами, характеризующими цепь переменного тока с конденсатором, систематизированы в таблице 3.4.

**Таблица 3.4.** Цепь переменного тока с ёмкостным сопротивлением.

Соотношения между характеризующими величинами
<p>Если учесть, что: <math>u = U_m \sin \omega t</math> и <math>q = C \cdot u = C \cdot U_m \sin \omega t</math>.</p> $i = q' = \omega C \cdot U_m \cos \omega t \text{ или } i = I_m \cos \omega t = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$ <ul style="list-style-type: none"> <li>В цепи с ёмкостным сопротивлением колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на <math>\frac{\pi}{2}</math>.</li> </ul> <p>Из последнего выражения видно, что: <math>I_m = \omega C \cdot U_m</math>. (1)</p> <p>Для такой цепи закон Ома имеет вид: <math>I_m = \frac{U_m}{X_C}</math>. (2)</p> <p>Из сравнения (1) и (2) получаем для ёмкостного сопротивления: <math>X_C = \frac{1}{\omega C}</math>.</p> <p>Ёмкостное сопротивление в цепи не выделяет тепло, поэтому его называют <b>реактивным</b>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>В цепи переменного тока с ёмкостным сопротивлением амплитудное значение силы тока и ёмкостное сопротивление зависят от частоты колебаний переменного тока. Средняя мощность тока в такой цепи равна нулю, так как:</li> </ul> $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \text{ и } \cos \frac{\pi}{2} = 0 \Rightarrow \bar{P} = IU \cos \varphi_0 = 0.$ <p>Если цепь переменного тока состоит только из конденсатора, то в ней средняя мощность равна нулю, и энергия, получаемая от источника, не превращается во внутреннюю энергию, происходит обмен энергией между конденсатором и генератором.</p>
Графики зависимостей характеризующих величин
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Как видим из графиков, мгновенная мощность в течение периода дважды обладает положительными значениями, дважды отрицательными, то есть энергия, подаваемая в цепь, полностью возвращается источнику.</li> </ul>

**Катушка в цепи переменного тока.** Что произойдет, если цепь переменного тока будет состоять только из катушки?

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

##### Исследование цепи с катушкой.

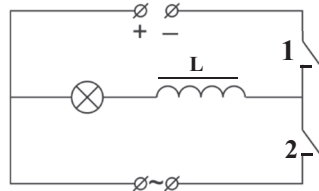
**Оборудование:** катушка с железным сердечником ( $L = 5 \text{ Гн}$ ), лампа (4В), источник постоянного тока, источник переменного тока, ключ (2 шт.), соединительные провода.

**Ход работы:** 1. Соберите электрическую цепь на основе схемы (с). 2. Замкните ключ 1 и соедините катушку индуктивности  $L$  с источником постоянного тока. Обратите внимание на свечение лампы. 3. Затем разомкните ключ 1 и замкните ключ 2, соединив катушку с источником переменного тока и наблюдая за происходящим.

##### Обсуждение результата:

- При соединении участка цепи с лампой и катушкой к какому источнику тока лампа будет светить ярче?
- К какому выводу можно прийти из опыта?

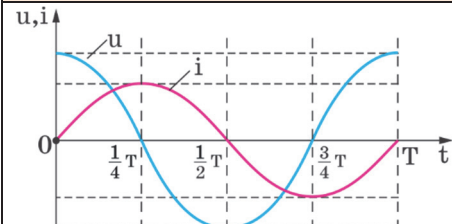
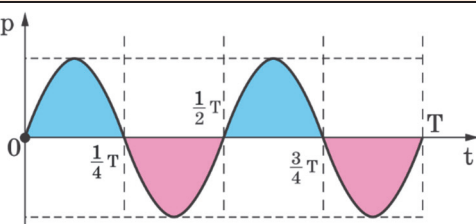
(с)



Из исследования стало известно, что при подсоединении участка цепи с катушкой индуктивности и лампой к источнику переменного тока яркость свечения резко уменьшается. Это, в свою очередь, показывает, что катушка индуктивности обладает определенным сопротивлением. Сопротивление, которым обладает катушка, называют *индуктивным сопротивлением* и обозначают символом  $X_L$ .

Соотношение между величинами, характеризующими цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением, показано в таблице 3.5.

**Таблица 3.5.** Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением.

Соотношения между характеризующими цепь величинами	
При прохождении переменного тока через такую цепь возникает ЭДС самоиндукции:	
$\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -Li'.$	
Так как соотношение между ЭДС самоиндукции и мгновенным значением напряжения на концах источника переменного тока $u = -\varepsilon_{is}$ , то $u = Li'$ .	
Если сила тока меняется по закону $i = I_m \sin \omega t$ , то мгновенное значение напряжения:	
$u = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \cos \omega t, \text{ или } u = U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Колебания напряжения в цепи переменного тока с катушкой индуктивности опережают колебания силы тока по фазе на <math>\frac{\pi}{2}</math>. В такой цепи средняя мощность равна нулю.</li> </ul>	
Из последнего выражения видно, что:	
$U_m = \omega L \cdot I_m. \quad (3)$	
В этом случае по закону Ома:	
$I_m = \frac{U_m}{\omega L} = \frac{U_m}{X_L}. \quad (4)$	
Таким образом, индуктивное сопротивление:	
$X_L = \omega L.$	
Это сопротивление также реактивное, так как оно не выделяет тепло в цепи.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Если цепь переменного тока состоит только из катушки, то средняя мощность этой цепи равна нулю, и в ней тепло не выделяется. Индуктивное сопротивление только ограничивает силу переменного тока.</li> </ul>	
Графики зависимостей характеризующих величин	
	

### Какое действие оказывает индуктивное сопротивление на силу переменного тока?

**Задача.** К цепи переменного тока с частотой  $50 \text{ Гц}$  и напряжением  $240 \text{ В}$  подключена катушка индуктивности с очень малым (незначительным) активным сопротивлением. Учитывая, что индуктивность катушки равна  $0,5 \text{ Гн}$ , определите ( $\pi = 3$ ;  $\sqrt{2} = 1,4$ ):

- индуктивное сопротивление катушки;
- действующее значение силы переменного тока, проходящего через катушку;
- амплитудное значение силы тока.

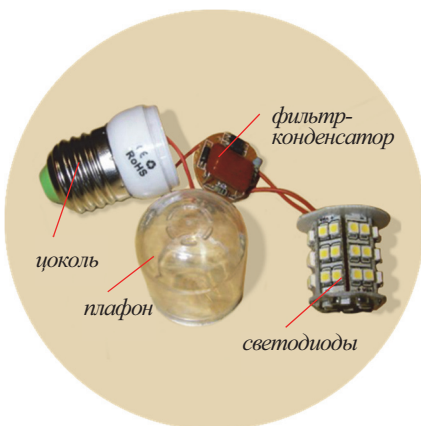
#### Обсуждение результата:

- Что означает: частота колебаний в цепи переменного тока  $50 \text{ Гц}$  и напряжение  $240 \text{ В}$ ?
- От чего зависит индуктивное сопротивление катушки? Какое действие оно оказывает на силу переменного тока: увеличивает его или уменьшает?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Лампы LED (светодиоды) вследствие своей высокой энергосберегаемости широко используются во всех осветительных системах. Несмотря на то, что лампы LED подключаются к сети переменного тока напряжением  $220 \text{ В}$ , их светодиоды работают на очень слабом постоянном токе. Постоянным током их обеспечивает помещенная в основание лампы микросхемная цепь, снабженная полупроводниковым диодом и транзистором, катушкой, резистором и конденсатором.

- Будет ли светиться лампа LED, если ее подключить к источнику постоянного тока? Почему?



#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	В цепи переменного тока сопротивление резистора называют активным, а сопротивление конденсатора и катушки реактивным. Почему?			
2	Как изменится индуктивное сопротивление катушки индуктивностью $0,1 \text{ Гн}$ при повышении частоты переменного тока в цепи от $50 \text{ Гц}$ до $5 \text{ кГц}$ ?			
3	Как изменится ёмкостное сопротивление конденсатора ёмкостью $5 \text{ мкФ}$ при повышении частоты переменного тока в цепи от $50 \text{ Гц}$ до $5 \text{ кГц}$ ?			
4	Резистор сопротивлением $20 \text{ Ом}$ подключен к цепи переменного тока. Как изменится сопротивление резистора при повышении частоты переменного тока в цепи от $50 \text{ Гц}$ до $5 \text{ кГц}$ ?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** В рабочих листках составьте карту понятий для темы “Цепи переменного тока, содержащие резистор, конденсатор и катушку индуктивности”.

### 3.5. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЁМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

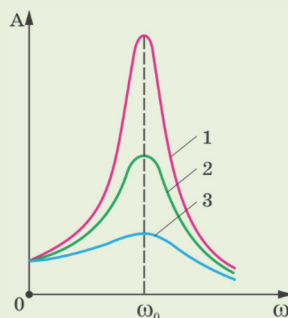
#### Физика – 10 и 11

Закон Ома для полной цепи выражается следующим образом:

- Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:  $I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{пол.}}} = \frac{\varepsilon}{R+r}$ .

Амплитуда вынужденных колебаний колебательной системы зависит от частоты внешнего воздействия. С приближением значений частоты изменения внешнего воздействия к значению частоты собственных колебаний системы амплитуда вынужденных колебаний растет. В результате в системе возникает явление резонанса:

- Резонанс – явление, выражающееся в резком возрастании амплитуды вынужденных колебаний в системе при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой свободных колебаний системы: ( $\omega_0 = \omega$ ).
- Кривизна резонансной кривой зависит от значения силы трения. Кривая 1 соответствует малым значениям силы трения (максимально резкая), кривая 2 соответствует относительно большому значению силы трения, а кривая 3 соответствует наибольшему значению силы трения.



- Иногда в летнее время происходит пробой изоляции линий высокого напряжения крупных предприятий, интенсивно использующих электрические системы охлаждения. В результате слой изоляции дымится, образуя ядовитые клубы дыма, и возникает его возгорание. Вывод, к которому приходят специалисты в таких чрезвычайных ситуациях: “В цепи возник электрический резонанс!”

**• Что такое электрический резонанс? В каких случаях он возникает?**

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

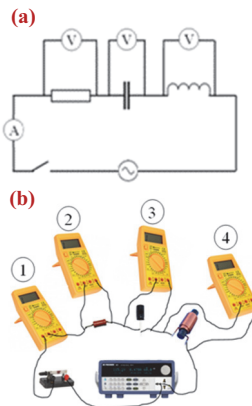
#### Выполняется ли закон Ома в цепи переменного тока?

**Оборудование:** источник напряжения с изменяющейся частотой, резистор (1 кОм), конденсатор (100 мкФ), катушка с железным сердечником (5 Гн), цифровой мультиметр М-3900 (4 шт.).

**Ход работы:** 1. Занесите в рабочий листок электрическую схему (а) и соберите соответствующую электрическую цепь (б). 2. Настройте мультиметры на переменную силу тока (мультиметр 1) и на переменное напряжение (2÷4). 3. Замкните ключ и отметьте в соответствующих ячейках таблицы 3.6 показания мультиметров. 4. Вычислите значения сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$  по данной частоте колебаний ЭДС источника тока и отметьте их в таблице.

Таблица 3.6.

№	$v, Гц$	$I, mA$	$U_R, B$	$U_L, B$	$U_C, B$	$R, Ом$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$
1						1000		
2						1000		
3						1000		



5. Используя данные таблицы, вычислите силу тока, проходящего через резистор, катушку и конденсатор. Сравните полученные значения с показаниями 1-го мультиметра. 6. Повторите опыт ещё 2 раза, увеличивая каждый раз частоту колебаний ЭДС. 7. Удалив из цепи резистор, резко понизьте активное сопротивление цепи ( $R \rightarrow 0$ ) и проследите изменение амплитудного значения силы тока при этом.

**Обсуждение результата:**

- Как меняются сила тока в цепи и напряжение на каждом устройстве (резисторе, конденсаторе и катушке) при увеличении частоты колебаний ЭДС источника переменного тока?
- Как изменилась амплитуда силы переменного тока при резком уменьшении активного сопротивления в цепи (при удалении резистора)? Почему?
- Выполняется ли закон Ома в цепи переменного тока?

На предыдущем уроке были проанализированы особые, можно сказать, идеализированные состояния цепи переменного тока. Реальные цепи переменного тока состоят из системы, включающей резистор, катушку и конденсаторы одновременно. Представим, что цепь из последовательно соединённых резистора, конденсатора и катушки подсоединена к источнику переменного тока с ЭДС (с), меняющейся по гармоническому закону  $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ . Сила тока в такой цепи будет меняться по закону  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi_0)$ . Здесь  $\varphi_0$  – определённое смещение фазы колебаний между силой тока в цепи и общим напряжением (ЭДС) на концах источника.

Согласно закону Ома, амплитудные значения силы тока и ЭДС (или общего напряжения на концах цепи переменного тока) связаны друг с другом:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} \text{ или } I_m = \frac{U_m}{Z}. \quad (1)$$

Здесь  $U_m$  – амплитудное значение общего напряжения на концах цепи переменного тока,  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

• Полное сопротивление цепи переменного тока – физическая величина, равная отношению амплитудного значения общего напряжения на концах цепи переменного тока к амплитудному значению силы переменного тока:

$$Z = \frac{U_m}{I_m}.$$

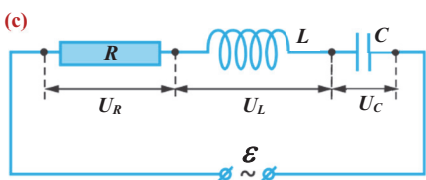
Если разделить обе части последнего равенства на  $\sqrt{2}$ , то получим выполнение закона Ома для действующих значений силы переменного тока и его напряжения (ЭДС):

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Полное сопротивление цепи из последовательно соединённых активного, ёмкостного и индуктивного сопротивлений зависит от этих сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = X$  – реактивное сопротивление цепи переменного тока.



состоит из системы, включающей резистор, катушку и конденсаторы одновременно. Представим, что цепь из последовательно соединённых резистора, конденсатора и катушки подсоединена к источнику переменного тока с ЭДС (с), меняющейся по гармоническому закону  $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ . Сила тока

в такой цепи будет меняться по закону  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi_0)$ . Здесь  $\varphi_0$  – определённое смещение фазы колебаний между силой тока в цепи и общим напряжением (ЭДС) на концах источника.

Согласно закону Ома, амплитудные значения силы тока и ЭДС (или общего напряжения на концах цепи переменного тока) связаны друг с другом:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} \text{ или } I_m = \frac{U_m}{Z}. \quad (1)$$

Здесь  $U_m$  – амплитудное значение общего напряжения на концах цепи переменного тока,  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

• Полное сопротивление цепи переменного тока – физическая величина, равная отношению амплитудного значения общего напряжения на концах цепи переменного тока к амплитудному значению силы переменного тока:

$$Z = \frac{U_m}{I_m}.$$

Если разделить обе части последнего равенства на  $\sqrt{2}$ , то получим выполнение закона Ома для действующих значений силы переменного тока и его напряжения (ЭДС):

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Полное сопротивление цепи из последовательно соединённых активного, ёмкостного и индуктивного сопротивлений зависит от этих сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = X$  – реактивное сопротивление цепи переменного тока.



Если учесть выражение (2) в выражении (1), то закон Ома для цепи переменного тока можно записать таким образом:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (3)$$

**Примечание.** Вышеприведенные выражения можно получить на основе векторной диаграммы напряжений на разных участках цепи переменного тока, учитывая разность фаз колебаний силы тока и напряжения на этих сопротивлениях **(d)**. Как видно из диаграммы:

$$U_m = \sqrt{U_{R,m}^2 + (U_{L,m} - U_{C,m})^2}.$$

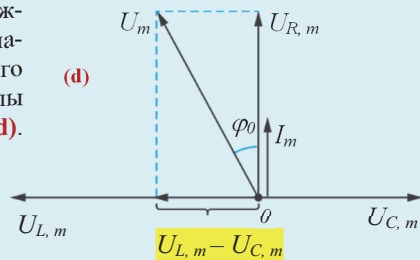
Если в выражении (2) учесть соответствующие падения напряжения, приведенные ниже:

$$U_{R,m} = I_m \cdot R; \quad U_{L,m} = I_m \cdot X_L; \quad U_{C,m} = I_m \cdot X_C, \text{ то}$$

$$U_m = \sqrt{(I_m \cdot R)^2 + (I_m \cdot X_L - I_m \cdot X_C)^2} = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

используя векторную диаграмму, можно определить коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{U_{R,m}}{U_m} = \frac{R}{Z}.$$

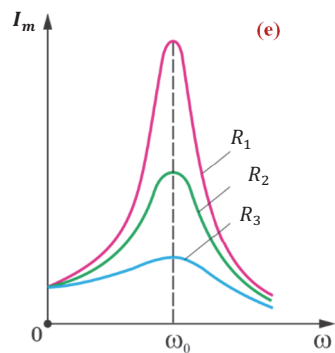


На рисунке **(e)** изображены графики зависимости амплитудных значений силы переменного тока от частоты колебаний ЭДС для трех резисторов с различными значениями сопротивлений. Анализ графиков показывает, что с уменьшением активного сопротивления ( $R_1 < R_2 < R_3$ ) растет амплитуда колебаний значения силы тока. Значит, амплитудное значение силы тока резко увеличивается при минимальном значении полного сопротивления цепи, то есть при:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Rightarrow X_L = X_C.$$

В это время частота колебаний силы переменного тока и ЭДС источника ( $\omega$ ) совпадают с частотой свободных собственных колебаний цепи ( $\omega_0$ ) – возникает резонанс в цепи:

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



**Задача.** На основе изображенной на рисунке цепи переменного тока и значений величин, характеризующих элементы этой цепи, определите:

- сопротивления  $X_L$  и  $X_C$ ;
- полное сопротивление цепи;
- амплитудное и действующее значение силы переменного тока;
- коэффициент мощности цепи.

**Обсуждение результата:**

- Можно ли произвести аналогичные вычисления, если источник переменного тока заменить на источник постоянного тока? Почему?

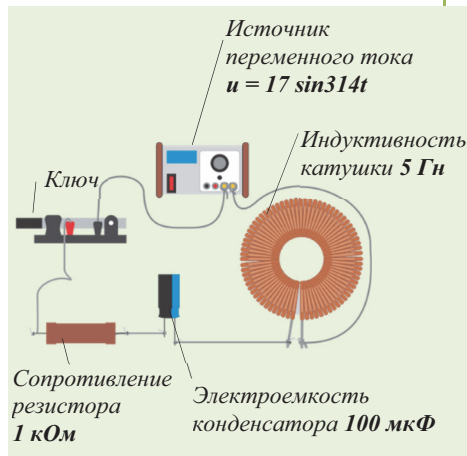
■ **СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

Для увеличения смещения фаз между колебаниями силы переменного тока и колебаниями напряжения электрики подсоединяют к элементам цепи с большим индуктивным сопротивлением (электрический двигатель, трансформатор и др.) последовательно конденсатор.

- Почему электрики увеличивают смещение фаз между колебаниями силы тока и напряжения в цепи переменного тока?

■ **ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Считается, что колебания силы тока в последовательно соединенных элементах цепи переменного тока происходят в одинаковых фазах. Почему?			
2	Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока из последовательно соединенных элементов?			
3	Каково смещение фаз между колебаниями напряжения на концах конденсатора и катушки и колебаниями силы переменного тока?			
4	Цепь переменного тока состоит из последовательно соединенных резистора ( $R = 1 \text{ кОм}$ ), конденсатора емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ и катушки индуктивностью $0,5 \text{ Гн}$ . Цепь подсоединена к источнику с частотой колебаний $\nu = 1 \text{ кГц}$ . Определите: а) полное сопротивление цепи переменного тока; б) частоту $\nu_0$ , при которой реактивное сопротивление цепи равно нулю.			



**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Закон Ома для цепи переменного тока”.

### 3.6. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. ТРАНСФОРМАТОР

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8

Согласно закону сохранения энергии для полной цепи при прохождении электрического тока по металлическому проводнику ток совершает работу. Эта работа тратится на увеличение внутренней энергии проводника – на выделение тепла:

$$A = Q = IUt.$$

- Количество теплоты, выделенное в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и на время прохождения тока по нему:

$$Q = I^2 Rt.$$

Соотношение между этими величинами впервые было экспериментально установлено английским ученым Д. Джоулем и русским ученым Э. Ленцем, поэтому его называют законом Джоуля-Ленца.

- В параллельно соединенных проводниках напряжение (одинаково) неизменно, поэтому количество теплоты, выделяемое в них, обратно пропорционально сопротивлениям этих проводников:

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

- На современных крупных электростанциях электрическая энергия производится под напряжением несколько тысяч вольт. Однако для того, чтобы перенести эту энергию на большие расстояния, её напряжение ещё больше повышается. После того, как энергия переносится до пункта назначения, её напряжение снова понижается.

- Почему электрическая энергия передается на большие расстояния под высоким напряжением?
- Почему после перенесения энергии до пункта назначения ее напряжение снова понижают?
- Как осуществляется повышение и понижение напряжения?

**Передача электроэнергии.** При передаче на большие расстояния электроэнергии, произведенной генератором переменного тока, в проводах линии передачи происходят потери энергии в виде выделенного тепла, которое определяется на основе закона Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 Rt = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S} \cdot t. \quad (1)$$

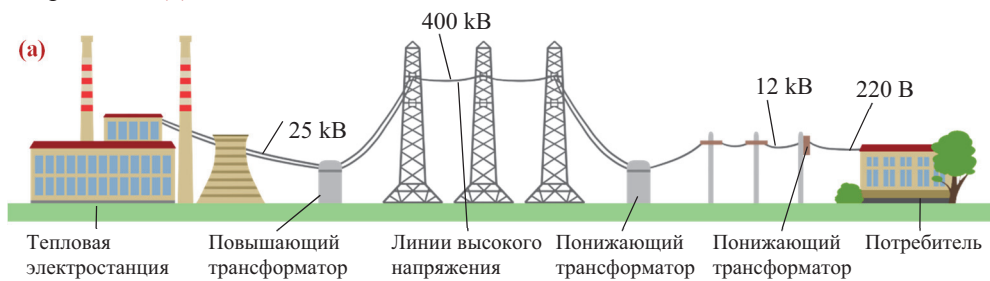
Как видим из формулы (1), одним из способов уменьшения потерь энергии является увеличение площади поперечного сечения проводов ( $S$ ). Но этот способ не выгоден с практической точки зрения, так как в этом случае провода будут настолько массивными, что придется создать гигантские опорные столбы для их поддержки.

Самым выгодным способом снизить потери энергии является повышение напряжения и сохранение передаваемой мощности:

$$Q = \frac{P^2}{U^2} \cdot R \cdot t. \quad (2)$$

Поэтому для передачи вырабатываемого на электростанциях переменного тока напряжением  $12 \div 25$  кВ на большие расстояния его напряжение повышается до сотен киловольт. Такой ток передается по линиям высокого напряжения до места назначения и после понижения напряжения поставляется потребителям.

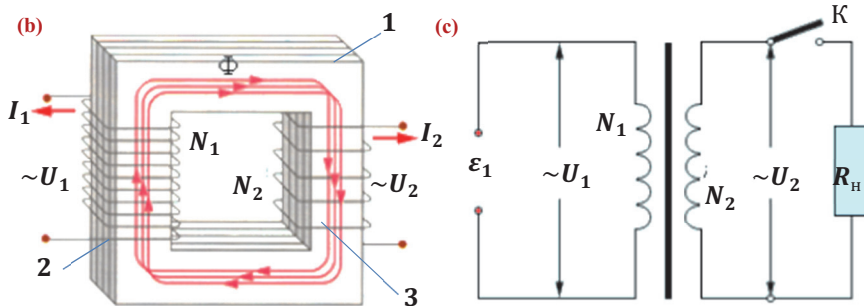
Значит, при передаче электроэнергии невозможно обойтись без необходимого элемента этого процесса – трансформатора – устройства для повышения-понижения напряжения (а).



### Трансформатор.

- *Трансформатор* (лат. “transformare” – “превращать, преобразовывать”) – электромагнитное устройство, предназначенное для увеличения-уменьшения напряжения переменного тока без изменения его мощности и частоты.

Схематическое изображение трансформатора и его условное обозначение на схеме показаны на рисунках (b) и (c). Он состоит из замкнутого сердечника (1), собранного из пластин, на который намотаны две катушки (обмотки). Первая катушка (2) называется *первичной* и подключается к источнику переменного напряжения, вторая катушка (3), называемая *вторичной*, присоединяется к нагрузке, т.е. к потребителям с общим сопротивлением  $R_H$ .



Переменный ток, проходящий через первичную обмотку, создает переменный магнитный поток, пронизывающий стальной сердечник и обе обмотки. Так как обе обмотки пересекает один и тот же магнитный поток, то в каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции, равная  $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Если в первичной обмотке  $N_1$  витков, а во вторичной их  $N_2$ , то ЭДС индукции в каждой из них будет равна соответственно:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{и} \quad \varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Величина, равная отношению ЭДС, индуцированных в первичной и вторичной обмотках, называется *коэффициентом трансформации (K)* и равна отношению количества витков в соответствующих обмотках:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} = K. \quad (3)$$

При разомкнутой вторичной обмотке ( $I_2 = 0$ ), так называемом холостом режиме работы, напряжение на его концах будет  $|U_2| = |\varepsilon_2|$ . Значение силы тока в первичной обмотке при этом тоже приближается к нулю:  $I_1 \rightarrow 0$ . Поэтому напряжение на концах первичной обмотки будет  $|U_1| = |\varepsilon_1|$ . Таким образом, коэффициент трансформации равен:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что если  $N_1 > N_2$  и  $K > 1$ , то очевидно  $U_2 < U_1$  – напряжение на выходе трансформатора меньше входного напряжения. Такой трансформатор называют *понижающим*.

Если  $N_2 > N_1$  и  $K < 1$ , то очевидно  $U_2 > U_1$  – напряжение на выходе трансформатора будет больше, чем на входе. Такой трансформатор называют *повышающим*.

Активное сопротивление трансформатора близко к нулю, поэтому при работе в режиме нормальной нагрузки мощность в первичной цепи приблизительно равна мощности во вторичной цепи:  $P_1 \approx P_2$ . Отсюда получаем, что сила переменного тока в обмотках трансформатора и напряжение на концах обмоток обратно пропорциональны друг другу:

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2 \text{ или } \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} = K. \quad (5)$$

Значит, в обмотке трансформатора с малым напряжением сила тока принимает высокое значение, а в обмотке с большим напряжением сила тока принимает низкое значение. По этой причине провода в обмотке с малым числом витков и низким значением напряжения должны иметь большую площадь поперечного сечения, чем провода в обмотке с большим числом витков и высоким напряжением.

КПД трансформатора определяется следующим выражением:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%. \quad (6)$$

**Примечание.** При подключении вторичной обмотки к потребителю коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_1}{U_2 + I_2 r_2}. \quad (7)$$

Здесь  $r_2$  – сопротивление вторичной обмотки.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

**Работу какого трансформатора вы проверили?**

**Оборудование:** универсальный трансформатор: лабораторный набор (d).

**Ход работы:**

1. На один из рукавов U-образного стального сердечника поместите первичную обмотку с электрической вилкой, на другую – обмотку с электросваркой (вторичная обмотка). Замкните сердечник и закрепите зажимами.
2. Подсоедините первичную обмотку к сети напряжением  $\sim 220$  В и коснитесь остриями гвоздей, прикрепленных к зажимам вторичной обмотки. Пронаблюдайте происходящее при этом явление.



3. Отключите первичную обмотку от сети, удалите обмотку электросварки с рукава сердечника. На освободившийся рукав сердечника поместите катушку с малым числом витков, к концам которой подсоединена лампа, при этом первичную обмотку снова подсоедините к сети. Наблюдайте за происходящим.

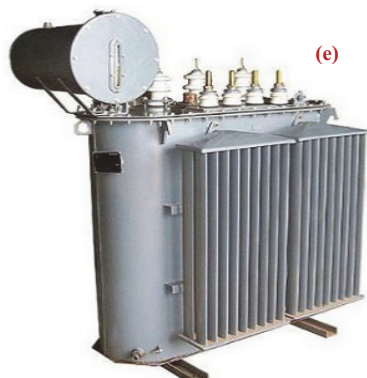
#### Обсуждение результата:

- Повышающим или понижающим был трансформатор в случае модели с электросваркой?
- Повышающим или понижающим был трансформатор в случае модели с лампой?
- На каком явлении основано возникновение электрического тока во вторичной обмотке?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Сердечники трансформаторов состоят из большого числа тонких стальных пластин со специальными диэлектриками между ними. И сердечник, и обмотки самых мощных трансформаторов помещают в тонкостенные баки или радиаторы, заполненные маслом (e).

- Почему сердечники радиаторов состоят из большого числа тонких стальных пластин?
- Почему сердечник и обмотки трансформатора помещают в баки или радиаторы, заполненные маслом?



#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Что такое трансформатор? Производит ли он электро-энергию?			
2	<p>Определите, какой из изображенных на рисунках (f) и (g) трансформаторов является повышающим, а какой понижающим.</p> 			
3	Какой способ передачи электроэнергии на большие расстояния является самым выгодным?			
4	Напряжение первичной обмотки трансформатора с коэффициентом трансформации 0,2 равно 220 В. Вычислите напряжение на вторичной обмотке.			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Передача электроэнергии. Трансформатор”.

### 3.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 7 и 10

**Волна** – процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени.

- Волна – процесс переноса в среде энергии без переноса вещества.

• Механическая волна – процесс распространения механических колебаний в среде. Механическая волна распространяется в упругой среде (в твердой, жидкой и газообразной) и не распространяется в вакууме. Существует два вида волн: продольные и поперечные.

• В продольной волне колебания частиц среды происходят в направлении, параллельном направлению распространения волны. Продольная волна распространяется во всех средах (твердой, жидкой и газообразной). Она сопровождается чередованием сгущений и разрежений частиц среды.

• В поперечной волне колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Поперечные волны распространяются только в твердых телах и на поверхности жидкостей. Они распространяются в виде чередующихся выпуклостей и впадин.

Одним из важнейших видов механических волн является звуковая волна, или просто звук. Она тоже представляет собой распространение колебаний в упругой среде.

• Частота (период) волны – это частота (период) колебаний источника, создающего волну.

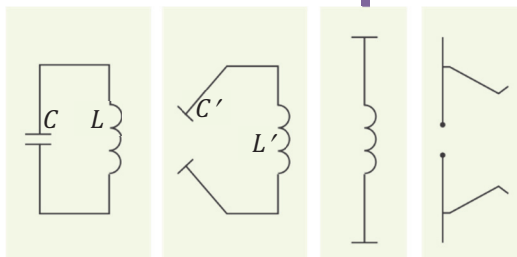
• Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду ( $t = T$ ) колебаний:  $\lambda = v T = \frac{v}{\nu}$ .

• Скорость волны – это скорость распространения колебаний в среде:  $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$ .

Скорость волны не зависит от периода и частоты волны. Скорость волны зависит от свойств среды и его агрегатного состояния. Длина волны в однородной среде прямо пропорциональна периоду колебаний и обратно пропорциональна частоте колебаний частиц среды. При переходе волны из одной среды в другую частота и период волны не меняются, однако, так как скорость волны в различных средах различна, то и длина волны изменится.

■ Вы уже знаете, почему электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора и катушки, называют колебательным контуром, и какие там происходят явления.

- Что произойдет, если “открыть” колебательный контур, то есть, уменьшив площадь пластин конденсатора, увеличить расстояние между ними (раздвинуть их), одновременно уменьшить число витков в катушке?





**Оборудование:** вибратор сантиметровых волн; приемный резонатор (из набора физической лаборатории “Электромагнитные волны”), цифровой вольтметр **(а)**.

**Ход работы:**

1. Подсоедините вибратор к сети переменного тока, резонатор подсоедините к вольтметру. Поместите рупоры приборов горизонтально напротив друг друга на расстоянии 1–1,5 м.

2. Включите вибратор и следите за происходящим.

3. Не меняя расстояния между приборами, постепенно установите их под углом 45° к горизонту

**(б)**. Продолжайте следить за происходящим.

**Обсуждение результата:**

- На каком этапе эксперимента вольтметр зарегистрировал возникновение напряжения в цепи резонатора?

- Что породило электрический ток в цепи резонатора без какого-либо источника тока?



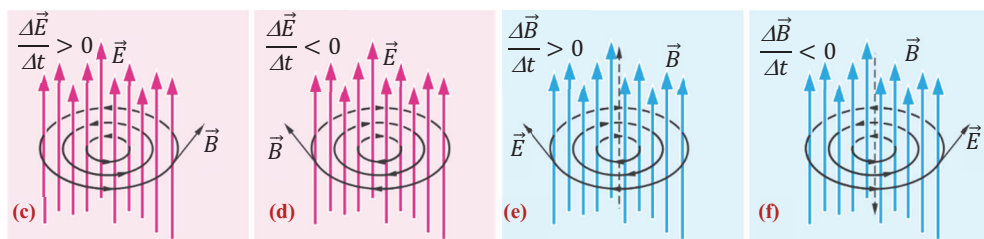
**Электромагнитная волна.** Явление электромагнитной индукции и явление самоиндукции показали, что изменяющееся со временем магнитное поле создает в пространстве вихревое переменное электрическое поле. Английский ученый Джеймс Клерк Максвелл (1831 – 1879) в опубликованной в 1873 году научной работе “Трактат об электричестве и магнетизме” обосновал предположение, что вихревое электрическое поле тоже создает в пространстве переменное магнитное поле. При этом силовые линии электрических и магнитных полей окружают друг друга. Силовые линии полей связаны следующими соотношениями:

**а)** если напряженность электрического поля увеличивается ( $\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t} > 0$ ), то вектор индукции созданного магнитного поля составляет правый винт относительно вектора напряженности электрического поля **(с)**;

**б)** если напряженность электрического поля уменьшается ( $\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t} < 0$ ), то вектор индукции созданного магнитного поля составляет левый винт относительно вектора напряженности электрического поля **(д)**;

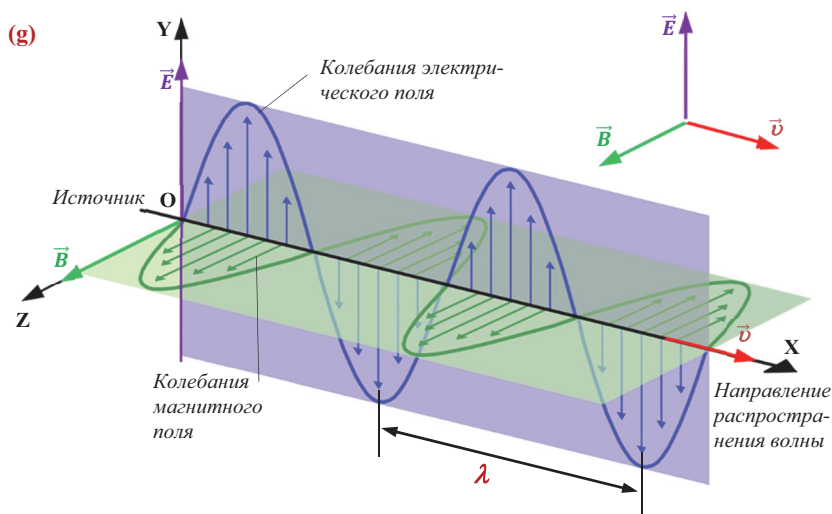
**в)** если индукция магнитного поля увеличивается ( $\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} > 0$ ), то вектор напряженности созданного вихревого электрического поля составляет левый винт относительно вектора индукции магнитного поля **(е)**;

**г)** если индукция магнитного поля уменьшается ( $\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} < 0$ ), то вектор напряженности созданного вихревого электрического поля составляет правый винт относительно вектора индукции магнитного поля **(ф)**.



Таким образом, быстро меняющееся электрическое поле порождает в этой же части пространства переменное магнитное поле, которое в свою очередь порождает вихревое электрическое поле и т.д. Переменные электрические и магнитные поля, одно порождая другое, охватывают все новые и новые части пространства – распространяются в пространстве с конечной скоростью в виде **электромагнитных волн**.

- **Электромагнитная волна** – распространение в пространстве переменного электромагнитного поля. Являясь поперечной волной (**g**), электромагнитная волна характеризует изменение векторов напряженности электрического поля ( $\vec{E}$ ) и индукции магнитного поля в пространстве ( $\vec{B}$ ) во взаимно перпендикулярных плоскостях.



### **Некоторые свойства электромагнитных волн.**

- Электромагнитные волны являются поперечными. Колебания векторов напряженности электрического поля ( $\vec{E}$ ) и индукции магнитного поля ( $\vec{B}$ ) происходят в плоскостях, перпендикулярных друг другу и вектору скорости ( $\vec{v}$ ) распространения волны (см. **g**). В произвольной точке пространства, в котором распространяется волна, модуль вектора напряженности пропорционален модулю вектора магнитной индукции.

- Электромагнитная волна распространяется и в среде, и в вакууме. Скорость её распространения в вакууме равна скорости распространения света в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – соответственно электрическая и магнитная постоянные.

- Скорость распространения электромагнитной волны в среде равна скорости распространения света в среде и зависит от свойств среды:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{n}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon$  и  $\mu$  – соответственно диэлектрическая проницаемость среды и её магнитная проницаемость,  $n$  – показатель преломления среды.

Длина электромагнитной волны в вакууме:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = cT, \quad (3)$$

Длина электромагнитной волны в среде меньше, чем в вакууме, в  $n$  раз:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (4)$$

- Электромагнитная волна обладает энергией. Часть энергии волны поглощается при попадании волны в проводник, в котором при этом возникает быстро меняющийся электрический ток.

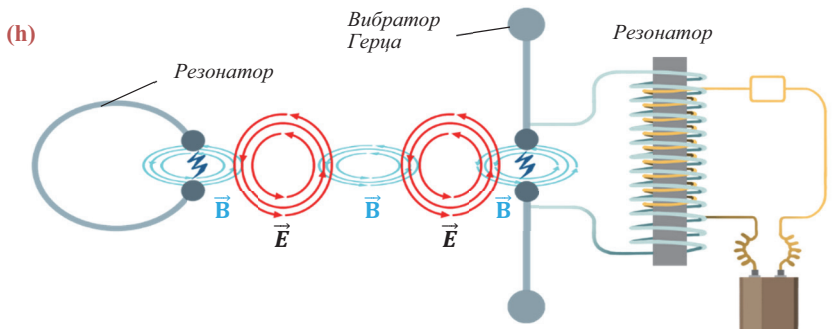
- Дошедшая до границы раздела двух сред электромагнитная волна претерпевает отражение и преломление.

- Электромагнитная волна рассеивается в пространстве, поглощается в воде и т.д.

#### **Излучение электромагнитных волн – открытый колебательный контур.**

В обычном колебательном контуре происходит превращение энергий электрического и магнитного полей друг в друга, однако эти превращения выражаются поочередным накоплением энергии соответствующих полей то в конденсаторе, то в катушке. Поэтому за пределами колебательного контура, можно сказать, электромагнитная волна не фиксируется, то есть контур не излучает электромагнитные волны. Чтобы добиться излучения электромагнитной волны, необходимо повысить собственную частоту электромагнитных колебаний, создающих волну. Для этого следует уменьшить либо емкость, либо индуктивность в контуре, так как собственная частота электромагнитных колебаний в контуре равна  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Учитывая эти закономерности, немецкий ученый Генрих Рудольф Герц (1857–1894) изменил форму колебательного контура и в 1886 году добился излучения контуром электромагнитных волн. Он удалил катушку, уменьшил площадь пластин конденсатора и отдал их друг от друга. В результате закрытый контур превратился в открытый. Проводя опыты, периодически сообщая энергию такому контуру, называемому *вибратором Герца*, между кондукторами его конденсатора возникали высокочастотные электромагнитные колебания в форме искрового разряда. Одновременно на расстоянии 1–2 м параллельно вибратору был помещен приемный контур, не подсоединенный к какому-либо источнику энергии, – резонатор, между кондукторами которого тоже возник такой же искровой разряд. Значит, высокочастотные электромагнитные колебания, возникшие в открытом

колебательном контуре, распространили свою энергию в пространстве в виде электромагнитных волн, и эти волны были приняты резонатором (h).



#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

#### Какова длина электромагнитной волны в среде?

**Задача.** Электромагнитная волна распространяется в однородной среде со скоростью  $2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите длину электромагнитной волны. Частота ее излучения в вакууме равна 1 МГц.

#### Обсуждение результата:

- Как можно определить длину электромагнитной волны в среде при известных значениях ее частоты излучения в вакууме и скорости распространения в среде?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Бакинская телевизионная башня излучает две несущие волны: излучение, несущее волну изображения с частотой излучения 94 МГц, и излучение частотой 95 МГц, несущее модулированные электромагнитные волны. Определите длины волн, соответствующих частотам этих излучений.

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Что является источником вихревого электрического поля?			
2	Что такое электромагнитная волна?			
3	Почему закрытый колебательный контур не излучает электромагнитные волны?			
4	Как направлен вектор скорости электромагнитных волн относительно векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля?			
5	При переходе электромагнитной волны из вакуума в среду длина волны уменьшилась в 9 раз. Как при этом изменилась скорость её распространения?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Электромагнитные волны”.

### 3.8. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (Урок-презентация)

Презентацию рекомендуется провести на основе нижеприведенного плана. При этом рекомендуется воспользоваться электронными ресурсами и теоретическими сведениями.

- План:**
- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1. Энергия электромагнитных волн. | 2. Шкала электромагнитных волн: <b>а)</b> радиоволны; <b>б)</b> микроволны; <b>в)</b> инфракрасные волны; <b>г)</b> видимый свет; <b>д)</b> ультрафиолетовые волны; <b>е)</b> рентгеновское излучение; <b>ж)</b> $\gamma$ -излучение. |
|-----------------------------------|---|

При подготовке презентации по последнему пункту постарайтесь ответить на следующие вопросы: дата открытия этого излучения, характеристика, свойства, применение, действие на человеческий организм.

**1. Энергия электромагнитной волны.** Электромагнитная волна несет в себе энергию. Эта энергия характеризуется следующими величинами:

- Плотность потока электромагнитного излучения ( $J$ ) – физическая величина, равная отношению электромагнитной энергии  $\Delta W$ , проходящей за время  $\Delta t$  через перпендикулярную направлению распространения лучей поверхность площадью  $S$  к произведению площади  $S$  на время  $\Delta t$ :

$$J = \frac{\Delta W}{S \cdot \Delta t}. \quad (1)$$

Если  $S = 1 \text{ м}^2$  и  $\Delta t = 1 \text{ с}$ , то из выражения (1) получаем  $J = \Delta W$ : плотность потока электромагнитного излучения равна энергии, проходящей через единичную площадь за единицу времени. Иногда эту величину называют интенсивностью волны.

Единица измерения плотности потока электромагнитного излучения в СИ:

$$[J] = \frac{[\Delta W]}{[S] \cdot [\Delta t]} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

- Плотность энергии электромагнитной волны равна энергии электромагнитного поля в единице объема:

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V}. \quad (2)$$

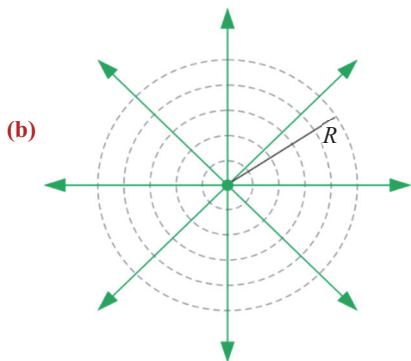
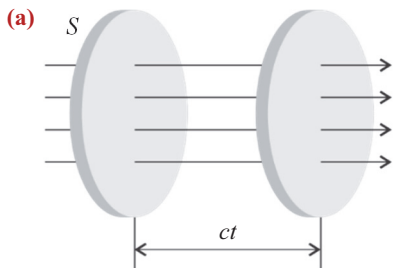
Единица измерения плотности энергии в СИ:

$$[w] = \frac{[\Delta W]}{[\Delta V]} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}.$$

Электромагнитную энергию  $\Delta W$ , заключенную в некотором объеме пространства  $\Delta V$ , можно выразить как произведение плотности энергии электромагнитной волны ( $w$ ) на объем воображаемого в пространстве цилиндра **(а)**, основанием которого является площадь поверхности  $S$ , через которую проходит волна, а высотой – произведение скорости волны  $c$  на время  $\Delta t$  ( $c \cdot \Delta t$ ), то есть расстояние, которое преодолевает волна за это время ( $\Delta V = c \cdot \Delta t \cdot S$ ):

$$\Delta W = w \cdot c \cdot \Delta t \cdot S. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в формулу (1), выясняется, что плотность (интенсивность) потока излучения



равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость его распространения:

$$J = \frac{w \cdot c \Delta t S}{S \cdot \Delta t} = w \cdot c. \quad (4)$$

Самым простым источником, излучающим электромагнитные волны, является точечный источник – его размеры во много раз меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Такой источник излучает одинаковые по интенсивности волны во всех направлениях (b). Если в формуле (1) учесть, что площадь сферы радиусом  $R$ , в центре которой помещен точечный источник, равна  $S = 4\pi R^2$ , то получим, что плотность потока электромагнитной энергии от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника:

$$J = \frac{\Delta W}{4\pi R^2 \cdot \Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi \Delta t R^2} \cdot 1. \quad (5)$$

Если принять во внимание, что электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц, то напряженность электрического поля и индукция магнитного поля прямо пропорциональны ускорению этих частиц, а ускорение частиц прямо пропорционально квадрату частоты их колебаний:

$$E \sim a \sim \omega^2 \text{ в } B \sim a \sim \omega^2.$$

Плотность электромагнитной энергии, как энергия электромагнитного поля, приходящаяся на единичный объём, равна сумме энергии электрического и магнитного полей:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$$

$$w \sim (E^2 + B^2) \sim \omega^4.$$

Плотность (интенсивность) потока излучения пропорциональна плотности энергии, которая в свою очередь пропорциональна четвертой степени частоты излучения:

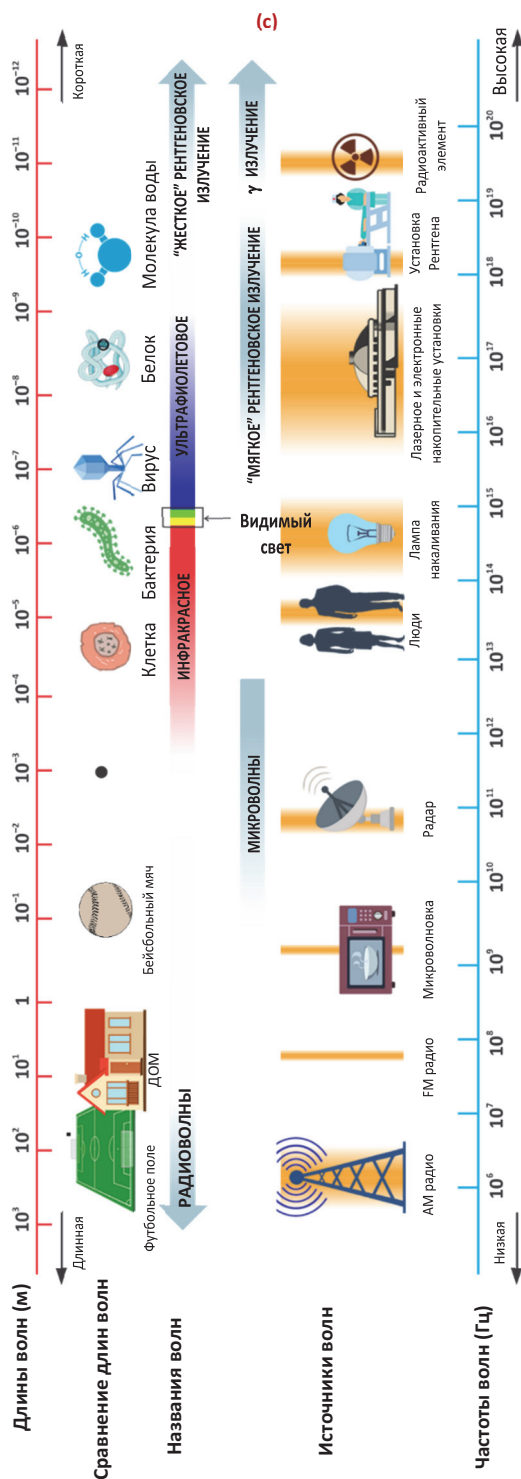
$$J \sim w \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}.$$

• Мощность электромагнитного излучения точечного источника:

$$P = J \cdot S = J \cdot 4\pi R^2 = \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (6)$$

## 2. Шкала электромагнитных волн.

Некоторые сведения по этой теме можно получить по рисунку (см.: c).





### Электронные ресурсы:

1. [https://az.wikipedia.org/wiki/Elektromagnit\\_dal%C4%9Falar%C4%B1](https://az.wikipedia.org/wiki/Elektromagnit_dal%C4%9Falar%C4%B1)
2. <http://salamnews.org/az/news/read/192714>
3. <http://idol.az/site/bizi-ehate-eden-radiodalgalar-ziyandirmi/>
4. [file:///C:/Users/VIP/Downloads/d\\_pdf\\_kurs\\_ekolo\\_885.pdf](file:///C:/Users/VIP/Downloads/d_pdf_kurs_ekolo_885.pdf)
5. <http://www.turansam.org/makale.php?id=9423>
6. <https://www.youtube.com/watch?v=7gP8Axfic48>
7. [https://az.wikisource.org/wiki/Magnit\\_sah%C9%99l%C9%99ri\\_v%C9%99\\_elektromagnit\\_dal%C4%9Falar%C4%B1n\\_qan\\_d%C3%B6vr%C4%B1\\_sistemin%C9%99\\_v%C9%99\\_daxili\\_orqanlar%C4%B1na\\_olan\\_z%C9%99r%C9%99rli\\_t%C9%99sirinin\\_mexanizmi\\_v%C9%99\\_m%C3%BCalic%C9%99si](https://az.wikisource.org/wiki/Magnit_sah%C9%99l%C9%99ri_v%C9%99_elektromagnit_dal%C4%9Falar%C4%B1n_qan_d%C3%B6vr%C4%B1_sistemin%C9%99_v%C9%99_daxili_orqanlar%C4%B1na_olan_z%C9%99r%C9%99rli_t%C9%99sirinin_mexanizmi_v%C9%99_m%C3%BCalic%C9%99si)
8. [file:///C:/Users/VIP/Downloads/d\\_pdf\\_kurs\\_ekolo\\_886.pdf](file:///C:/Users/VIP/Downloads/d_pdf_kurs_ekolo_886.pdf)
9. [https://www.google.az/search?q=elektromagnit+dalgaları&rlz=1C1CHZL\\_ru\\_AZ757AZ757&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiZ\\_eTck8DWAhVB7xQKHxz\\_CUEQsAQIVA&biw=1920&bih=925](https://www.google.az/search?q=elektromagnit+dalgaları&rlz=1C1CHZL_ru_AZ757AZ757&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiZ_eTck8DWAhVB7xQKHxz_CUEQsAQIVA&biw=1920&bih=925)
10. [https://az.wikipedia.org/wiki/Rentgen\\_%C5%9F%C3%BCalar%C4%B1](https://az.wikipedia.org/wiki/Rentgen_%C5%9F%C3%BCalar%C4%B1)
11. [http://musavat.com/news/yasham/komputer-tomografiyasi-xerceng-yaradir\\_67356.html](http://musavat.com/news/yasham/komputer-tomografiyasi-xerceng-yaradir_67356.html)
12. <https://az.wikipedia.org/wiki/%C5%9E%C3%BCalanma>
13. [https://az.wikipedia.org/wiki/%C4%B0nfaq%C4%B1rm%C4%B1z%C4%B1\\_%C5%9F%C3%BCalanma](https://az.wikipedia.org/wiki/%C4%B0nfaq%C4%B1rm%C4%B1z%C4%B1_%C5%9F%C3%BCalanma)
14. [https://az.wikipedia.org/wiki/Ultrab%C9%99n%C3%B6v%C5%9F%C9%99yi\\_%C5%9F%C3%BCalanma](https://az.wikipedia.org/wiki/Ultrab%C9%99n%C3%B6v%C5%9F%C9%99yi_%C5%9F%C3%BCalanma)
15. <http://www.anl.az/down/meqale/zaman/2014/may/369962.htm>
16. [file:///C:/Users/VIP/Downloads/d\\_pdf\\_refe\\_tibbb\\_5363.pdf](file:///C:/Users/VIP/Downloads/d_pdf_refe_tibbb_5363.pdf)

## 3.9. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 7

Самым простым видом механических волн являются **звуковые волны**.

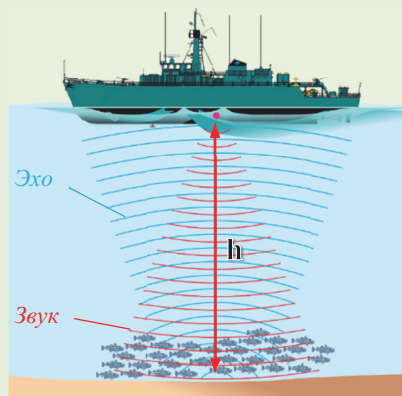
- Звуковые волны – это волны, распространяющиеся в упругой

среде и вызывающие звуковые ощущения.

Человеческое ухо воспринимает как звук только механические волны, колебания в которых происходят с частотой в пределах от 16 Гц до 20 000 Гц. Важной особенностью звуковых волн является их отражение от препятствий на пути распространения. Метод определения местонахождения объектов с помощью звуковых волн называется звуколокацией (эхолокацией). Принцип работы прибора, называемого **эхолотом**, используемого для определения глубины морей и океанов, установления месторасположения крупных косяков рыб, основан на явлении отражения звука (эхо). Источник звука, расположенный под кораблем, испускает кратковременные звуковые сигналы.

Отраженный от объектов на глубине звуковой сигнал фиксируется специальным чувствительным прибором, находящимся на корабле. Учитывая скорость распространения звука в воде, промежуток времени между моментами отправления сигнала и его приема, легко можно вычислить расстояние до объекта:

$$h = \frac{vt}{2}.$$





По заказу Министерства обороны США Массачусетский технологический университет в 1961–1963 годах осуществил проект “Вестфорд” с помощью трех космических кораблей. На основе этого проекта в околоземное пространство было выпущено 480 миллионов медных иголок длиной 2 см каждая. Рассеявшись вокруг Земли, они образовали “игольную сферу” на расстоянии  $3500 \div 3800$  км от её поверхности.

- С какой целью была создана “игольная сфера” вокруг Земли?



#### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

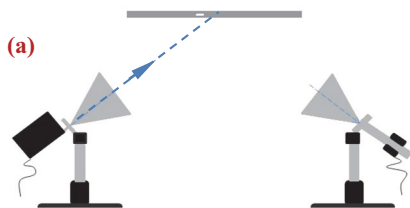
#### Какое физическое явление вы наблюдали?

**Оборудование:** вибратор сантиметровых волн, резонатор-приемник, металлическая пластина (из набора кабинета физики “Электромагнитные волны”), цифровой вольтметр.

**Ход работы:** 1. Подсоедините вибратор к сети переменного тока, а резонатор к вольтметру. Поместите приборы на расстоянии друг от друга, подняв рупоры под некоторым углом к горизонту. 2. Включите вибратор и следите за происходящим. 3. Перемещая металлическую пластину в вертикальном положении вправо-влево над рупорами, наблюдайте за происходящим явлением (а).

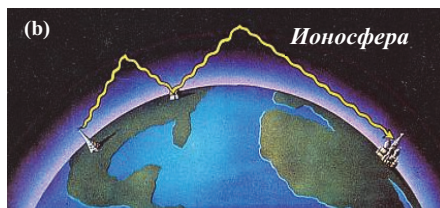
#### Обсуждение результата:

- В каком случае вольтметр зафиксировал возникновение напряжения в цепи резонатора?
- Какое физическое явление вы наблюдали в процессе эксперимента? Нарисуйте схему эксперимента в рабочем листке.



**Принципы радиосвязи.** Опыты, проведенные Герцем, заинтересовали многих ученых мира и привели к исследованию путей осуществления радиотелеграфной и радиотелефонной связи.

Передача информации азбукой Морзе с помощью радиосвязи впервые была продемонстрирована русским физиком Александром Степановичем Поповым (1859–1905) 7-го мая 1895 года (эта дата и ныне отмечается в России как *День радио*). В 1896 году итальянский изобретатель Гульельмо Маркони (1874–1937) продемонстрировал передачу радиосигналами нескольких букв азбуки Морзе с помощью созданного им передающего устройства и прием этого радиосигнала помещенным на расстоянии 3 км аппаратом. В 1901 году, используя отражение радиоволн от земной ионосферы, он реализовал передачу информации с территории Англии на диаметрально противоположную сторону Атлантического океана – приемный аппарат в США (б).



- Радиосвязь – это передача и прием информации (звук и изображение) с помощью электромагнитных волн.

В радиосвязи используются электромагнитные волны двух диапазонов:

1) низкочастотные волны – плохо распространяются в пространстве, однако несут информацию; 2) высокочастотные волны – распространяющиеся на очень большие расстояния в пространстве, но не несущие информации.

Основу радиосвязи составляют передающая сигналы радиостанция и принимающий эти сигналы радиоприемник.

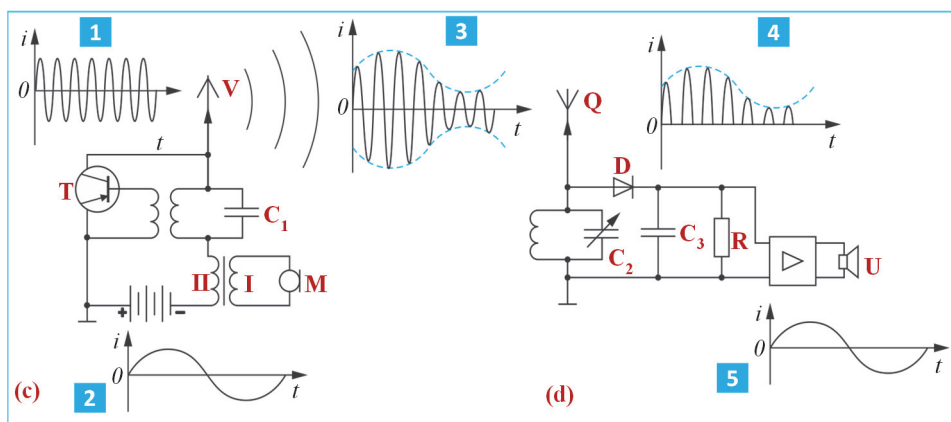
*В радиопередатчике происходят три основных процесса: 1) генерирование высокочастотных электромагнитных колебаний; 2) усиление этих высокочастотных колебаний до необходимой мощности; 3) изменение одного из параметров высокочастотных колебаний (амплитуды, частоты или фазы) в соответствии с передаваемой информацией.*

Согласно упрощенной схеме передающей станции **(с)** она состоит из генератора на транзисторе (Т), колебательного контура, цепи микрофона (М) и передающей антенны (V). Генератор создает незатухающие высокочастотные электромагнитные волны (см. **с, 1**). Затем эти высокочастотные колебания *модулируют* (3) поступающими с микрофона низкочастотными колебаниями (2).

• *Модуляция – изменение амплитуды (частоты, фазы) высокочастотных электромагнитных колебаний в соответствии с амплитудой (частотой, фазой) низкочастотных звуковых колебаний.*

Для осуществления амплитудной модуляции волн первичную обмотку трансформатора, подключенного к цепи передающей станции, подсоединяют к цепи микрофона, а вторичную обмотку к источнику в цепи генератора на транзисторе. В результате высокочастотные колебания в колебательном контуре станции модулируются сигналами звуковой частоты. Полученные модулированные сигналы с помощью антенны излучаются в пространстве (см: **с, 3**).

Согласно упрощенной схеме приемной станции (радиоприемника) он состоит из следующих основных частей **(д)**: принимающая антенна (Q), колебательный контур с конденсатором переменной емкости ( $C_2$ ), полупроводниковый диод – детектор (D), сглаживающий электрические сигналы конденсатор ( $C_3$ ) и телефон (или громкоговоритель) (U). Принимаемые антенной радиоприемника электромагнитные волны создают в колебательном контуре переменный индукционный ток.



Меняя емкость конденсатора в контуре, уравниваем частоту его собственных колебаний с частотой колебаний определенной принимаемой электромагнитной

волны. При этом резко возрастает амплитуда колебаний возникшего в контуре тока – возникает резонанс. В результате контур настраивается на прием сигнала определенной передающей станции. Далее осуществляется процесс отделения низкочастотных колебаний от принятых радиоприемником высокочастотных модулированных колебаний – детектирование (или демодуляция).

Демодуляция реализуется с помощью детектора (полупроводниковый диод). Ток, прошедший через детектор, превращается в односторонний *пульсирующий* ток (см: **d**, 4). Этот ток, пройдя через конденсатор  $C_3$  (фильтр), сглаживается. Сглаженный электрический сигнал превращается в колебания звуковой частоты (5), и они выводятся на громкоговоритель телефона (радио).

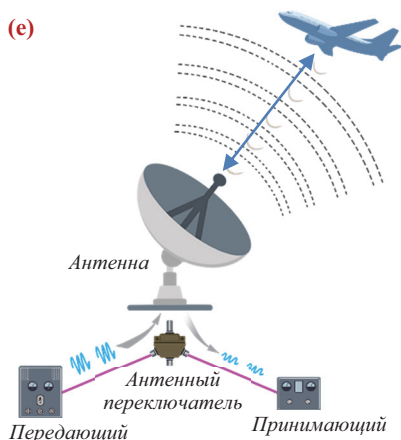
**Радиолокация.** Выполнив исследование 1, вы могли определить, что электромагнитные волны отражаются от металлических (проводящих) пластин. Физическую основу *радиолокации* составляет именно это свойство электромагнитных волн.

- Радиолокация – обнаружение различных объектов с помощью радиоволн.
- Устройство для определения расстояния до объекта с помощью радиоволн называется радиолокатором (или радаром).
- Радиолокатор – устройство, состоящее из радиопередатчика и радиоприемника ультракоротких волн (**e**).

Радиолокатор излучает радиоволны в виде коротких импульсов. В промежутке времени между двумя такими импульсами локатор автоматически превращается в антенну, принимающую отраженные от объекта сигналы. Таким образом, легко определяется расстояние ( $l$ ) до объекта, отразившего радиоволны:

$$l = \frac{c\Delta t}{2}.$$

Здесь  $\Delta t$  – промежуток времени между посланным локатором и принятым им сигналами.



#### ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2

**Задача.** Индуктивность катушки колебательного контура равна 3 мкГн, а ёмкость его конденсатора может меняться в интервале 50 пФ ÷ 500 пФ. Определите:

- пределы, в которых меняется собственная частота колебаний в контуре;
- радиоволны какой длины волны может принимать радиоприемник, антенна которого содержит в своей цепи такой контур.

#### Обсуждение результата:


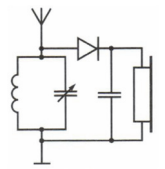
- От чего зависит частота колебаний в колебательном контуре?
- В каких пределах находятся длины радиоволн, которые может принять колебательный контур в цепи антенны приемника? Как вы это определили?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Иногда во время просмотра телевизионных программ вы можете наблюдать искажение изображения и посторонние шумы в звуковом сопровождении видеоматериала. Одновременно вы слышите звуки пролетающего над населенным пунктом самолета.

- Как вы можете объяснить причину происходящего явления?

### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Что такое радиосвязь и что составляет ее основу?			
2	Как в колебательном контуре передающей станции получают колебания силы тока, зависимость от времени для которых изображена на рисунке?			
3	На рисунке изображена упрощенная схема радиоприемника. Определите: а) элемент цепи, с помощью которого настраивается нужная частота волны; б) устройство, детектирующее колебания; в) устройство, превращающее электрические сигналы в звуковые.			
4	Сигнал, посланный локатором с поверхности Земли на космический межпланетный корабль, снова принят этим локатором через 4 минуты. На каком расстоянии от Земли находится корабль?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Принципы радиосвязи”.

**Проект.** Подготовьте электронную презентацию по теме “Применение радиоволн”.

### 3.10. ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

#### • Обсуждение проекта •

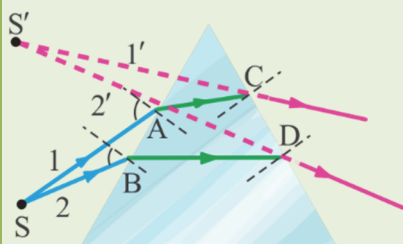
#### По группам

#### Обсуждение электронной презентации по теме “Применение радиосвязи”:

- На каком принципе основаны телевизионные передачи?
- Что такое радиорелейная связь?
- Как осуществляется космическая радиосвязь и что является её физической основой?
- Что такое фототелеграфная (факсимильная) связь и как она осуществляется?
- Что такое радиотелескоп, на чем основан принцип его работы и для каких целей его используют?

#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9



- Показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления этой среды. Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость света в этой среде меньше скорости света в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}$$

- Луч света, падающий на боковую грань треугольной призмы, отклоняется к основанию призмы.



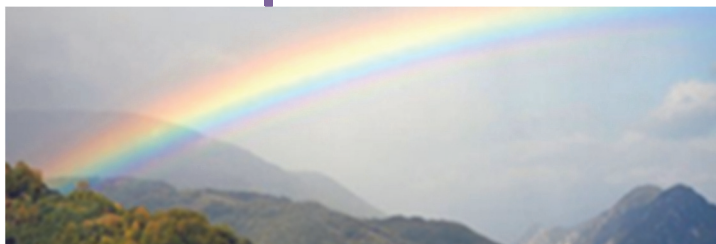
■ Уже несколько веков ученые стараются обосновать две разные взаимоисключающие гипотезы о распространении в пространстве света в форме волны, а другая в форме потока частиц.

● Какая гипотеза о природе света верна?

■ Иногда в солнечный день сразу после дождя, встав спиной к Солнцу, можно наблюдать радугу.

● Есть ли какая-либо закономерность в цветовой последовательности расположения полос в радуге?

● Почему радуга наблюдается не всегда?



#### ИССЛЕДОВАНИЕ 1 Из скольких цветов состоит белый цвет?

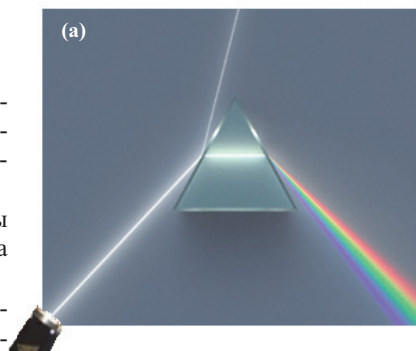
**Оборудование:** источник белого света (из набора “Оптическая шайба”), стеклянная призма, лист бумаги (серый, формат А4), учебник “Физика”.

**Ход работы:**

1. Положите учебник на стол и накройте его серым листом бумаги. Поместите призму на середину листа, как показано на рисунке.
2. Включите источник света и поместите его на столе таким образом, чтобы узкий пучок света, распространяясь по поверхности бумаги, падал на касающуюся бумаги грань призмы, как показано на рисунке (а). Внимательно следите за полученной картиной.

**Обсуждение результата:**

- Что вы наблюдали во время опыта?
- К какому выводу можно прийти на основе наблюдения явления разложения белого света на разные цвета после прохождения стеклянной призмы?
- Сколько составных лучей различного цвета вы насчитали после внимательного наблюдения за полученной картиной? Назовите их.
- Луч какого цвета испытывает большее преломление, проходя призму, а какой – меньшее преломление? Почему?



**Природа света.** Несколько веков имели место два разных представления о природе света: корпускулярная и волновая природа света.

Основоположителем представлений о корпускулярной природе света является И. Ньютон. Он считал, что свет является потоком частиц (корпускул). Прямолинейное распространение света и его отражение легко объяснялись согласно этому представлению.

Основоположителем представлений о волновой природе света является голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629–1695). Основной причиной возникнове-

ния этих представлений является прохождение световых лучей сквозь друг друга при распространении подобно волнам. В XIX веке английский ученый Томас Юнг (1773–1829) провел эксперименты, в которых обнаружил многочисленные факты, подтверждающие волновую природу света. Основоположник теории электромагнитного поля Дж. Максвелл теоретически обосновал электромагнитную волновую природу света. Согласно современным представлениям свет и другие электромагнитные волны обладают двойной – корпускулярной и волновой природой.

**Дисперсия света.** Одним из явлений, доказывающих волновую природу света, является дисперсия света.

• *Дисперсия света – это зависимость показателя преломления среды от частоты (длины волны) падающего света.*

Впервые это явление исследовал Исаак Ньютон. Он поместил прозрачную стеклянную треугольную призму на пути тонкого пучка солнечного света, попадающего в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставнях. Пройдя призму, солнечный луч разделился на *спектр* из семи составных цветных лучей. Последовательность цветов составных частей в дисперсионном спектре всегда одинакова: **красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.**

Среди *монохроматических (содержащих свет одного цвета)* лучей наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, а меньше других – красные (см: **а**). Причина явления объясняется на основе волновых представлений о свете. Так, абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость света в этой среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}.$$

Здесь  $\lambda_0$  – длина световой волны в вакууме,  $\lambda$  – длина световой волны в среде. Значит, подвергающийся наименьшему преломлению красный свет имеет наименьший показатель преломления. А это означает, что красный свет обладает наибольшей длиной волны (или наименьшей частотой). Фиолетовый свет, наоборот, обладает наибольшим показателем преломления и наименьшей длиной волны (или наибольшей частотой). Из проведенных в дальнейшем экспериментов было определено, что дисперсионный спектр видимого света охватывает в шкале электромагнитных волн часть с длинами волн от  $\lambda_k = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  (красный) до  $\lambda_\phi = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  (фиолетовый).

**Результат.** Таким образом, явление дисперсии показало, что белый свет обладает сложным строением – состоит из монохроматических световых лучей разного цвета. Каждый монохроматический луч света обладает собственной частотой и длиной волны. Поэтому при прохождении монохроматического луча через стеклянную призму он, только преломляясь, изменяет своё направление (не разлагается на составные, не меняет окраски). Если разложенный призмой свет, состоящий из монохроматических составляющих, направить на вторую перевернутую призму, то на выходе из второй призмы опять получится белый свет.

Согласно физике цвета, ни один из трех *основных цветов* – красный, зеленый и синий, не могут получиться при смешивании двух других. Однако смешиванием основных цветов можно получить все остальные цвета и их оттенки.



Многоцветное восприятие нами окружающего мира объясняется явлениями поглощения, преломления и отражения света. Например, лист бумаги воспринимается нашим зрением белым потому, что он отражает падающий на него белый свет полностью. Если тело полностью поглощает падающий на него свет, то он воспринимается как черный, например, сажа.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

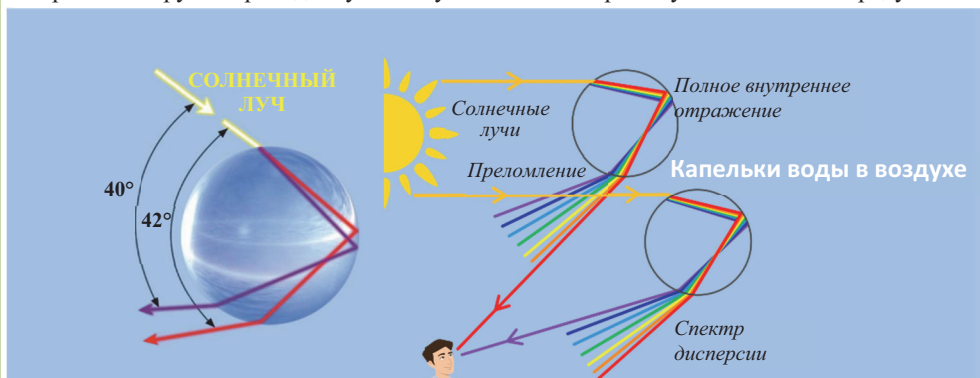
**Задача 1.** Составьте последовательность лучей дисперсионного спектра белого света в порядке возрастания скорости их распространения в стеклянной призме.

#### Обсуждение результата:

- Какой луч в дисперсионном спектре белого света распространяется в стеклянной призме с наибольшей скоростью, а какой – с наименьшей скоростью? Ответ обоснуйте.

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Проанализируйте приведенную схему и объясните причину возникновения радуги.



Из капель, находящихся на одинаковой высоте, в глаз наблюдателя попадает только один луч спектра.

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Почему стеклянная призма разделяет белый свет на спектральные составляющие?			
2	Как дисперсия света обосновывает её волновую природу?			
3	Как физика цвета объясняет зеленый цвет травы?			
4	Во сколько раз длина волны красного света дисперсионного спектра меньше длины радиоволны, частота которой равна 100 МГц?			
5	Во сколько раз длина волны фиолетового света дисперсионного спектра больше длины рентгеновской волны с частотой $10^{18}$ Гц?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Отметьте в рабочих листах основные понятия и их определения темы “Дисперсия света”.



### 3.11. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

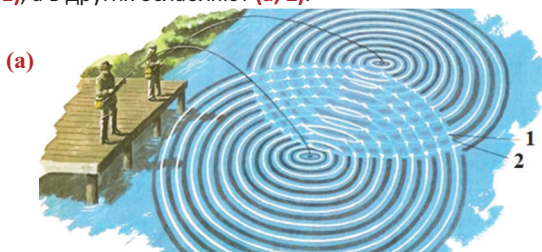
#### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 7 и 10

■ Самые часто встречаемые колебания в природе являются колебаниями в связанных системах. В связанных колебательных системах колебания передаются от одного звена системы другой. Например, бросив в воду камень, можно наблюдать распространение концентрических водных кругов из точки падения камня. Нам кажется, что происходит распространение воды в виде выпуклостей и впадин.

- Какая связанная система создает волну в воде?
- Какие явления происходят в среде при распространении волны?

■ Обратите внимание на картину, образованную на неподвижной поверхности воды поплавками удочек рыболовов (а). При встрече волн друг с другом происходит их сложение. В результате в определенных точках пространства они усиливают друг друга (а, 1), а в других ослабляют (а, 2).



- В каких случаях волны, встречаясь, усиливают друг друга, а в каких ослабляют?
- Происходит ли усиление и ослабление при встрече световых волн, излучаемых двумя различными источниками?

#### ИССЛЕДОВАНИЕ 1

Гасят ли друг друга волны при сложении?

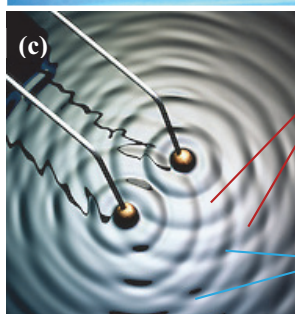
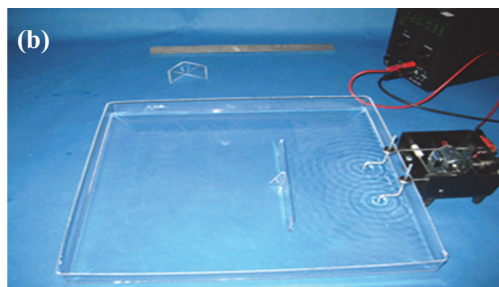
**Оборудование:** набор “волновая ванна” (неглубокая лабораторная ванна; генератор волн, снабженный двумя точечными источниками), вода (200 мл), мобильный телефон с фотокамерой.

**Ход работы:**

1. Налейте воду в ванну и установите генератор так, чтобы шарики на концах его палочек касались воды (b).
2. Включите генератор и внимательно следите за картиной сложения волн, образованных на поверхности воды. Сделайте фотоснимок наблюдаемой картины (c).

**Обсуждение результата:**

- Какую необычную закономерность в картине, полученной на поверхности воды при сложении двух волн, вы наблюдали? Чем ее можно объяснить?



Места  
усиления  
волны

Места  
ослабления  
волны

**Интерференция волн.** В исследовании вы наблюдали результат сложения когерентных волн, созданных на поверхности воды гармоническими колебаниями шариков генератора с одинаковой частотой.

• Когерентные волны – это волны, созданные различными источниками колебания, имеющими одинаковую частоту колебаний и постоянную разность фаз, не зависящую от времени.

Результирующие колебания, образованные сложением когерентных волн, в зависимости от разности между расстояниями от источника колебаний до точки их встречи или усиливаются, или ослабляются – происходит интерференция волн.

• Интерференция волн – усиление или ослабление амплитуды колебаний результирующей волны в результате сложения когерентных волн (лат. “интер” – взаимно, “ферио” – ударю).

Усиление или ослабление амплитуды результирующей волны определяется условиями максимума и минимума интерференции.

**Условие максимума интерференции.** Максимум интерференции наблюдается в точках пространства (поверхности), в которых максимумы складываемых волн накладываются друг на друга. Это зависит от разницы пройденных волнами путей от источника колебаний до этой точки.

• Интерференционный максимум результирующей волны образуется в точках, в которых разность хода складываемых волн равна нулю или четному числу полудлин волн (разность фаз равна нулю или четному количеству  $\pi$ ) (d):

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \cdot 2k. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta d = d_2 - d_1$  – разность путей, проходимых волнами до точки сложения (разность хода),  $k$  – порядок максимума, является целым числом:  $k = 0, 1, 2, \dots$

Между разностью фаз и разностью хода когерентных волн существует такая связь:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta d. \quad (2)$$

Учитывая выражение (1) в формуле (2), для разницы фаз максимума интерференции получим:

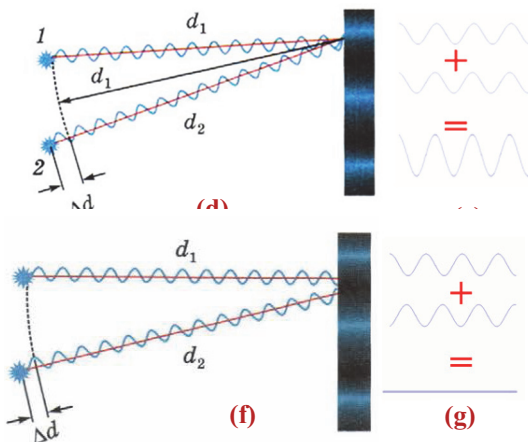
$$\Delta \varphi = \pi \cdot 2k. \quad (3)$$

В этом случае при равенстве амплитуд складываемых волн амплитуда результирующего колебания будет равна сумме амплитуд исходных волн (e):

$$x_{\max} = A + A = 2A. \quad (4)$$

**Условие минимума интерференции.** Минимумы интерференции наблюдаются в тех точках пространства, в которые волны доходят в противофазе. При этом максимум одной волны совпадает с минимумом другой. В результате волны ослабляют друг друга.

• Минимум интерференции наблюдается в точках, в которых разность



хода складываемых волн равна нечетному числу полудлин волн (разность фаз равна нечетному количеству  $\pi$ ) **(f)**:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \cdot (2k + 1); \quad (5)$$

$$\Delta\varphi = \pi \cdot (2k + 1). \quad (6)$$

Если при этом амплитуды складываемых волн равны, то в точке минимума интерференции амплитуда результирующей волны уменьшается до нуля **(g)**:

$$x_{\min} = A + (-A) = 0. \quad (7).$$

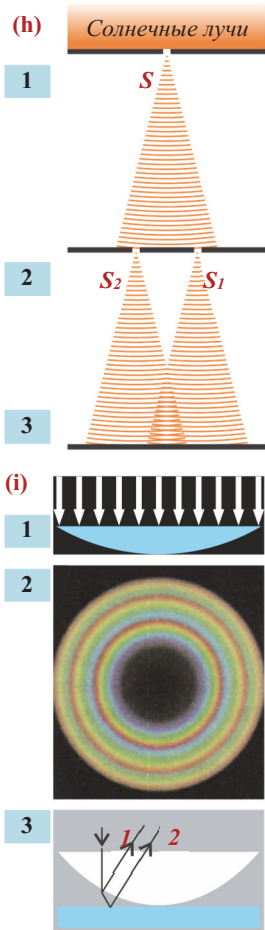
**Интерференция света.** Интерференция – характерное свойство всех видов волн, в том числе и световых. Так, две световые волны при сложении в пространстве могут усиливать или ослаблять друг друга, даже может случиться и такой вариант: **свет + свет = темнота**.

• **Интерференция света** – явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующих световых колебаний в разных точках пространства вследствие сложения двух когерентных световых волн.

Долгие годы не могли найти способ получения когерентных световых волн, поэтому невозможно было доказать способность световых волн интерферировать.

Только в начале XIX века с помощью несложного устройства Томас Юнг смог наблюдать интерференцию света **(h)**.

Классический опыт по наблюдению интерференции света состоит в следующем: солнечный свет освещает непрозрачный экран **1** и, пройдя через малое отверстие  $S$  в этом экране (проделанное булавкой), попадает на экран **2**. Световые лучи, вышедшие из малых отверстий  $S_1$  и  $S_2$  на втором экране, являются когерентными. В результате интерференции этих волн на экране **3** появляются интерференционные полосы. В центральной части экрана наблюдаются чередующиеся цветные и темные полосы. По мере удаления от центра интерференционная картина ослабевает. Используя условие максимумов в этих опытах, Юнг смог на основе формулы (1) измерить длины световых волн для разных цветов. Как ни странно, первый опыт по интерференции света был проведен отрицающим его волновую природу Исааком Ньютоном. Поместив на стеклянной пластине плоско-выпуклую стеклянную линзу выпуклой стороной вниз, он осветил её сверху **(i, 1)**. Посмотрев на линзу сверху, Ньютон увидел чередующиеся светлые и темные концентрические круги **(i, 2)**, которые впоследствии стали называть кольцами Ньютона. Но ни Ньютон, ни повторявшие этот интересный опыт в течение более чем 100 лет ученые не смогли объяснить причину возникновения этих колец. И только в 1802 году Юнгу удалось объяснить происхождение колец Ньютона. Он объяснил кольца Ньютона таким образом: когда пучок света падает на плоскую поверхность



линзы, то он, проходя сквозь нее, частично отражается от нижней сферической поверхности линзы (см. **i-3**, луч 1), а частично – от поверхности стеклянной пластинки, на которой лежит линза (см. **i-3**, луч 2). Вследствие такого многократного отражения образуются два когерентных луча. Эти лучи, складываясь, в соответствии с максимумами и минимумами интерференции создают интерференционную картину чередующихся темных и светлых концентрических кольца.

**Определение длины световой волны.** Представим, что расстояние между источниками когерентных волн  $S_1$  и  $S_2$  намного меньше расстояния от источников до экрана (**j**):  $l \ll L$ . В таком случае световые волны, исходящие из этих источников и дошедшие до точки экрана  $m$  с координатой  $y_m$ , можно считать параллельными. Разность хода между этими лучами:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = l \cdot \sin \alpha.$$

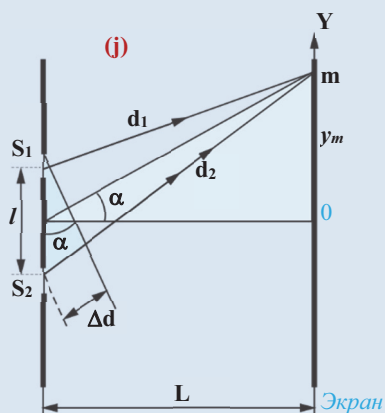
Вследствие малости угла  $\alpha$ :  $\sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{y_m}{L}$ .

Условие интерференционного максимума в этом случае будет:

$$l \cdot \frac{y_m}{L} = k\lambda.$$

Отсюда можно найти длину волны:

$$\lambda = \frac{l}{L} \cdot \frac{y_m}{k}.$$



#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Проведем наблюдение “колец Ньютона”.**

**Оборудование:** прибор “Кольца Ньютона”, белый лист бумаги (формат A5), мобильный телефон.

**Ход работы:**

1. Расположите прибор зажимами вверх на белой бумаге, разложенной на горизонтальной поверхности стола. В этом случае плоская поверхность линзы повернута к вам, и лучи, падающие на эту плоскость, можно считать параллельными (**k**).
2. Посмотрите на линзу сверху и сфотографируйте наблюдаемую картину.

**Обсуждение результата:**

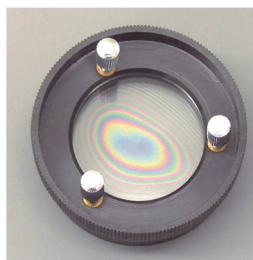
- Что вы наблюдали?
- Как можно объяснить большое темное пятно в середине и концентрические цветные и темные круги по краям, из которых состоят “кольца Ньютона”?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Вспомните мыльные пузыри, которые надували в детстве. Вспомните, как поверхности летающих в воздухе пузырей переливаются чередующимися цветными кольцами (**l**).

- Как можно объяснить возникновение цветных колец на поверхности мыльных пузырей?

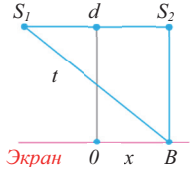
(к)



(l)



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какие волны называются когерентными? Как создаются когерентные световые волны?			
2	Две волны монохроматического излучения с разностью хода $\Delta d = 0,3\lambda$ интерферируют в определенной точке пространства. Определите разность фаз колебаний этих волн.			
3	Когерентные волны белого света падают на экран из источников $S_1$ и $S_2$ . Какая интерференционная картина наблюдается на экране? Какие части этой картины более освещены? Почему?			
4	Определите порядок интерференционного максимума, полученного в точке, в которой разность хода двух когерентных волн равна $\Delta d = 5\lambda$ .			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Явление интерференции”.

**ПРОЕКТ.** Подготовьте реферат по теме “Применение интерференции”.

## 3.12. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

Физика – 7 и 10

- Световой луч – линия, вдоль которой распространяется световая энергия.

Световые лучи бывают параллельные, дивергентные (расходящиеся) и конвергентные (сходящиеся). Лучи, падающие на земную поверхность из источников, находящихся на очень больших расстояниях, например, от Солнца, звезд, Луны, принято считать параллельными.

- Свет в вакууме и однородной среде распространяется прямолинейно.
- Однородной называется среда, в которой её свойства по всему объёму одинаковы.
- Образование тени является результатом прямолинейного распространения света.

- Прогуливаясь на природе, вы возможно обращали внимание на паутину, искусно сплетенную пауками. Иногда она привлекает внимание, поблескивая всеми цветами радуги.



- Каким свойством света объясняется образование спектра при освещении паутины белым (солнечным) светом?
- Какая связь полученного спектра с волновой природой света?



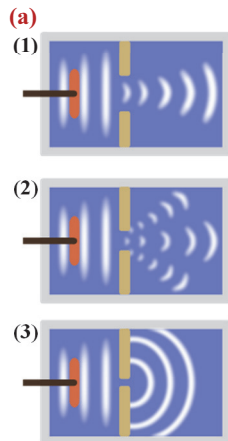
**Что происходит при встрече волны с препятствием?**

**Оборудование:** набор “волновая ванна” (неглубокая лабораторная ванна; генератор волн, снабженный горизонтальной палочкой; плоские пластины); вода (200 мл); мобильный телефон с фотокамерой.

**Ход работы:** 1. Включите генератор и наблюдайте образовавшуюся на поверхности волны. 2. На пути распространения волны поместите две пластины так, чтобы между ними осталась щель (а). Обратите при этом внимание на то, как распространяется прошедшая через щель волна (а, 1). 3. Уменьшая постепенно ширину щели, следите за изменением формы распространения волны (а, 2 и 3). Сфотографируйте распространение волны, образованной на поверхности воды за щелью.

**Обсуждение результата:**

- Волна какой формы образовалась на поверхности воды в результате колебаний горизонтального стержня?
- Что вы наблюдали, поместив на пути распространения волны преграду с щелью?
- Как менялась форма волны при уменьшении размера щели?
- К какому выводу о свойстве волны приходим в результате проведенного опыта?



**Волновая поверхность и фронт волны.** Закономерности распространения любых волн в разных средах носят универсальный характер. Например, колебания, созданные в точке падения капли на неподвижной водной поверхности, распространяются с течением времени с одинаковой скоростью, охватывая определенную часть среды (b). С течением времени волна, продолжая распространяться, возмущает еще большую часть водной поверхности. Значит, в процессе распространения волны поверхность воды (среда) состоит из части, в которой волна распространилась, и части, в которой еще не распространилась. Линия, отделяющая эти части волны, называется волновой поверхностью.

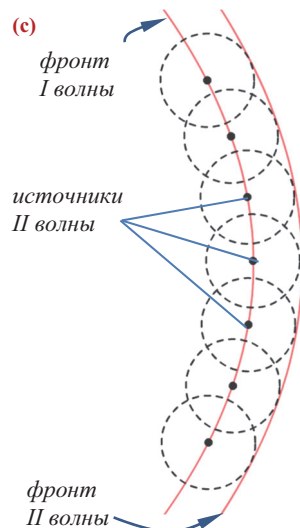
• Волновая поверхность – геометрическое место точек, до которых в данный момент времени дошла волна.

Определенный набор частиц среды, в которой распространяется волна, колеблется в одинаковой фазе. Поверхность, во всех точках которой колебания происходят в одинаковой фазе, называют поверхностью одинаковой фазы, или фронтом волны.

• Фронт волны – геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах.

Фронт волны, являясь геометрической концепцией, создает представление о поверхности, проходящей через точки, колеблющиеся в одинаковых фазах (c). Значение фазы колебаний различных последовательных точек среды при распространении волны в ней может иметь различное значение, поэтому в этой среде может одновременно существовать бесконечное количество фронтов волны.

• Волна, фронт которой представляет собой плоскость, называется плоской волной, а волну с фронтом сферической или цилиндрической формы называют соответственно сферической или цилиндрической волной.



Плоская волна распространяется в направлении, перпендикулярном плоскому фронту волны.

**Дифракция волн. Принцип Гюйгенса.** Одним из общих свойств, присущих всем видам волн, является их дифракция.

- Дифракция волн – явление отклонения волны от геометрического направления распространения при встрече с препятствием (огибание препятствий, проникая за их края).

Огибание волной препятствий связано с соотношением размера препятствия  $s$  длиной волны. Явление дифракции наблюдается при соблюдении соотношения:

$$l \geq \frac{D^2}{\lambda}.$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны,  $D$  – размер препятствия (или щели) на пути волны,  $l$  – расстояние от препятствия до точки, в которой наблюдается дифракция.

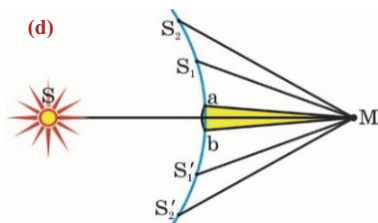
Дифракцию можно объяснить на основе принципа, сформированного Гюйгенсом в 1690 году. Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка среды, до которой доходит фронт волны, превращается в источник полусферических волн с частотой колебаний, равной частоте колебаний исходной волны. Касательная к этим сферическим волнам (их называют вторичными волнами) представляет собой новый фронт волны в следующий момент времени (см. с).

Так как направление распространения волны перпендикулярно фронту волны, можно определить луч – это направление распространения волны в любой последующий момент времени.

- Луч – это нормаль, проведенная к фронту волны в данной точке.

Таким образом, дифракция объясняется с позиций принципа Гюйгенса следующим образом: представим, что на пути волны есть препятствие с щелью, перпендикулярное фронту волны. Вторичные полусферические волны, образованные в точках щели, когда волна доходит до препятствия, проникают за края препятствия – происходит явление дифракции. Но принцип Гюйгенса дал возможность решить проблемы, только связанные с направлением распространения фронта волны, он не смог объяснить изменение амплитуды, а значит, интенсивности распространяющейся по всем направлениям волны. Эта проблема была решена французским физиком Огюстеном Френелем (1788–1827) в 1819 году, определившим и объяснившим дифракцию света.

**Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция света.** Согласно Френелю, развившему принцип Гюйгенса, все точки фронта волны являются источниками когерентных вторичных волн ( $S_1, S_2, S'_1, S'_2$  и т.д.). Поэтому дифракция света является результатом интерференции – сложения в произвольной точке М когерентных волн, идущих из этих когерентных источников (d).



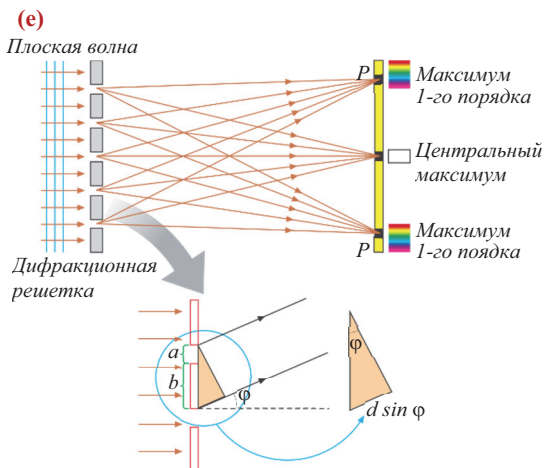
- Дифракция света – явление отклонения от закона прямолинейного распространения света при прохождении вблизи препятствий и попадания в зону геометрической тени. Принцип Гюйгенса, дополненный Френелем принципом интерференции, называется принципом Гюйгенса-Френеля.

Этот (обобщенный) принцип позволил объяснить дифракцию количественно. Длина световой волны очень мала, поэтому дифракция света наблюдается при прохождении света сквозь щели очень малого размера или у края предметов. Поэтому для наблюдения и количественного исследования дифракции света используют специальное устройство, называемое дифракционной решеткой (e).



• Дифракционная решетка – оптический прибор, разлагающий свет на спектр и позволяющий измерять длину световой волны.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа непрозрачных штрихов, разделенных очень узкими прозрачными полосками (обычно на 1 мм прибора приходится от 500 до 1200 таких штрихов). Лучи света, падающие на дифракционную решетку перпендикулярно её поверхности, проходя сквозь прозрачные полоски, выходят отклоняющимися на некоторый угол ( $\varphi$ ). Эти полоски, являясь источниками когерентных волн, распространяют световые волны по всем направлениям. В результате интерференции этих волн на экране образуются дифракционные максимумы и минимумы (см. е).



Условие максимума для дифракционной решетки будет иметь вид:

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda. \quad (1)$$

Здесь  $d$  – период дифракционной решетки (или постоянная решетки), равная  $d = a + b$ ,  $a$  и  $b$  – ширина соответственно щели и непрозрачных штрихов,  $\varphi$  – угол отклонения лучей, дающий максимум  $k$ -го порядка ( $k$  – порядок максимума – порядковый номер максимума от центра картинки). Максимальное значение  $k$  соответствует углу отклонения  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\sin 90^\circ = 1$ , получаем:

$$k_{\max} = \frac{d}{\lambda}. \quad (2)$$

Все максимумы прошедшего через дифракционную решетку белого света (за исключением центрального, нулевого) получаются цветными. Начиная с центра, каждый максимум отражает 7 видимых цветов от фиолетового до красного. Это называют дифракционным спектром. В отличие от дисперсионного спектра полученные в дифракционном спектре более всего отклоняются красные лучи, менее всего отклоняются лучи фиолетового цвета.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Какое соотношение между длинами волн лучей спектра?**

**Задача.** На рисунке показана определенная часть интерференционной картины, полученной на экране в результате дифракции белого света с помощью дифракционной решетки.



На основе этой картинки определите: а) что означает белая полоска в левой части? б) в какой последовательности расположены интерференционные максимумы? в) каково соотношение между максимумами различных цветов, видимых в дифракционном спектре?

**Обсуждение результата:** • Как выглядит на экране центральный максимум, полученный в результате дифракции белого света дифракционной решеткой? • Сколько максимумов дифракции белого света с помощью дифракционной решетки изображено на рисунке? • Как отличаются последовательности расположения лучей в дифракционном и дисперсионном спектрах в соответствии с длинами их волн?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Наверно вы обращали внимание: звуки мотора движущегося автомобиля за углом дома, “огибая” дом, доходят до нас, и мы их слышим, однако это не происходит с лучами, отраженными от автомобиля, то есть мы его не видим. Почему?

### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	В чем состоит значение явления дифракции?			
2	Какой закон геометрической оптики нарушается при дисперсии света?			
3	Почему дифракцию света удобно наблюдать с помощью дифракционной решетки?			
4	Падающий на дифракционную решетку белый свет создает на экране чередующиеся цветные и темные максимумы и минимумы. Почему?			
5	Определите порядок максимума дифракционной решетки, если $\varphi = 45^\circ$ и $d = \sqrt{2} \lambda$ .			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Дифракция света”.

## 3.13. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

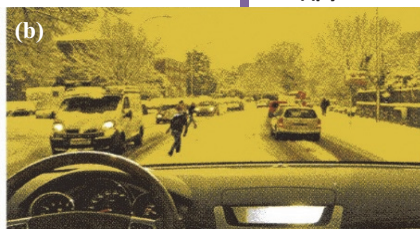
Физика – 10

В результате распространения волн в среде происходят следующие явления:

- а) колебательное движение частиц среды, в которой распространяется волна: частицы среды совершают только колебания около положения равновесия, и в волне не происходит перенос вещества;
- б) взаимодействие частиц среды с соседними частицами: в результате взаимодействия частиц среды происходит перенос энергии.
- Поперечная волна – это волна, колебания частиц среды в которой происходят перпендикулярно направлению распространения волны. Поперечные волны могут распространяться в твердых средах и на поверхности жидкостей. Поперечные волны распространяются в среде в виде выпуклостей и впадин.

- Свет, отраженный от белого снега зимой, и свет фар встречных автомобилей ночью беспокоят водителей (а) и иногда становятся причиной дорожно-транспортных происшествий. Водителям рекомендуют в таких ситуациях пользоваться поляроидными очками, которые обеспечивают нормальное видение предметов вокруг (б).

- Какими оптическими особенностями отличаются поляроидные очки от других?



### Почему свет стал невидимым?

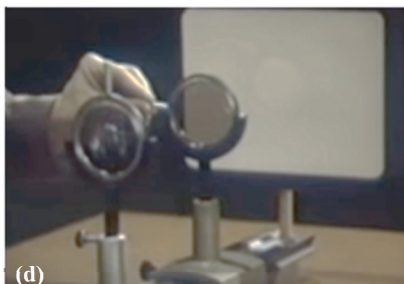
**Оборудование:** два поляроида из набора “Волновые свойства света”, проектор (источник света), экран и подставка.

#### Ход работы:

1. Поместите проектор и экран на диаметрально противоположных концах подставки, а один из поляроидов между ними.
2. Включите проектор и направьте свет на поляроид. Вращая поляроид внутри насадки то в одну, то в другую сторону **(с)**, следите за изменениями яркости светящегося круга на экране.
3. Поместите второй поляроид между первым поляроидом и экраном так, чтобы ручки обоих поляроидов были направлены вертикально вверх. Затем, вращая второй поляроид внутри насадки, следите за яркостью светового пятна на экране **(d)**.

#### Обсуждение результата:

- Какие изменения в яркости светового пятна на экране вы наблюдали в опыте с одним поляроидом?
- Что необычного наблюдалось во время опыта с двумя поляроидами? Как можно объяснить причину возникновения этого явления?



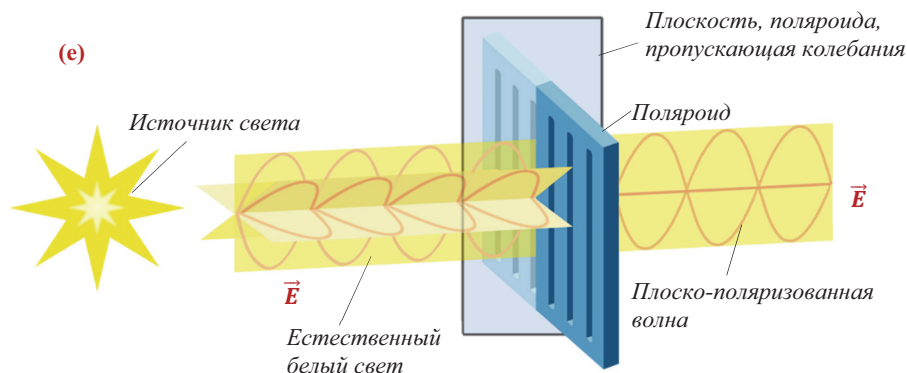
Одним из важнейших результатов теории Максвелла стало то, что свет является поперечной электромагнитной волной. Согласно этой теории, свет, являясь электромагнитной волной, представляет собой распространение в пространстве колебаний векторов напряженности электрического и индукции магнитного полей ( $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ ). Эти колебания происходят по всем направлениям в плоскостях, перпендикулярных друг другу и направлению скорости распространения **(е)**. Например, белый свет, излучаемый Солнцем, является естественной световой волной.

Явления интерференции и дифракции наблюдаются и в продольных, и в поперечных волнах, поэтому с их помощью невозможно определить поперечность световых волн. Однако существует другое оптическое явление, с помощью которого это можно подтвердить. Это явление поляризации света.

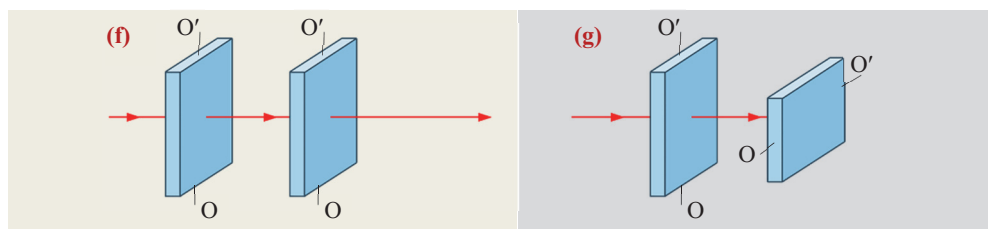
• *Поляризованный свет – часть естественного света, отделенная от него специальным приспособлением, в которой колебания вектора  $\vec{E}$  происходят в определенной плоскости **(см. е)**.*

Одним из таких приспособлений, поляризующих свет, является кристалл турмалина. Один из опытов, проведенных с помощью кристаллов турмалина, заключается в следующем: на пластину турмалина направляют перпендикулярный луч белого света. На первый взгляд кажется, что прошедший через него свет не изменяется. Но на самом деле кристалл турмалина пропускает свет, в котором вектор  $\vec{E}$  колеблется только в одной определенной плоскости М **(см. е)**. Значит, через

пластину турмалина проходит плоскополяризованный свет. Такая пластина называется *поляроидом*. Чтобы проверить, действительно ли поляризован свет, перед прошедшим через поляроид свет ставят вторую такую же пластину – *анализатор*.



Становится понятно, что свет полностью проходит сквозь обе пластины, когда оси  $OO'$  поляроида и анализатора параллельны (f). При изменениях угла между осями пластин в пределах  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  наблюдается уменьшение интенсивности проходящего сквозь них света – частичное прохождение света. Но когда оси  $OO'$  перпендикулярны друг другу, свет не проходит сквозь анализатор (g).



#### ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2 Моделирование поляризации волн

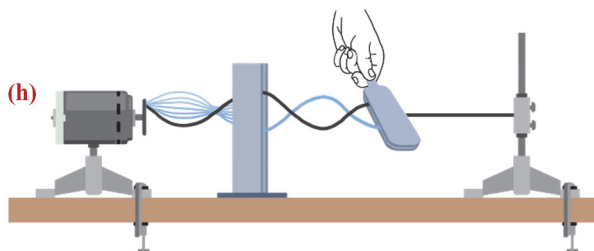
**Оборудование:** небольшой электродвигатель с редуктором, резиновый шнур, узкая коробка со сквозным отверстием (2 штуки), штатив.

**Ход работы:**

1. Пропустив резиновый шнур сквозь коробки, привяжите один его конец к диску двигателя, а другой к штативу. Прикрепите двигатель и штатив к столу.
2. Включите двигатель и проследите за прохождением колебаний шнура во всех направлениях через отверстие коробки “поляроида”.
3. На пути образованной в шнуре волны поместите вторую коробку – “анализатор”. Повторите опыт, меняя угол между отверстиями ящиков (поляроидом и анализатором) в пределах:  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ . Наблюдайте изменения, происходящие в колебаниях шнура (h).

### Обсуждение результата:

- Какие изменения колебаний шнура наблюдались после его прохождения через “поляроид”?
- К какому выводу вы пришли после опыта с двумя ящиками?



### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Поляризационный фильтр – очень полезный аксессуар фотоаппаратов и фотокамер. Нынче невозможно представить фотосъемку пейзажей без поляризационных фильтров, поэтому пейзажисты никогда не снимают его с объектива аппарата. Поляризационный фильтр убирает блики отраженного света, обеспечивает ясное видение предметов под водой.

- Как поляризационный фильтр обеспечивает ясную картину пейзажа?
- Где еще можно использовать такие фильтры?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Почему солнечный луч не является поляризованным?			
2	Какие световые волны называются поляризованными?			
3	Чтобы свет фар встречных автомобилей не затмевал глаза водителей, и фары, и лобовое стекло автомобилей покрывают тонким поляризационным слоем. Как располагаются направления поляризации на фарах и лобовом стекле: в одинаковых направлениях или под углом $90^\circ$ друг к другу?			
4	Если рассматривать ясное небо сквозь поляроид, можно наблюдать уменьшение интенсивности проходящего света при повороте поляроида. Однако это явление не наблюдается при рассмотрении через поляроид облаков. Как вы можете объяснить это?			

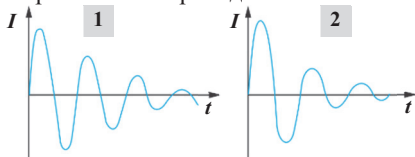
**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте карту понятия “Световые волны”.

**ПРОЕКТ.** Напишите реферат на тему “Применение поляроидов”.

3.1. В колебательном контуре, состоящем из конденсатора и катушки, происходят электромагнитные колебания. Как изменится период электромагнитных колебаний в контуре, если к его конденсатору подсоединить параллельно еще три конденсатора с такой же емкостью?

3.2. Емкость конденсатора колебательного контура равна  $2 \text{ мкФ}$ , индуктивность его катушки равна  $80 \text{ мГн}$ . Вычислите период и частоту электромагнитных колебаний, созданных в контуре ( $\pi = 3$ ).

3.3. На рисунке приведены графики колебаний зависимости силы тока в двух простых колебательных контурах. В каком из контуров сопротивление проводов больше?



3.4. Частота, созданных в колебательном контуре электромагнитных колебаний, равна  $50 \text{ кГц}$ . Во сколько раз следует увеличить расстояние между пластинами конденсатора, чтобы создать в колебательном контуре колебания с частотой  $120 \text{ кГц}$ ?

3.5. Через какой промежуток времени в колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $5 \text{ мкФ}$  и катушки индуктивностью  $200 \text{ мГн}$ , энергия электрического поля полностью превратится в энергию магнитного поля ( $\pi = 3$ )?

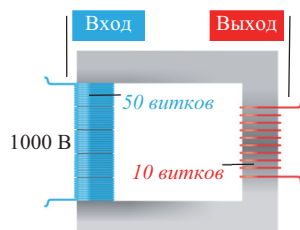
3.6. Чему равна сила тока в цепи переменного тока частотой  $50 \text{ Гц}$ , если индуктивность катушки в ней равна  $0,05 \text{ Гн}$ , а показания вольтметра  $210 \text{ В}$  ( $\pi = 3$ )?

3.7. Цепь, состоящая из катушки индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$  и последовательно соединенного резистора сопротивлением  $25 \text{ Ом}$ , подсоединена к источнику переменного тока с частотой  $50 \text{ Гц}$ . Определите значение силы тока в катушке в момент времени, когда напряжение на его концах будет равно  $120 \text{ В}$  ( $\pi = 3$ ).

3.8. На рисунке показана цепь переменного тока, содержащая два конденсатора. На основе приведенных на рисунке данных вычислите показания мультиметров и сопротивление системы конденсаторов.

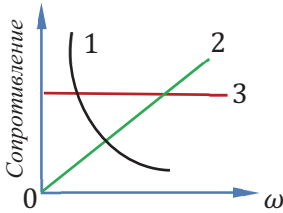


3.9. Определите напряжение на выходе показанного на рисунке трансформатора.





- 3.10. На рисунке приведены графики зависимости активного, емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты переменного тока. Какими цифрами обозначены эти зависимости?

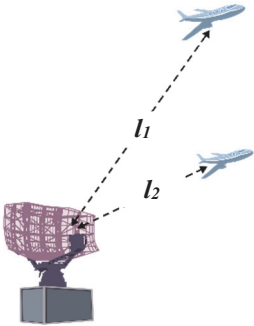


- 3.11. Частота вырабатываемого в нашей стране переменного тока равна  $50 \text{ Гц}$ . Сколько оборотов в минуту должен совершать ротор гидроэлектростанции с 24 парами полюсов, чтобы получить такую частоту?

- 3.12. На каком интервале частот работает радиоприемник, состоящий из катушки, индуктивность которой меняется в пределах  $0,1 \div 10 \text{ мкГн}$ , и конденсатора, емкость которого меняется в пределах  $50 \div 5000 \text{ пФ}$ ?

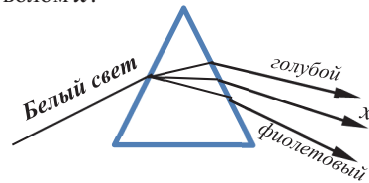
- 3.13. Первый радиосигнал был послан в 1895 году А.С. Поповым на расстояние 250 метров. За какое время этот сигнал преодолел это расстояние?

- 3.14. Радиолокатор работает в импульсном режиме с частотой  $1700 \text{ Гц}$ . Продолжительность каждого импульса  $0,8 \text{ мкс}$ . На каком наибольшем ( $l_1$ ) и наименьшем ( $l_2$ ) расстоянии радиолокатор может определить цель?



- 3.15. Не все цвета монохроматичны. Определите среди приведенных не являющиеся монохроматичными: белый, красный, желтый, серый, синий, оранжевый, черный, зеленый.

- 3.16. Луч какого цвета отмечен на рисунке символом  $x$ ?



- 3.17. Определите порядок максимума интерференции, полученного в точке, в которой разность хода двух когерентных волн равна  $5\lambda$ .

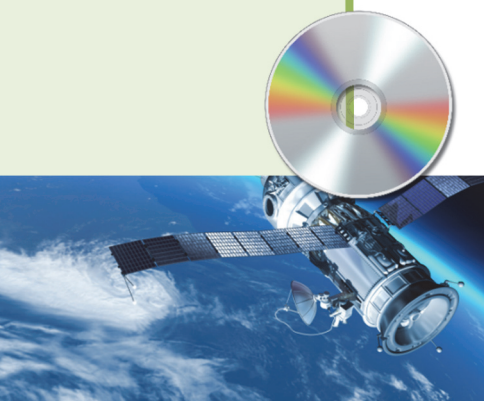
- 3.18. Выберите выражения, верные для когерентных волн:

- 1 — длины волн одинаковы;
- 2 — частоты разные;
- 3 — разность фаз постоянна, не зависит от времени;
- 4 — длины волн разные;
- 5 — разность фаз переменна, зависит от времени;
- 6 — частоты одинаковы.

- 3.19. На поверхность дифракционной решетки, которая имеет 500 штрихов на  $1 \text{ мм}$ , перпендикулярно поверхности падает монохроматический свет длиной волны  $500 \text{ нм}$ . Спектры скольких порядков будут наблюдаться на экране?

- 3.20. Волны, полученные с помощью дифракционной решетки для видимого спектра второго и третьего порядков, частично перекрываются. Волна какой длины в спектре третьего порядка соответствует волне длиной  $700 \text{ нм}$  в спектре второго порядка?

## • АТОМНАЯ ФИЗИКА



- Информация на оптических дисках записывается на мельчайших выемках спиралевидных дорожек. При вращении диска в компьютере или в плеере лазерный луч скользит вдоль этой дорожки. Лучи, отраженные от поверхности дорожки, попадают в специальное устройство. Там возникает явления фотоэффекта – световой луч превращается в электрические сигналы. Эти сигналы в компьютере снова превращаются в видео- и звуковую информацию. Фотоэффект широко применяется в космических кораблях, метро и др. областях.

- Что представляет собой явление фотоэффекта?
- Какова связь этого явления с физикой?

Самым верным способом проверки, проводились ли на определенной территории ядерные испытания, является обнаружение на этой территории радиоактивного загрязнения, состоящего из радиоактивного цезия  $^{137}_{55}\text{Cs}$  и стронция  $^{90}_{38}\text{Sr}$ . Эти изотопы не существовали в природе до применения ядерного оружия в 1945 году. Например, во время аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглась на 70% территории Украины, Беларуси и России – всего 200 000 км<sup>2</sup>. Более всего загрязнение затронуло леса. Из-за непрерывной циркуляции радиоактивного изотопа цезия-137 грибы и ягоды в лесах, а также мясо и молоко живущих там диких животных до сих пор считаются опасными для употребления.

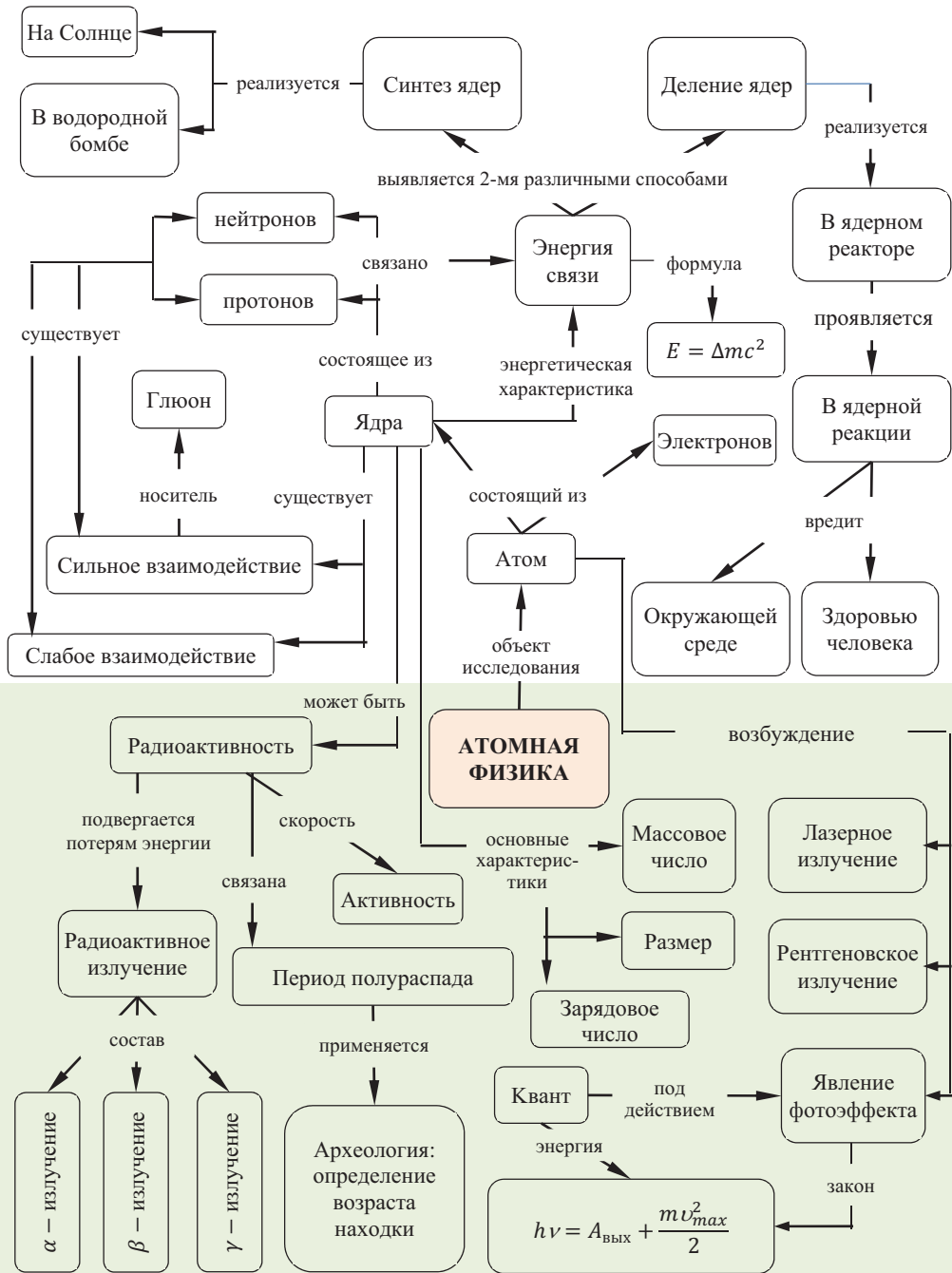
- Почему после ядерных испытаний на окружающей территории появляются изотопы цезия-137 и стронция-90?



В 2008 году завершилась постройка Большого Адронного Коллайдера (БАК), длина основного кольца которого равна 26659 м. В БАК, на строительство которого было потрачено 10 миллиардов евро, осуществилось столкновение ускоренных протонов с энергией 7 ТэВ. В результате внутри БАК стало возможным получение температуры, в тысячи раз больше температуры внутри Солнечного ядра.

- Почему проводятся такие дорогостоящие эксперименты?
- Каких целей добиваются ученые этими экспериментами?

## “Карта понятий” главы



## 4.1. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОТОН

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 8, 9 и 10

• При совершении механической работы над телом его внутренняя энергия возрастает, если тело само совершает работу, его внутренняя энергия уменьшается.

• Процесс передачи тепла от более нагретого тела (или более нагретой части тела) менее нагретому (или менее нагретой части тела) называется теплопередачей. Существует 3 вида теплопередачи: теплопроводность, излучение и конвекция. При конвекции между частями тела происходит перенос вещества и энергии. Теплопроводность и излучение являются процессами переноса только энергии.

• Процесс переноса энергии от одной части тела к другой его части или от одного из соприкасающихся тел другому называется теплопередачей. При достижении равенства температур говорят, что между ними установилось тепловое равновесие.

• Излучение – передача энергии от одного тела другому с помощью лучей (видимых и невидимых). Самым мощным естественным источником излучения для планеты Земля является Солнце, которое излучает и свет, и тепло.

Энергия излучения одного тела, достигнув поверхности другого, частично поглощается этой поверхностью, частично отражается от нее. Внутренняя энергия тела, поглощающего энергию излучения, увеличивается – тело нагревается. Поверхности разного цвета обладают различной поглощающей и отражающей способностью. Так, темные поверхности лучше поглощают энергию излучения, а светлые поверхности лучше отражают её. Механизм излучения и поглощения телами энергии объясняется внутренним строением атомов, из которых тела состоят. Согласно планетарной модели, предложенной Резерфордом, в центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого по круговым орбитам вращаются электроны. Однако эта модель не смогла объяснить стабильное существование атома, так как по законам классической физики движущийся по круговой орбите электрон должен излучать энергию. Излучающий энергию электрон должен постепенно переходить на более близкие к ядру орбиты и, в конечном счете, упасть на ядро – существованию атома должен наступить конец. Но на самом деле атом существует как устойчивая система. Выход из этого затруднительного положения, которое никак не мог объяснить Резерфорд, был найден датским ученым Нильсом Бором (1885-1962) в 1913 году и выражен двумя постулатами.

**Первый постулат:** атомная система может существовать только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарных состояниях атом не излучает и не поглощает электромагнитные волны.

**Второй постулат:** излучение происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией. При этом электрон переходит с дальней орбиты на орбиту, близкую к ядру. И наоборот, поглощение атомом энергии сопровождается переходом атома из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией. Электрон при этом переходит с ближней к ядру орбиты на более отдаленную от него орбиту.

Вода, льющаяся в стакан, на первый взгляд кажется непрерывной – она льется в форме потока, и в любой момент этот поток можно прервать. Сахарный песок тоже кажется сплошным при пересыпании, однако рассматривая отдельные его кристаллики, перетаскиваемые муравьями в муравейник, видим дискретность сахарного песка, состоящего из кристалликов. Значит, произвольное тело, в зависимости от условий, может быть (выглядеть) сплошным или дискретным. На самом деле мы все знаем, что все тела дискретны и состоят из атомов и молекул.



• Интересно, непрерывен или дискретен процесс излучения?

### Что является причиной вращения лопастей?

**Оборудование:** радиометр Крукса. Он представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух, внутри которого 4 тонкие и легкие металлические лопасти могут вращаться на острие иглы (а).

### Ход работы:

1. Поместите радиометр на освещенный солнцем подоконник и следите за происходящими в нем изменениями.
2. Радиометр удалите от окна и поместите на стол, на который не попадают солнечные лучи, и продолжайте наблюдения.

### Обсуждение результата:

- Что вы наблюдали во время опыта?
- К какому выводу можете прийти в результате наблюдений?



**Гипотеза Планка.** Исследуя условия теплового равновесия между веществом и излучением, ученые обнаружили серьезные расхождения между теорией и результатами экспериментов. Так, согласно электромагнитной теории Максвелла, тепловое равновесие между веществом и излучением возможно только при абсолютном нуле температуры ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Это значит, что если температура тела выше абсолютного нуля, то оно должно будет непрерывно передавать свою внутреннюю энергию электромагнитному полю, т.е. излучать электромагнитные волны, охлаждаясь до температуры абсолютного нуля. Если бы так происходило в действительности, то все тела во Вселенной, в том числе и Солнце, отдав свою энергию электромагнитному полю, давно охладились бы до температуры  $-273^{\circ}\text{C}$ . Однако опыты и измерения показывают, что тепловое равновесие между веществом и излучением существует при любых температурах и создается путем излучения и поглощения телом электромагнитных волн.

В декабре 1900 года немецкий ученый Макс Планк (1858-1947) выступил в Немецком физическом обществе и, выдвинув новую гипотезу, внес серьезные поправки в теорию, которая противоречила эксперименту.

Согласно гипотезе Планка:

• *Излучение электромагнитной энергии атомами не является непрерывным процессом, а носит дискретный характер. Энергия излучается малыми порциями – квантами (лат. quantum – “число, количество”). Энергия кванта (впоследствии его назвали **фотоном**) прямо пропорциональна частоте излучения::*

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Здесь  $h$  – коэффициент пропорциональности, *постоянная Планка* – основная постоянная квантовой теории, значение которой определено экспериментально:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$



Эйнштейн обосновывал эту гипотезу, утверждая, что дискретность заключена не в механизме излучения (или поглощения), а вытекает из дискретного строения самого излучения – то есть излучение само состоит из квантов (порций).

**Свойства фотона (кванта).** Согласно современным представлениям фотон обладает следующими свойствами:

1. Фотон не существует в атоме в свободном состоянии, он возникает при изменениях энергетических состояний электронов в атоме.
2. По времени жизни фотон – устойчивая частица.
3. Фотон является неделимой частицей – его составные частицы не обнаружены.
4. Фотон электрически нейтрален и его взаимодействие с другими фотонами не обнаружено.
5. Скорость фотона в любой системе отсчета постоянна и равна скорости света в вакууме:  $c = \text{const} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .  
Скорость фотона не зависит от его энергии.
6. Фотон обладает импульсом. Согласно теории относительности импульс фотона:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Эта формула “узаконивает” двойственную природу (дуализм) света: то есть свет является и потоком частиц (фотонов), обладающих импульсом, и электромагнитной волной длиной  $\lambda$ . Таким образом, выражение (2) подтверждает фундаментальную закономерность – волновой и корпускулярный дуализм материи. Наличие импульса у фотона впервые экспериментально наблюдал английский физик и химик Вильям Крукс (1832-1919) с помощью изготовленных им вакуумных весов. Этот прибор, называемый “радиометром Крукса”, приходит в движение под действием импульсов фотонов (см. а).

7. При взаимодействии с веществом фотон может поглощаться, рассеиваться и способствовать возникновению новых фотонов.

8. В поле ядра фотон может превратиться в пару электрон – позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^{-1} + e^{+1}.$$

Это превращение подтверждает другую фундаментальную закономерность, подтверждающую существование взаимной связи между веществом и физическим полем.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

#### Чему равна энергия кванта?

**Задача.** Чему равна энергия кванта видимого света длиной волны  $\lambda_{\text{свет}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ )?

**Обсуждение результата:**

- Каково соотношение между энергией кванта и длиной его волны? Как вы определили это соотношение?



### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

На уроке Назрин и Ахмед обсуждали такой вопрос, заданный учителем: *“Фотон излучения какого цвета из спектра радуги обладает большей энергией, импульсом и длиной излучаемой волны?”*

Назрин считает, что фотон фиолетового излучения обладает наибольшими значениями энергии и импульса, а длина волны красного луча наибольшая. Ахмед же считает, наоборот, длина волны фиолетового луча наибольшая, а наибольшими энергией и импульсом обладает луч красного цвета.

- Кто из них прав, Назрин или Ахмед? Почему?



### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Определите частоту излучения и длину волны кванта с энергией $6,626 \cdot 10^{-21}$ Дж.			
2	Чему равна энергия кванта ультрафиолетового излучения, частота которого равна $3 \cdot 10^{16}$ Гц?			
3	Как называют минимальную энергию, излучаемую атомной системой?			
4	Как направлен импульс фотона?			
5	Квант какого из излучений, составляющих белый свет, обладает наименьшей энергией, а какого – наибольшей энергией?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте “карту понятия Фотон”.

## 4.2. ФОТОЭФФЕКТ. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

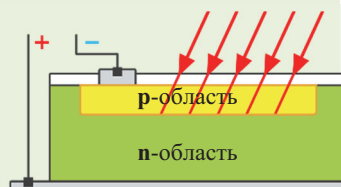
#### Физика – 9 и 11

кремния p-типа с добавлением примеси в состав, на поверхности которого создан участок с проводимостью n-типа.

На контактах p-n перехода в результате диффузии электронов и дырок возникают противоположные по знаку заряды. Поэтому эти контакты можно рассматривать как источники, создающие кратковременный ток. При непрерывном освещении в p-n переходе будут возникать все новые пары электрон-дырка – получится непрерывно работающий экологически чистый источник тока, например, солнечная батарея.

Чтобы превратить газ в проводник, необходимо наличие в нем источника, создающего в газе несвязанные свободные носители заряда – электроны и ионы. Такими источниками являются ионизаторы внешнего воздействия (высокая температура, излучение, бомбардировка высокоскоростными частицами и др.). При самостоятельном разряде положительные ионы, разогнанные сильным электрическим полем, приобретают значительную кинетическую энергию и, ударяясь о катод, выбивают с его поверхности электроны. Этот процесс называется ударной эмиссией. Таким образом, самостоятельный газовый разряд протекает при помощи ударной ионизации и эмиссии электронов с поверхности катода.

В результате нагревания катода электронно-лучевой трубки происходит термоэлектронная эмиссия – испарение электронов с его поверхности. Эти электроны сначала ускоряются электрическим полем между катодом и анодом напряжением в десятки киловольт, а затем резко тормозятся, сталкиваясь с анодом, и возникает рентгеновское излучение (X-ray radiation).



■ Если баланс “метрокарты” пуст, то турникет закрывает доступ на станцию метро. Однако если баланс метрокарты вовремя пополнен, то турникет открывает доступ на станцию. Говорят, что электрическая цепь турникетов и подобных им устройств включается и выключается под действием света и тени.



● Как свет может повлиять на включение или выключение электрической цепи турникета и аналогичных установок?

### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

Как под действием луча света возникает электрический ток?

**Оборудование:** осветитель с дуговой лампой, обычная лампа накаливания, электрометр, эбонитовая и стеклянная палочки, шерстяная и шелковая ткань, цинковая и медная пластина, стеклянная пластина (а).

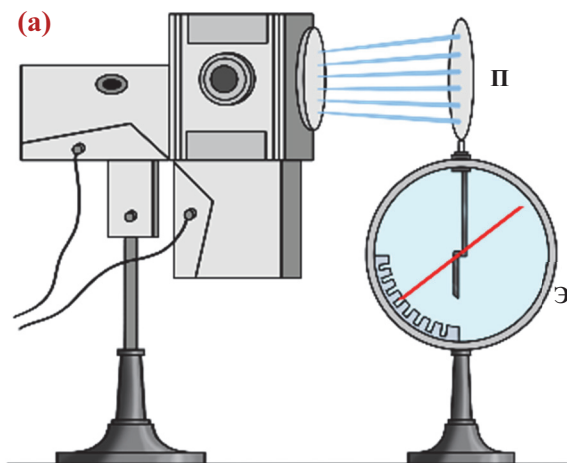
**Ход работы:**

1. Наэлектризуйте цинковую пластину, закрепленную на электрометре, отрицательным зарядом (с помощью эбонитовой палочки, потертой о шерсть).
2. Направьте на пластину свет от дуговой лампы и следите за происходящим.

3. Снова зарядите цинковую пластину отрицательным зарядом и постепенно приближайте его к дуговой лампе. Продолжайте наблюдения.
4. Продолжите опыт и наблюдения, поместив между цинковой пластиной и дуговой лампой стеклянную пластину.
5. Продолжите наблюдения, освещая поверхность отрицательно заряженной цинковой пластины обычной лампой накаливания.
6. Повторите опыт, зарядив цинковую пластину положительным зарядом (с помощью стеклянной палочки, потертой о шелк) и продолжайте наблюдения.
7. Закрепив на электрометре медную пластину, и, наэлектризовав её отрицательным зарядом, повторите опыт и наблюдения.

#### Обсуждение результата:

- Что вы наблюдали при освещении поверхности цинковой пластины, наэлектризованной отрицательным и положительным зарядом, дуговой лампой?
- К каким выводам могут привести эти наблюдения?
- Что наблюдалось при освещении отрицательно заряженной цинковой пластины лампой накаливания?
- К каким выводам могут привести эти наблюдения?



- Какие различия в явлениях, происходящих при освещении отрицательно заряженной пластины, вы наблюдали сквозь стекло и без стекла?
- Что доказал этот опыт?
- Что вы наблюдали, приближая отрицательно заряженную пластину к дуговой лампе?
- К каким выводам привело вас увиденное?
- Что наблюдалось при повторении опыта с медной пластиной?
- К каким выводам вы пришли в результате этих опытов?

**Экспериментальное подтверждение фотоэффекта.** Проведенные в исследовании опыты показали, что лучи ультрафиолетового диапазона видимого света (стекло не пропускает ультрафиолетовые лучи) обладают способностью вырывать электроны с поверхности металла. Впервые такие исследования в 1887 году провел немецкий ученый Генрих Герц (1857-1894) и обнаружил явление *фотоэффекта*.

• *Фотоэффектом (или фотоэлектрическим эффектом) называется явление испускания электронов веществом под действием света.*

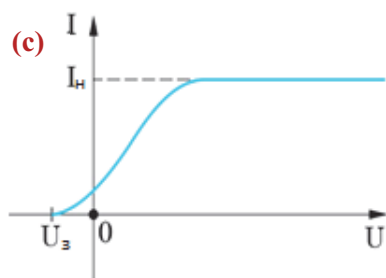
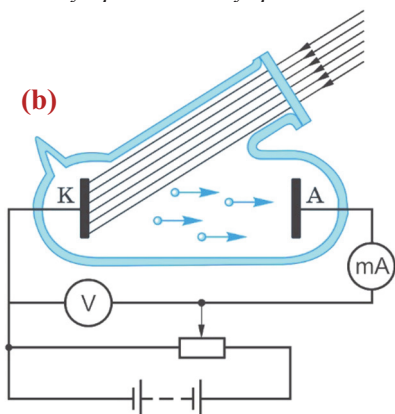
Электроны, вырванные из вещества (например, из металла) под действием света, называются *фотоэлектронами*, а созданный ими ток – *фототоком*.

Установлены несколько видов фотоэффекта, это – *внешний, внутренний, вентильный и др. фотоэффекты*.

• *Внешний фотоэффект заключается в вырывании фотоэлектронов с поверхности вещества во внешнее пространство под действием света.*

- **Внутренний фотоэффект** – вырывание электронов из атомов вещества (диэлектрика и полупроводника) под действием света и переход их из связанного состояния в свободное, в результате чего концентрация электронов проводимости и дырок в веществе увеличивается.

- **Вентильный фотоэффект** – возникновение ЭДС при освещении контакта двух разных полупроводников или контакта полупроводника и металла.



Закономерности возникновения фотоэффекта экспериментально были исследованы российским ученым Александром Столетовым (1839-1896) в 1888-1890-х годах с помощью *вакуумного фотоэлемента (b)*. Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянный электровакуумный прибор, внутри которого находятся катод (K) и анод (A). Свет, падающий на катод, вырывает с его поверхности фотоэлектроны, часть которых, долетая до анода, создает между катодом и анодом фототок. Сила фототока измеряется миллиамперметром, а напряжение – вольтметром (**см. b**). В результате этих опытов была получена ВАХ фотоэлемента (**с**). Из графика видно, что если разность потенциалов между анодом и катодом положительна, то с увеличением напряжения сила тока растет, но достигая некоторого значения, называемого током насыщения ( $I_n$ ), перестает расти – это означает, что все образованные фотоэлектроны достигают анода.

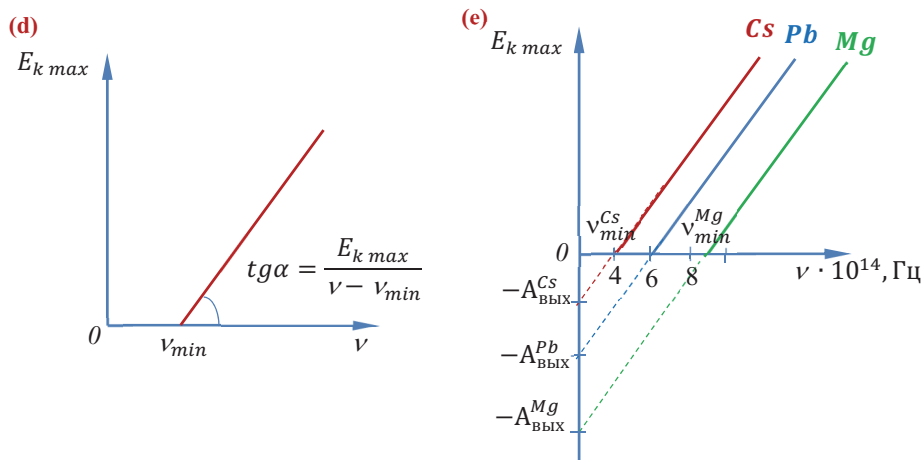
Если разность потенциалов между катодом и анодом отрицательна (катод соединен к положительному полюсу, а анод к отрицательному полюсу источника) и по модулю больше так называемого *задерживающего напряжения* ( $U_3$ ), сила фототока равна нулю. Это объясняется тем, что кинетическая энергия вырванных фотоэлектронов недостаточна для преодоления кулоновского отталкивания от отрицательно заряженного электрода. Используя закон сохранения энергии и связь между напряжением и работой электрического поля, можно определить закономерную связь между максимальной кинетической энергией фотоэлектронов и задерживающим напряжением:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_3. \quad (1)$$

На основе многочисленных экспериментов были выяснены следующие законы фотоэффекта:

1. Число фотоэлектронов, вырванных светом с поверхности металла за одну секунду, прямо пропорционально поглощенной за это время энергии света (интенсивности излучения).
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растет с увеличением частоты падающего света и не зависит от интенсивности света (**d**).

3. Для каждого вещества существует минимальная частота падающего света ( $\nu_{min}$ ), ниже которой фотоэффект не наблюдается (см: d). Эта минимальная частота излучения называется **красной границей фотоэффекта** (она названа так потому, что для произвольного металла наименьшей частоте соответствует частота красного излучения).



**Теория фотоэффекта.** Теория фотоэффекта была дана Эйнштейном, использовавшим для объяснения этого явления гипотезу Планка. Согласно идее Эйнштейна, при фотоэффекте каждый электрон вырывается одним фотоном (квантом света):

- Поглощая фотон, электрон приобретает его энергию  $E = h\nu$ . Эта энергия тратится на совершение работы выхода электрона из металла и сообщение ему максимальной кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{k \text{ max}}, \text{ или}$$

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

Это уравнение, представленное Эйнштейном, объясняет законы фотоэффекта и существование красной границы фотоэффекта для каждого вещества (таблица 4.1). Величина работы выхода зависит от рода вещества, поэтому красная граница для каждого из них различна (e):

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (3)$$

Если учесть в формуле (1) выражения (2) и (3), можно установить зависимость значения задерживающего напряжения от частоты:

$$U_3(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_{\text{min}}). \quad (4)$$

Таким образом, фотоэффект подтвердил корпускулярную природу света. Стало известно, что при распространении света на первый план выступают его волновые свойства – дисперсия света, дифракция света, интерференция света, поляризация света подтверждают это. Однако явление фотоэффекта доказало, что при взаимодействии с веществом свет поглощается и излучается порциями – квантами, энергия каждой из которой зависит от частоты излучения и равна  $h\nu$ . Поэтому говорят, что свет обладает *корпускулярно-волновым дуализмом*.

За объяснение теории закономерностей фотоэффекта Эйнштейн был удостоен в 1921 году Нобелевской премии.

**Таблица 4.1.** Фотоэлектрические характеристики некоторых веществ

Вещество	$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	$\nu_{\text{min}} \cdot 10^{-14}, \text{Гц}$	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$
Цезий	1,9	4,6	650
Калий	2,2	5,3	560
Натрий	2,3	5,6	540
Кальций	2,7	6,5	460
Цинк	3,7	8,9	340
Серебро	4,3	10	260
Вольфрам	4,5	11	280
Никель	5,0	12	250
Платина	5,3	13	230

ПРИМЕНЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Определите длину волны красной границы фотоэффекта**

**Задача 1.** Работа выхода электрона из некоторого металла равна 4,76 эВ. Чему равна длина волны красной границы фотоэффекта для этого металла?

**Обсуждение результата:**

Как вы определили длину волны красной границы фотоэффекта?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

**Задача 2.** Сколько фотонов попадает в человеческий глаз за 1 секунду? Глаз воспринимает световые волны длиной 0,5 мкм и мощностью  $1,8 \cdot 10^{-16}$  Вт ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж · с).

Подсказка

1. Согласно корпускулярной теории света энергия излучения, состоящего из  $N$  фотонов, равна:  $E = Nh\nu$ . 2. Мощность излучения:  $P = \frac{E}{t}$ .

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Как направлен фототок в вакуумном фотоэлементе: от катода к аноду или, наоборот, от анода к катоду?			
2	Можете ли вы написать формулу для вычисления максимальной кинетической энергии на основе уравнения Эйнштейна для фотоэффекта?			
3	Докажите, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта основано на законе сохранения энергии.			
4	Докажите верность выражения для постоянной Планка: $h = \text{tg } \alpha$ .			
5	В чем заключается физическая сущность задерживающего напряжения и от чего зависит его числовое значение?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Составьте “карту понятия Фотоэффекта”.

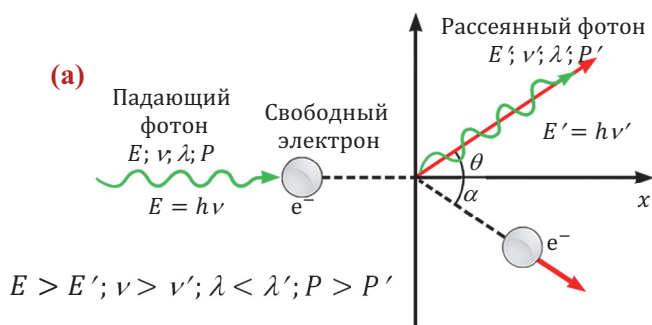


### 4.3. ЭФФЕКТ КОМПТОНА И ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ (Урок-презентация)

При работе над презентацией можете воспользоваться приведенным ниже коротким теоретическим материалом и указанными электронными адресами.

#### 1. Краткое изложение теоретического материала.

**1.1. Эффект Комптона.** В 1923 году американский физик Артур Комптон (1892-1962) экспериментальным путем обнаружил явление, указывающее на существование импульса у фотона и подтверждающее корпускулярную природу света. Изучая рассеяние рентгеновского излучения легкими атомами различных веществ (водорода, углерода, бора, алюминия и т.д.), он обнаружил, что длина волны этих лучей изменяется в результате рассеяния. Так, в составе рассеянного излучения, кроме падающего луча длиной волны  $\lambda$ , существует луч длиной волны  $\lambda' > \lambda$  (а).



Объяснить это явление, названное впоследствии эффектом Комптона, на основе электромагнитной теории света невозможно. Так как согласно этой теории, находящийся в покое свободный электрон под действием падающей электромагнитной волны приходит в колебательное движение с частотой падающей волны. Совершающий вынужденное колебательное движение электрон, в свою очередь, должен излучать вторичные электромагнитные волны той же частоты.

Но если предположить, что свет состоит из потока фотонов, каждый из которых обладает энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = E/c$ , то процесс рассеяния света на электронах объясняется как результат столкновения фотона с электроном. То есть, сталкиваясь с электроном, фотон отдаёт ему часть своей энергии, в результате чего меняется и его собственная энергия, и направление движения. Таким образом, на основе представлений о свете, как потоке частиц эффект Комптона приводит к следующим выводам:

1. Фотон, подвергаясь упругому столкновению со свободным электроном, рассеивается от него.

2. Вследствие уменьшения энергии рассеянного фотона, согласно формуле

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  уменьшение энергии становится причиной уменьшения частоты и увеличения длины волны рассеянного фотона:  $\nu' < \nu$  и  $\lambda' > \lambda$ .

3. Выполняется закон сохранения импульса:  $\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_{\text{электрон}}$ .

4. В процессе рассеивания фотона на электронах изменение длины волны фотона не зависит от длины волны падающего излучения, оно определяется только углом рассеяния фотона:  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$ .

Здесь  $m$  – масса электрона,  $\theta$  – угол отклонения фотона (**см. а**).

**1.2. Волны де Бройля.** В 1923 году французский физик де Бройль (1892-1987) выдвинул предположение, что свойством корпускулярно-волнового дуализма могут обладать все частицы – электрон, протон, нейтрон и атом. Он считал, что если каждая частица обладает энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = \frac{E}{c}$ , то движение этой частицы можно рассматривать как распространение волны частотой  $\nu = \frac{E}{h}$  и длиной волны  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ .

Спустя несколько лет, в 1927-1928 годах эта теория была подтверждена экспериментально. Чтобы обнаружить волновые свойства электрона, требовался прибор с геометрическими параметрами порядка предполагаемой длины волны электрона; например, если электрон движется со скоростью  $v = 4 \cdot 10^6$  м/с, то длина волны должна быть:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 4 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \approx 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Полученное значение длины волны того же порядка, что и расстояние между атомами в кристаллических решетках. Попытки были увенчаны успехом: в проведенных экспериментах были обнаружены интерференция и дифракция электронного пучка, прошедшего сквозь кристаллическую решетку. Таким образом один из основных законов природы – корпускулярно-волновой дуализм материи подтвердился экспериментально.

## 2. Рекомендуемые электронные адреса:

1. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Compton\\_olay%C4%](https://tr.wikipedia.org/wiki/Compton_olay%C4%)
2. <http://ebooks.azlibnet.az/book/KnMcQv8u.pdf>
3. <http://static.bsu.az/w27/Magmuh/ftm/vli-ftm6.pdf>
4. <http://www.nkfu.com/compton-olayi-konu-anlatimi/>
5. <http://www.bilgicik.com/yazi/compton-olayi/>
6. <https://www.youtube.com/watch?v=qpK79imhUDw>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=CbQ5rRjhth0>
8. <https://www.youtube.com/watch?v=eBq4P-QrAfU>
9. <http://www.fizik.net.tr/site/compton-olayi/>
10. [http://www.fencebilim.com/fizik/konular/compton\\_olayi.pdf](http://www.fencebilim.com/fizik/konular/compton_olayi.pdf)

#### 4.4. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА О СТРОЕНИИ АТОМА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ АТОМА

##### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

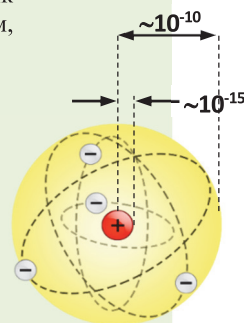
##### Физика – 9

Первая модель строения атома была выдвинута английским физиком Джоном Джозефом Томсоном (1856-1940) в 1903 году. Согласно этой модели, атом имеет форму сферы радиусом приблизительно  $10^{-10}$  м.

Положительные заряды составляют весь объем этой сферы, а отрицательные электроны размещены внутри сферы как “изюминки в кексе”. Однако эта модель не смогла объяснить радиоактивность, электромагнитные явления и др.

В 1910-1911 годах, проведя серию экспериментов, английский физик Эрнест Резерфорд (1871-1937) обнаружил, что атом обладает строением, совершенно отличным от предложенного Томсоном:

- Почти вся масса атома ( $\approx 99,96\%$ ) сосредоточена в его ядре. Размер ядра очень мал по сравнению с размером атома, диаметр ядра атома равен  $\approx 10^{-15}$  м.
- Заряд ядра равен  $q_{\text{я}} = +Ze$  (произведению элементарного заряда  $e$  на порядковый номер в периодической системе элементов).
- Электроны под действием сил кулоновского взаимодействия с ядром атома вращаются вокруг него. Число электронов в атоме равно  $Z$ , поэтому общий заряд электронов равен  $q_e = -Ze$ . Эту модель атома называют планетарной из-за сходства со строением Солнечной системы.



■ Как известно, любое ускоренное движение электрического заряда сопровождается излучением электромагнитных волн. Согласно модели атома Томсона “кекс с изюминками”, электрон совершает колебания по всему объему атома. А согласно “планетарной” модели Резерфорда, электроны обращаются вокруг ядра.

- Согласно какой модели атомная система может излучать электромагнитные волны?
- Почему, несмотря на потери энергии, при которых ускоренное движение электронов сопровождается излучением электромагнитных волн, атомная система устойчива?
- Как бы двигались электроны и что бы произошло в результате потерь энергии, если атомная система не была устойчива?

##### ИССЛЕДОВАНИЕ

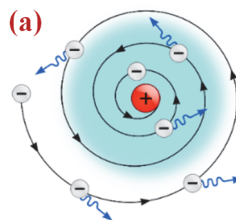
1

##### Каким недостатком обладает планетарная модель атома?

Несмотря на экспериментальное обоснование планетарной модели атома, опубликованной Резерфордом в 1911 году, научный мир не воспринял эту модель серьезно. Причиной служило противоречие характера движения электронов в атоме с законами классической электродинамики. Схема этой противоречивости изображена на рисунке (см. а).

##### Обсуждение результата:

- Внимательно изучите изображение и определите это противоречие.



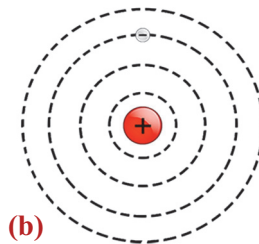
##### ПОДСКАЗКА

Так как движение по окружности является ускоренным движением, то, согласно классической теории, электроны атома должны непрерывно излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте обращения вокруг ядра. В результате этого энергия электрона должна стремительно уменьшаться.

**Квантовые постулаты Бора.** В 1913 году датский ученый Нильс Бор (1885-1962) опубликовал свои работы по квантовой теории атома, основанные на гипотезе Планка о световых квантах. В этой публикации он с помощью 3-х постулатов устранил затруднения планетарной модели атома на основе квантовых представлений.

*В первом постулате Бор обосновывает существование состояний, в которых ускоренно движущийся электрон не излучает электромагнитные волны.*

• **I постулат** – атом может существовать не в состояниях, подчиняющихся законам классической физики, а только в особых квантовых (или в стационарных) состояниях. Каждому квантовому состоянию соответствует определенная  $E_n$  энергия. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитные волны **(b)**.



*Второй постулат Бора объясняет процессы поглощения и излучения света атомом.*

**II постулат** – при переходе из одного стационарного состояния в другое атом поглощает или излучает один квант света, энергия которого равна  $h\nu_{mn}$ . Энергия поглощенного или излученного кванта равна разности энергий этих стационарных состояний:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n. \quad (1)$$

Отсюда для частоты излучения получаем:

$$\nu_{mn} = \frac{(E_m - E_n)}{h} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h}. \quad (2)$$

При переходе атома из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией происходит излучение:  $E_m < E_n$ .

В этом случае электрон, излучая один квант света, переходит с удаленной от ядра орбиты на орбиту, близкую к ядру **(c)**.

Поглотив один квант света, атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией:

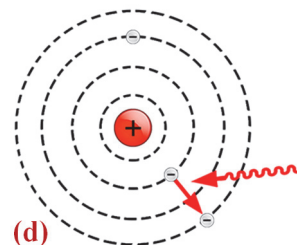
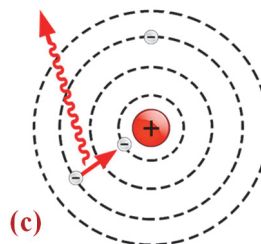
$$E_m > E_n.$$

В этом случае электрон переходит с орбиты, близкой к ядру, на орбиту, удаленную от ядра **(d)**.

**Энергетические уровни атома.** Для стационарных состояний атома водорода Бор вывел следующую формулу:

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}. \quad (3)$$

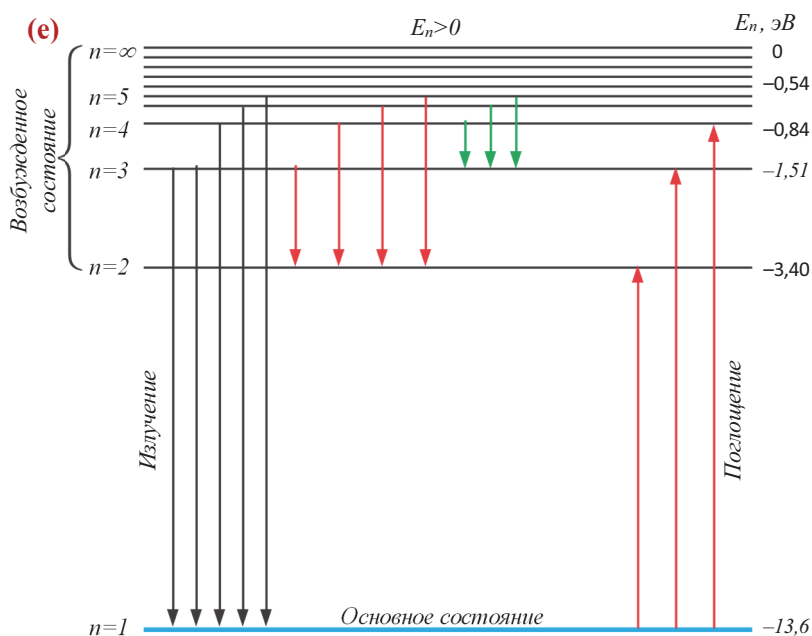
Здесь  $E_0 = 13,6$  эВ – энергия ионизации атома водорода в состоянии с минимальной энергией,  $n$  – главное квантовое число. Стационарное состояние с главным квантовым числом  $n = 1$  является основным состоянием атома, и в этом состоянии он не излучает энергию. Все состояния атома с  $n > 1$  явля-



ются возбужденными состояниями. Атом не может существовать продолжительное время в возбужденном состоянии и, излучив энергию, возвращается в основное состояние.

Таким образом, согласно формуле (3), энергия атома водорода в первом квантовом состоянии  $E_1 = -E_0$ , во втором  $E_2 = -\frac{E_0}{2^2}$ , в третьем  $E_3 = -\frac{E_0}{3^2}$  и т.д. Это значит, что при переходе атома водорода из состояния с минимальной энергией во второе энергетическое состояние его энергия увеличивается в 4 раза, при переходе в третье энергетическое состояние – в 9 раз и т.д.

Энергетические уровни атома изображаются горизонтальными линиями. Переход атома из одного стационарного состояния в другое изображается вертикальными стрелками: направленная вниз стрелка соответствует излучению одного кванта энергии, направленная вверх стрелка соответствует поглощению одного кванта энергии (е).



Из диаграммы энергетических уровней атома видно, что в квантовом состоянии  $n = \infty$  его энергия  $E_\infty = 0$ . Это означает, что электрон, прервав связь с ядром, в свободном состоянии находится в покое. Поэтому энергетические уровни электронов, связанных с ядром, должны быть меньше нуля, соответствуя отрицательным значениям. Так как электрон притягивается ядром, то для отрыва его от ядра необходимо совершить положительную работу.

Согласно **III постулату Бора** возможные частоты излучения атома водорода определяются формулой:

$$\nu_{mn} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (4)$$

Здесь  $R \approx 3,3 \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$  – постоянная Ридберга. Экспериментально установлено, что при переходе электрона в атоме водорода с верхних энергетических уровней на второй уровень происходит излучение фотона видимого света.

**Как изменится энергия атома?**

**Задача.** В атоме водорода электрон перешел с четвертого энергетического уровня ( $n=4$ ) на второй энергетический уровень ( $m=2$ ). Как при этом изменяется энергия атома?

**Обсуждение результата:**

- Что означает переход атома с верхнего энергетического уровня на нижний энергетический уровень?
- Чему будет равно изменение энергии атома при совершении электроном перехода, указанного в условии?

**■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

- Какими стрелками на диаграмме энергетических уровней водорода (**см. е**) обозначены переходы, соответствующие излучению видимого света?

**■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	В чем планетарная модель атома не соответствует законам классической физики?			
2	В чем заключается принципиальное новшество, введенное в теории строения атома Бором?			
3	Какое состояние атома называют основным, а какое возбужденным?			
4	Используя диаграмму энергетических уровней атома, определите: а) переход, соответствующий излучению фотона наибольшей частоты; б) переход, соответствующий поглощению фотона наибольшей длины волны; в) переход, соответствующий поглощению фотонов с максимальной энергией.			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Запишите в рабочей тетради:

1. “Постулаты Бора” и их объяснение.
2. Объяснение диаграммы энергетических уровней атома.



## 4.5. ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ (Урок-презентация)

При работе над презентацией можете воспользоваться представленным кратким теоретическим материалом и электронными адресами.

### 1. Краткий теоретический материал.

**1.1. Люминесцентное излучение.** Люминесценция (лат. lumen – свет, -escent-слабое) – в результате поглощения энергии определенными материалами составляющие их атомы, возбуждаясь, излучают относительно холодное излучение. Это излучение отличается от излучения тлеющих тел (веществ), например, горящего дерева или угля, свечения плавящегося под действием электрического тока металла и спирали лампы накаливания. Люминесцентное излучение наблюдается: в люминесцентных и неоновых лампах; в телевизорах; на экранах радаров и флюорографов; в органических веществах – люминоле светлячков; в некоторых пигментах, используемых во внешних рекламах; в северном сиянии и др. Во всех этих явлениях излучение света происходит при температуре, можно сказать, ниже комнатной. Практическое значение люминесцентных материалов заключается в превращении в них энергии из невидимой формы в видимую. На практике широко используются *фотолюминесценция, электролюминесценция, хемилюминесценция, катодолюминесценция* и др.

**1.2. Лазерное излучение.** Одним из изобретений прошлого века, имеющих важное практическое значение, является создание оптического квантового генератора – лазера.

• *Лазер – устройство, превращающее тепловую, химическую, электрическую энергию в энергию электромагнитного поля, – лазерный луч. Физический механизм (принцип) работы лазера основан на индуцированном (вынужденном) излучении. Это устройство получило свое название из сочетания первых букв английских слов “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, т.е. “Усиление света при помощи индуцированного излучения”.*

• *Индукцированное излучение – переход атома из высшего энергетического состояния в низшее не самопроизвольно (спонтанно), а под влиянием внешнего воздействия.*

Представим себе, что атом может существовать в двух энергетических состояниях – в основном состоянии с энергией  $E_1$  и в возбужденном состоянии с энергией  $E_2$ . Между этими уровнями возможны три оптических перехода: поглощение света, спонтанное излучение и индуцированное (вынужденное) излучение (**таблица 4.2**).

Из таблицы видно, что, находясь в возбужденном состоянии  $E_2$ , атом может перейти в основное состояние, излучив один фотон с энергией  $h\nu = E_2 - E_1$ . Частота, фаза и направление распространения излучаемых при этом волн совпадают с соответствующими параметрами падающей на вещество волны, поэтому они являются когерентными. А это значит, что под действием электромагнитной волны вещество вместо одного фотона с энергией  $h\nu$  излучает два фотона: фотон возбуждающего излучения и порожденный фотон.

Таким образом, происходит усиление проходящего через вещество света в два раза. Однако, одновременно с возникающим под действием электромагнитных

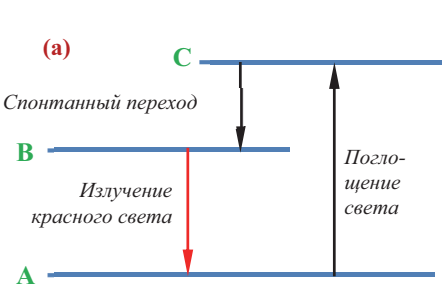
волн индуцированным излучением, происходит и поглощение света, в результате чего уменьшается интенсивность проходящего сквозь вещество света.

**Таблица 4.2.** Оптические процессы, соответствующие возможным переходам между двумя энергетическими уровнями атома.

Оптический процесс	Энергетическое состояние атома	
	Исходное состояние	Конечное состояние
Поглощение		
Спонтанное излучение		
Индукцированное излучение		

Для усиления светового излучения необходимо добиться значительного превосходства числа возбужденных атомов над числом атомов, находящихся в основном состоянии (на минимальном энергетическом уровне).

Существуют различные способы приведения атома в возбужденное состояние; например, вещество подвергается дополнительному облучению. Однако возбужденные таким способом атомы в течение очень короткого времени спонтанно излучают и возвращаются в состояние с минимальной энергией, не успевая принять участие в индуцированном излучении. Поэтому для осуществления индуцированного излучения используют три энергетических уровня (основной и два возбужденных) атома. В этом случае атомы могут находиться в одном из возбужденных состояний более длительное время относительно другого. Такие уровни существуют в различных кристаллах, например, в кристалле корунда (рубина, оксида алюминия)

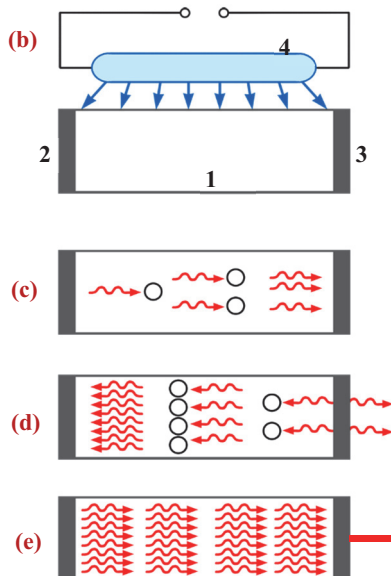


$Al_2O_3$ , в котором небольшая часть атомов алюминия замещена атомами хрома ( $Cr^{+++}$ ). В этом кристалле ионы хрома могут находиться на трех энергетических уровнях, условно обозначенные буквами А, В и С (**а**). При освещении рубинового кристалла мощной лампой происходит переход ионов хрома на возбужденный уровень С, энергия которого равна  $E_C$ . Эти ионы не сразу возвращаются на основной уровень, они сначала, спонтанно излучая, переходят на промежуточный уровень В с энергией  $E_B$ , на котором они могут оставаться дольше, чем на уровне С.


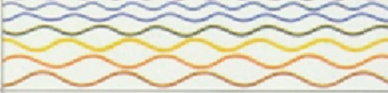


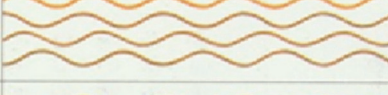
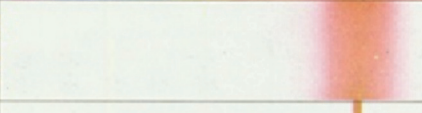


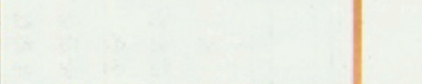
В результате количество “жителей” возбужденного уровня превосходит их количество на основном уровне. Фотон внешней электромагнитной волны с энергией  $h\nu = E_B - E_A$  создает в кристалле индуцированное излучение красного цвета длиной волны 693 нм, соответствующее переходу  $E_B \rightarrow E_A$  (см. а).

Усиление излучения в лазерах осуществляется обеспечением многократного прохождения света сквозь один и тот же слой вещества. Такой эффект добивается путем размещения соответствующего слоя вещества между двумя параллельными друг другу зеркалами. Это можно ясно увидеть на упрощенной модели рубинового лазера (b).

Здесь 1 – среда, в которой происходит усиление света, 2 – зеркало, 3 – полупрозрачное зеркало, 4 – источник света: он переводит атомы среды в возбужденное состояние. Фотон возбуждающего излучения, движущийся параллельно оси кристалла рубина, создает новые поколения фотонных потоков (c). Часть этого потока проходит через полупрозрачное зеркало 3, другая часть, отразившись от зеркала, усиливается в среде 1 (d). Отразившись от зеркала 2, поток фотонов еще более усиливается и движется в направлении возбуждающего излучения (e). Таким образом, усиленный в рубиновом кристалле поток фотонов, обладая большой энергией, выходит через полупрозрачное зеркало 3 в виде красного света. Полученное красное лазерное излучение отличается от белого солнечного света и от обычного красного света (таблица 4.3).



**Таблица 4.3.** Сравнение лазерного луча с обычным светом.

Свет	Изображение волны	Ее спектр
Солнечный свет 		
Красный свет 		
Красный луч лазера 		

## 2. Рекомендуемые электронные адреса:

1. <https://www.facebook.com/page.fizika/posts/273836539385048>
2. [http://referat.ilkkaddimlar.com/ref\\_info\\_5600](http://referat.ilkkaddimlar.com/ref_info_5600)
3. <https://az.wikipedia.org/wiki/Elektro-l%C3%BCminessensiya>
4. <http://anasahife.org/elektromaqnit-sualanma-menbeleri-tebii-elektromaqnit-sualanma.html>

5. <http://static.bsu.az/w10/kitab/rcqrk.pdf>
6. <http://regionplus.az/az/articles/view/3991>
7. <https://virtualkitabxana.files.wordpress.com/2016/03/fizika-9-az-derslik.pdf>
8. <http://www.turkcebilgi.org/bilim/fizik/lazer-24862.html>
9. <http://www.ansiklopedi.biz/fizik/lazer-nedir-lazer-nasil-calisir>
10. <http://ebooks.azlibnet.az/book/51a8Uq4Z.pdf>

### План подготовки презентации

<b>1-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Название презентации</li> <li>• Подготовил (ла) (класс, имя и фамилия ученика)</li> </ul>
<b>2-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Люминесцентное излучение: физическая сущность</li> </ul>
<b>3-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Виды люминесцентного излучения: фотолюминесценция, электролюминесценция, хемилюминесценция, катодолюминесценция</li> </ul>
<b>4-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Фотолюминесценция и хемилюминесценция, их применение</li> </ul>
<b>5-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Электролюминесценция и катодолюминесценция, их применение</li> </ul>
<b>6-й слайд</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Лазерное излучение: его физическая основа</li> </ul>
<b>7-й и 8-й слайды</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Применения лазера: в медицине, производстве, научных исследованиях, военном деле</li> </ul>

## 4.6. АТОМНОЕ ЯДРО. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 6, 8 и 9

В 1932 году русский ученый Дмитрий Иваненко и немецкий ученый Вернер Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель атомного ядра. Согласно этой модели:

- *Атомное ядро – устойчивая связанная система, состоящая из протонов и нейтронов.* Протон (греч. “protos” – первичный; обозначают буквой **p**) обладает положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона и равна  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг.

Нейтрон (электрически нейтрален) обозначается буквой **n**, его масса приблизительно равна массе протона:  $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг.

Протоны и нейтроны имеют общее название – нуклоны (лат. “nucleus” – частицы ядра). Устойчивость атомного ядра объясняется существованием между нуклонами мощных ядерных сил неэлектрической природы.

- *Ядерными силами называют силы, удерживающие нуклоны (протоны и нейтроны) в ядре.* Ядерные силы являются короткодействующими – радиус их действия равен размеру ядра:  $\approx 10^{-15}$  м. Ядерные силы, действующие на этих расстояниях между одинаковыми по знаку протонами, в десятки раз больше кулоновских сил отталкивания между ними.

- *Массовым числом ядра называют общее число нуклонов в ядре.* Оно обозначается буквой **A**:  $A = Z + N$  ( $Z$  – число протонов;  $N$  – число нейтронов). Число нейтронов произвольного элемента будет определяться как:  $N = A - Z$ . Массовое число записывается в виде верхнего индекса химического элемента.

- *Зарядовым числом ядра является число протонов в ядре.* Его обозначают буквой **Z** и записывают нижним индексом элемента.

Таким образом, произвольный химический элемент может быть выражен в виде  ${}^A_ZX$ .

Здесь  $X$  – символ химического элемента. Например, массовое число ядра кислорода равно  $A = 16$ , его зарядовое число  $Z = 8$ , поэтому записывается следующим образом:  ${}^{16}_8\text{O}$ .

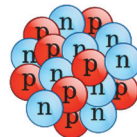
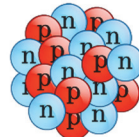
- После открытия Резерфордом планетарного строения атома и предложенной Бором квантовой теории атома возник вопрос: а что же представляет из себя ядро атома? Состоит ли оно из каких-либо частиц или является сплошной неделимой частицей?

Резерфорд направил свои экспериментальные исследования на изучение атомного ядра, применив уже известный вам метод – бомбардировку изучаемого объекта  $\alpha$  – частицами. Бомбардируя азот  $\alpha$  – частицами, Резерфорд обнаружил вылет из атомов частиц, заряд и масса которых равны заряду и массе ядра водорода. Этот метод позволил Резерфорду в 1919 году подписаться еще под одним открытием – подтверждением сложного состава ядра.

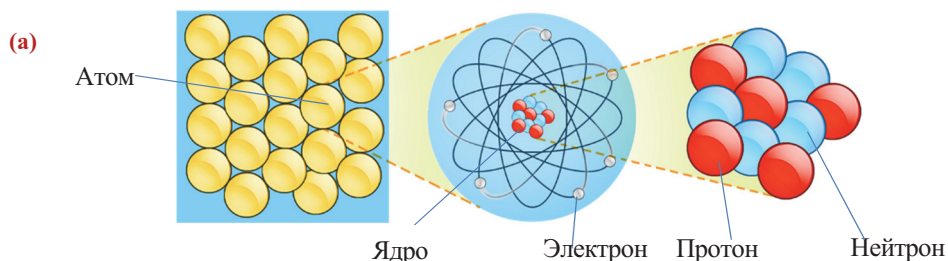
- **Какую частицу ядра обнаружил Резерфорд?**

## Из каких частиц состоит атомное ядро?

**Задача 1.** На рисунке изображены схемы ядерных моделей трех изотопов. Перерисуйте схемы в рабочие листки и вместо точек отметьте число протонов, нейтронов и электронов соответствующих изотопов. Определите его массовое и зарядовое числа и, воспользовавшись таблицей Менделеева, напишите его символ.

 $Z - \dots$  $N - \dots$  $e - \dots$  $A - \dots$  ${}_Z^AX - \dots$  $Z - \dots$  $N - \dots$  $e - \dots$  $A - \dots$  ${}_Z^AX - \dots$  $Z - \dots$  $N - \dots$  $e - \dots$  $A - \dots$  ${}_Z^AX - \dots$ 

**Строение атомного ядра.** Атомное ядро состоит из называемых нуклонами двух видов частиц (с общим названием нуклоны) – положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов (а).



Обычно ядро атома водорода называют протоном. Его обозначают символом  ${}_1^1\text{p}$  или  ${}_1^1\text{H}$ . Характеристики протона следующие:  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ;  $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = e$ ; время жизни в свободном состоянии вне ядра  $\tau > 10^{32} \text{ лет}$ .

Нейтрон обозначается символом  ${}_0^1\text{n}$  и имеет следующие характеристики:  $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ;  $q_n = 0$ ; время жизни в свободном состоянии вне ядра  $\tau \approx 886 \text{ секунд}$ .

Согласно модели строения элементарных частиц, протон состоит из двух **u** кварков и одного **d** кварка (b). Кварки обладают дробным зарядом:

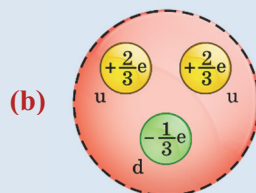
$$u = +\frac{2}{3}e; d = -\frac{1}{3}e.$$

Таким образом, заряд протона:  $p = u + u + d = e$ , или

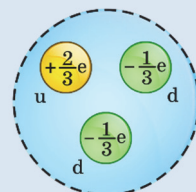
$$p(uud) \rightarrow +\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = e.$$

Нейтрон также состоит из кварков, но одного **u** и двух **d** (c). Поэтому нейтрон электрически нейтрален (его заряд равен нулю):  $n = u + d + d = 0$ , или

$$n(udd) \rightarrow +\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0.$$



(b)



(c)



**Ядерные силы.** Устойчивость атомных ядер объясняется существованием между составляющими его протонами и нейтронами мощных сил взаимодействия, называемых *ядерными силами* и носящих характер притяжения.

• *Ядерные силы – удерживающие нуклоны в ядре силы, обеспечивающие устойчивость ядра.*

В этих силах обнаружены следующие особенности:

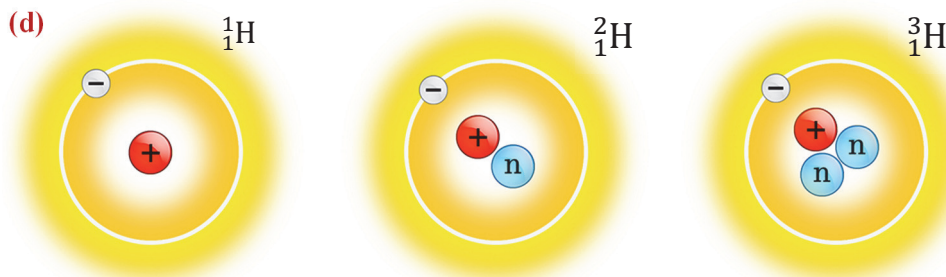
- 1) носят характер притяжения;
- 2) в пределах размера ядра они в сто раз больше кулоновского отталкивания между протонами;
- 3) являются короткодействующими – действуют только на расстояниях, равных размеру ядра ( $10^{-15} \div 10^{-14}$  м);
- 4) сила взаимодействия между нуклонами не зависит от их заряда: протон с протоном, протон с нейтроном и нейтрон с нейтроном взаимодействуют с одинаковой силой;
- 5) обладают свойством насыщения – это значит, что внутри ядра нуклон может взаимодействовать только с “соседними” нуклонами;
- 6) не являются центральными, т. е. ядерные силы не направлены вдоль прямой, соединяющей центры нуклонов.

### **Изотопы.**

• *Атомы с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов называются изотопами (греч. “изос” – одинаковый и “топос” – место) данного химического элемента. Определение можно сформулировать следующим образом:*

• *Атомы с одинаковым числом протонов, но разным массовым числом называются изотопами.*

Например, известны три изотопа водорода: изотоп  ${}^1_1\text{H}$  (*протий*) состоит только из одного протона, изотопы  ${}^2_1\text{H}$  (*дейтерий*) и  ${}^3_1\text{H}$  (триций) состоят из одного протона и соответственно одного и двух нейтронов **(d)**. Отметим, что нейтроны не оказывают никакого действия на химические свойства элемента, поэтому все изотопы одного элемента имеют *одинаковые химические свойства*. Однако эти изотопы отличаются по физическим свойствам (например, по энергетическим уровням атома).



**Определите отношение числа протонов к числу нейтронов в ядре, массовое число которого в 2 раза больше его зарядового числа.**

**Задача 2.** По таблице Менделеева установите элементы, массовое число которых в 2 раза превышает их зарядовое число.

**Обсуждение результата:**

- Чему равно отношение числа протонов к числу нейтронов для таких элементов?

■ **СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

- Можно ли определить количество изотопов (много или мало) в природе по массовому числу химического элемента в таблице Менделеева? Ответ обоснуйте.

■ **ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Два атомных ядра имеют одинаковые массовые числа. Могут ли эти ядра обладать различными зарядами? Ответ обоснуйте.			
2	Два атомных ядра обладают различными зарядами. Могут ли эти ядра быть изотопами одного химического элемента? Ответ обоснуйте.			
3	Какой химический элемент периодической таблицы имеет: а) 52 протона и 72 нейтрона; б) 103 протона и 153 нейтрона?			
4	Какие химические элементы обозначены символом X: ${}_{100}^{257}\text{X}$ , ${}_{92}^{235}\text{X}$ , ${}_{53}^{127}\text{X}$ , ${}_{49}^{115}\text{X}$ ?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листках эссе на тему “Строение атомных ядер”.

## 4.7. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ

#### Физика – 9

Из многочисленных экспериментов было установлено, что массы атомных ядер всегда меньше суммарной массы нуклонов (протонов и нейтронов), составляющих это ядро:

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}}.$$

Это значит, что существует разница между суммой масс нуклонов, из которых состоит ядро, и массой этого ядра, которую называют *дефектом масс*:  $\Delta m = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}$ . Здесь  $M_{\text{я}}$  – масса ядра,  $Z$  и  $N$  – соответственно число протонов и нейтронов,  $m_{\text{p}}$  – масса протона,  $m_{\text{n}}$  – масса нейтрона,  $\Delta m$  – дефект массы.

Уменьшение массы при образовании ядра из системы нуклонов соответствует уменьшению энергии этой системы на **энергию связи** ( $E_{\text{св}}$ ).

• *Энергия связи – минимальная энергия, необходимая для разделения ядра на свободные нуклоны.*

Для вычисления энергии связи ядра используется формула связи энергии и массы, предложенная Эйнштейном:

$$E_{\text{св}} = \Delta E = \Delta mc^2 \rightarrow E_{\text{св}} = [Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}] \cdot c^2.$$

Для вычисления энергии связи различных ядер вместо массы протона и ядра удобно использовать значения соответственно массы ядра водорода ( $m_{\text{H}}$ ) и масс ядер химических элементов ( $M_{\text{A}}$ ). В этом случае энергия связи:  $E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{A}}] \cdot c^2$ .

Согласно формуле связи массы и энергии  $\Delta E = \Delta mc^2$  определено, что масса 1 а.е.м. эквивалентна энергии 931,5 МэВ. Учитывая эту эквивалентность, энергию связи можно вычислить и с помощью выражения:

$$E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{A}}] \cdot 931,5 \text{ МэВ}.$$

Устойчивость ядер характеризуется величиной, называемой *удельной энергией связи*.

• *Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на один нуклон:  $\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$ .*

Единица её измерения:  $[\varepsilon] = \frac{[E_{\text{св}}]}{[A]} = 1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}.$

- В **таблице 4.4.** приведены массы электрона, нуклонов и некоторых изотопов, а также эквивалентные им энергии. С помощью данных таблицы проведите исследование “Выполняется ли закон сохранения энергии между ядром и его нуклонами?”

**Таблица 4.4.**

Частица или химический элемент	Масса (а.е.м.)	Энергия (МэВ)	Химический элемент	Масса (а.е.м.)	Энергия (МэВ)
Электрон ( ${}_{-1}^0e$ )	0,0005486	0,51102	Литий ( ${}_{3}^6\text{Li}$ )	6,941	6465,542
Протон ( ${}_{1}^1p$ )	1,0072765	938,28	Углерод ( ${}_{6}^{12}\text{C}$ )	12,0	11178
Нейтрон ( ${}_{0}^1n$ )	1,008665	939,57	Углерод ( ${}_{6}^{13}\text{C}$ )	13,003354	12112,624
Водород ( ${}_{1}^1\text{H}$ )	1,007825	938,79	Уран ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ )	235,04418	218943,654
Дейтерий ( ${}_{1}^2\text{H}$ )	2,014102	1876,136	Уран ( ${}_{92}^{238}\text{U}$ )	238,05113	221744,6276
Тритий ( ${}_{1}^3\text{H}$ )	3,016062	2809,462	Нептуний ( ${}_{93}^{239}\text{Np}$ )	239,05320	222678,0558
Гелий ( ${}_{2}^4\text{He}$ )	4,002603	3728,425	Плутоний ( ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ )	239,05242	222677,3292

**Выполняется ли закон сохранения энергии между ядром и его нуклонами?**

**Задача 1.** Масса ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  равна 4,002603 а.е.м. (см. **таблицу 4.4**). Так как 1 а.е.м. эквивалентна энергии 931,5 МэВ, то энергия ядра гелия:

$$E_1 = 4,002603 \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 3728,425 \text{ МэВ}.$$

Проверьте, равна ли эта энергия сумме энергий, составляющих ядро гелия нуклонов.

**Обсуждение результата:**

- Как соотносятся массы ядра  ${}^4_2\text{He}$  и сумма масс составляющих его частиц?
- Подтверждают ли проведенные вами вычисления выполнение закона сохранения энергии между ядром и его нуклонами?

**Энергия связи ядра.** В результате проведения многочисленных экспериментов выяснилось, что масса атома меньше масс покоя составляющих его частиц (протонов, нейтронов и электронов). Поэтому энергия ядра атома  $E_1$  меньше энергии покоя составляющих его нуклонов  $E_2$  на величину  $\Delta E = E_2 - E_1$ . Проведя исследование, вы выяснили, что для ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  разность энергий  $\Delta E = 27,275 \text{ МэВ}$ . Однако это совсем не значит, что при образовании ядра из нуклонов был нарушен фундаментальный закон природы – закон сохранения энергии. При расщеплении ядра на отдельные нуклоны необходимо совершить работу против действующих между нуклонами мощных ядерных сил притяжения – израсходовать энергию. Значит, суммарная энергия нуклонов в свободном состоянии должна быть больше энергии ядра, чтобы при соединении нуклонов и образовании ядра эта энергия излучилась.

• *Минимальная энергия, необходимая для деления атомного ядра на свободные нуклоны, называется энергией связи ядра:*

$$E_{\text{св.}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2. \quad (1)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках в формуле (1), называют **дефектом массы**.

• **Дефект массы** – это разность между суммой масс всех составляющих ядро нуклонов и массой самого ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}. \quad (2)$$

Если масса выражена в атомных единицах массы (а.е.м.), то энергию связи, выраженную в МэВ, можно определить с помощью выражения:

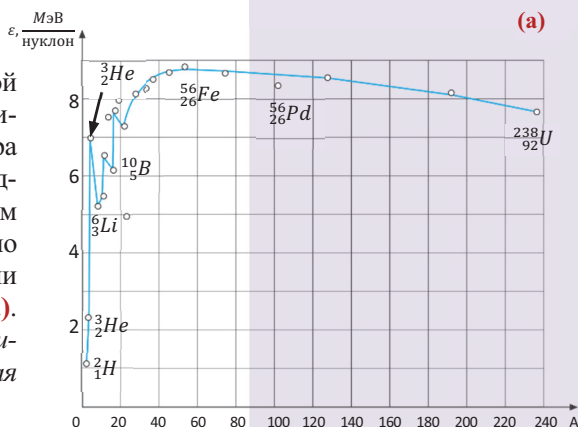
$$E_{\text{св.}} = 931,5 \cdot \Delta m. \quad (3)$$

Вычислив энергию связи ядра на основе формулы (3) и поделив полученное ее значение на количество нуклонов, можно определить энергию связи, приходящуюся на каждый нуклон ядра, – *удельную энергию связи*:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св.}}}{A} = \frac{931,5 \cdot \Delta m}{A}. \quad (4)$$

Удельная энергия связи различных элементов принимает различные значения. Максимальное значение удельной энергии связи, близкое к  $8,7 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ , имеют элементы с массовым числом между 50÷60. Удельная энергия связи тяжелых элементов меньше  $8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ , например, удельная энергия связи природного урана  $\approx 7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .

Ядра с большим значением удельной энергии связи являются более устойчивыми, поэтому легкие и тяжелые ядра менее устойчивы по сравнению с ядрами элементов, обладающих средним массовым числом. Это видно и по графику зависимости удельной энергии связи ядер от их массового числа (а). Значит, удельная энергия связи – физическая величина, характеризующая устойчивость ядер.



## ПРИМЕНЕНИЕ

## ИССЛЕДОВАНИЕ

2

### Удельная энергия связи какого изотопа является наибольшей?

**Задача 2.** По графику зависимости удельной энергии связи от массового числа поставьте изотопы  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ,  ${}^{106}_{46}\text{Pd}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  в ряд по возрастанию удельной энергии связи (см. а).

### Обсуждение результата:

- Удельная энергия связи какого изотопа наибольшая, какого – наименьшая?
- Каково соотношение между энергиями связи изотопов с наибольшим и наименьшим значениями удельной энергии связи?

### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Ариф и Назрин обсуждали на уроке представленную учителем следующую задачу: “Почему в ядрах тяжелых химических элементов отношение количества нейтронов к количеству протонов больше соответствующего отношения в ядрах легких элементов?”

**Ариф:** “По-моему, большое количество протонов и нейтронов в тяжелых ядрах приводит к тому, что силы взаимодействия между ними больше, чем в легких ядрах с меньшим числом нуклонов. Согласно закону сохранения энергии, в тяжелых ядрах указанное отношение будет больше по сравнению с соответствующим отношением в легких ядрах”.

**Назрин:** “Думаю, чем больше протонов в ядре, тем больше значение кулоновских сил отталкивания. Чтобы нейтрализовать эти силы и предотвратить удаление протонов из ядра, требуется еще большее количество нейтронов”.

- С кем вы согласны? Почему?

### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Определите дефект масс изотопов ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$ .			
2	Можете ли вы определить энергию связи изотопов ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$ на основе графика зависимости удельной энергии связи от массового числа?			
3	Почему возникает дефект масс? Обоснуйте свой ответ.			
4	В чем заключена физическая сущность удельной энергии связи нуклонов в ядре?			
5	Объясните график зависимости удельной энергии связи от массового числа.			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочих листах эссе на тему “Энергия связи ядра и закон сохранения энергии”.

## 4.8. РАДИОАКТИВНОСТЬ. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЯДЕР

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

Явление самопроизвольного (без внешнего воздействия) излучения атомов называется естественной радиоактивностью, а излучение называется радиоактивным излучением.

Проведение многочисленных опытов показало, что естественная радиоактивность элемента связана только с составом и строением его ядра. Внешние факторы (механическое давление, изменение температуры, электрические и магнитные поля и др.) не оказывают влияния на это свойство элемента. В опытах, проведенных под руководством Эрнеста Резерфорда в 1899 году, была исследована физическая природа радиоактивного излучения. Выяснили, что радиоактивное излучение состоит из потока различных частиц. Пропустив излучение через магнитное поле, обнаружили, что отдельные части этого потока под действием силы Лоренца отклоняются в разные стороны от первоначального направления:

- часть, являясь потоком положительно заряженных частиц, отклоняется в соответствии с правилом левой руки, в направлении, указанном большим пальцем левой руки – это излучение было названо  **$\alpha$ -излучением**;

- часть, являясь потоком отрицательно заряженных частиц, отклонялась в направлении, противоположном направлению отклонения  $\alpha$ -излучения. Эту часть излучения назвали  **$\beta$ -излучением**;

- часть излучения представляла поток незаряженных частиц – они не отклонялись магнитным полем, эту часть назвали  **$\gamma$ -излучением**. В дальнейшем были обнаружены свойства радиоактивного превращения радиоактивных веществ.

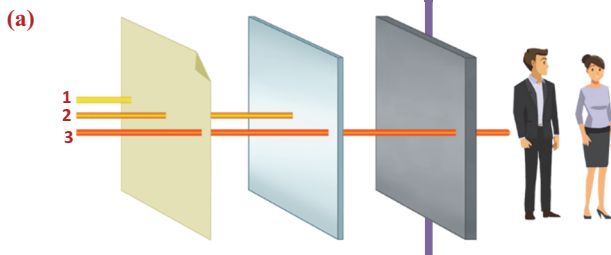
- Самопроизвольное превращение одного радиоактивного ядра в другое ядро называется **радиоактивным превращением**. Существует два вида радиоактивного превращения: радиоактивное  $\alpha$ -превращение и радиоактивное  $\beta$ -превращение.

- При  $\alpha$ -превращении зарядовое число ядра уменьшается на 2 единицы, массовое число уменьшается на 4 единицы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы:  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$ .

- При  $\beta$ -превращении зарядовое число увеличивается на единицу, массовое число не меняется. В результате превращения элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы:  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$ .

■ Резерфорд экспериментально обнаружил, что различные виды радиоактивного излучения отличаются и по проникающей способности. Тогда как один из них (1) не проходит сквозь лист бумаги, для другого (2) преградой становится алюминиевая пластина толщиной 3 мм. Распространению третьего вида лучей (3) не может помешать даже свинцовая стена толщиной несколько сантиметров (а).

● Можете ли вы различать виды радиоактивного излучения по их проникающей способности?

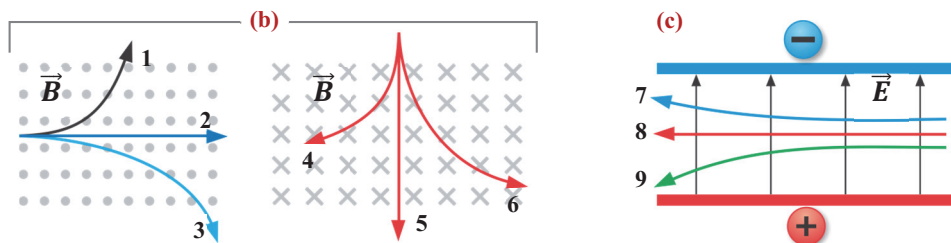




**Задача 1.** На рисунках изображены траектории движения радиоактивных лучей в однородном магнитном (b) и электрическом (c) полях. Какие виды излучений соответствуют указанным на рисунке цифрам?

**Обсуждение результата:**

- Какие виды радиоактивного излучения существуют?
- По каким свойствам эти излучения отличаются друг от друга?



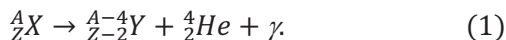
В 1896 году французский физик Анри Беккерель (1852-1908), исследуя явление люминесценции в солях урана, обнаружил спонтанное испускание ураном излучения неизвестного состава. Явление спонтанного излучения вещества назвали **радиоактивностью** (лат. “радиус” – луч, “активус” – действенный), спонтанно испускаемое веществом излучение назвали **радиоактивным излучением**, а вещества, обладающие свойством спонтанного излучения, **радиоактивными веществами**.

В 1898 году французские ученые Пьер Кюри (1859-1906) и Мария Склодовская-Кюри (1867-1934) обнаружили новые радиоактивные вещества – радий  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  и полоний  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  (назван в честь родины Марии Склодовской-Кюри – Польши).

В 1903 году английские ученые Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди (1877-1956) опытным путем установили, что радиоактивные лучи состоят из трех излучений, обладающих отличающимися свойствами. Они были названы тремя последовательными буквами греческого алфавита:  **$\alpha$ –,  $\beta$ – и  $\gamma$ – излучениями**.

•  **$\alpha$ -излучение** – представляет собой поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Электрические и магнитные поля оказывают на него действие. Это излучение обладает сильным ионизирующим действием: на пути свободного пробега может создать  $10^5$  ионных пар. Оно обладает слабой проникающей способностью: для твердых тел 0,1 мм, а для газов несколько сантиметров.

Испускание радиоактивными ядрами  $\alpha$ -частиц называется  **$\alpha$ -распадом**. Заряд ядра, подвергшегося  $\alpha$ -распаду, уменьшается на 2 e, а его массовое число уменьшается на 4 единицы, в результате чего исходное ядро, переместившись на две позиции ближе к началу таблицы Менделеева, превращается в ядро другого химического элемента:



Примером  $\alpha$ -распада является реакция превращения урана в радиоактивный торий:

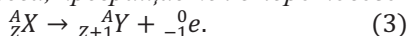


•  **$\beta$ -излучение** – представляет собой поток электронов  ${}^0_{-1}\text{e}$  (или  $\beta^-$ ), или позитронов  ${}^0_{+1}\text{e}$  (или  $\beta^+$ ). Это излучение сильно отклоняется электрическими и

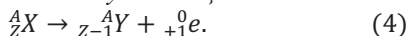
магнитными полями, распространяется в вакууме со скоростью, близкой к скорости света, и полностью поглощается алюминиевой пластиной толщиной в несколько миллиметров.

Испускание радиоактивными ядрами  $\beta$ -частиц называется  $\beta$ -распадом.

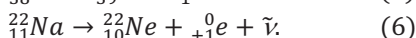
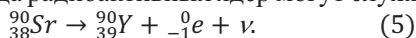
Заряд ядра, подвергшегося  $\beta^-$ -распаду, увеличивается на  $1e$ , а его массовое число не изменяется, и исходное ядро, переместившись на одну позицию ближе к концу таблицы Менделеева, превращается в ядро нового элемента:



Заряд ядра, подвергшегося  $\beta^+$ -распаду, уменьшается на  $1e$ , а его массовое число не меняется, в результате исходное ядро превращается в новое ядро и перемещается на одну позицию к началу таблицы Менделеева:

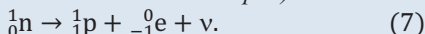


Примерами  $\beta$ -распада радиоактивных ядер могут служить следующие реакции:

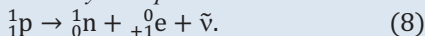


На что указывают символы  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  в реакциях (5) и (6)?

В 1934 году физик США итальянского происхождения Энрико Ферми (1901-1954) разработал квантовую теорию  $\beta$ -распада. Согласно этой теории, при  $\beta^-$ -распаде внутри ядра происходит процесс превращения одного нейтрона в протон. Согласно закону сохранения электрического заряда и закону сохранения энергии, этот процесс сопровождается испусканием двух частиц – электрона и частицы, зарядовое и массовое числа которой равны нулю. Ферми назвал эту частицу нейтрино (итал. “нейтрино” – уменьшительное от слова нейтрон):



Аналогично при  $\beta^+$ -распаде внутри ядра происходит процесс превращения одного протона в нейтрон и наблюдается испускание двух частиц – наряду с позитроном образуется частица с равным нулю зарядовым и массовым числом – **антинейтрино**:



•  **$\gamma$ -излучение** – представляет собой поток **фотонов**, характеризующихся чрезвычайно большой частотой ( $10^{18} \div 10^{20}$  Гц). Это излучение обладает высокой проникающей способностью – может пройти сквозь свинцовую стену толщиной несколько сантиметров. Так как это излучение не содержит электрически заряженных частиц, электрические и магнитные поля не оказывают на него какое-либо действие.  $\gamma$ -излучение обычно сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучение. Ядро, возникшее при  $\alpha$ - или  $\beta$ -распаде, обычно является возбужденным. При возвращении в основное или переходе в менее возбужденное энергетическое состояние ядро испускает  $\gamma$ -фотон. Итак:

• При  $\gamma$ -излучении зарядовое и массовое числа ядра не изменяются – радиоактивное смещение не происходит.

• Во всех ядерных превращениях и ядерных реакциях соблюдается безусловное выполнение законов сохранения зарядового и массового чисел.

**Как изменяется энергия атома?**

**Задача 2.** Ядро  ${}^{238}_{92}\text{U}$  в результате  $\alpha$ -излучения превращается в ядро  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ . Определите энергию, выделяющуюся при этом превращении, и скорость  $\alpha$ -частицы.

Дано	Решение
$M_{{}^{238}_{92}\text{U}} = 238,125 \text{ а. е. м.}$ $M_{{}^4_2\text{He}} = 4,00387 \text{ а. е. м.}$ $M_{{}^{234}_{90}\text{Th}} = 234,116 \text{ а. е. м.}$ $1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$ $E = ?$	${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}.$ $E = [M_{{}^{238}_{92}\text{U}} - (M_{{}^{234}_{90}\text{Th}} + M_{{}^4_2\text{He}})] \cdot 931,5 \text{ МэВ.}$ $E = \frac{M_{{}^4_2\text{He}} \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{M_{{}^4_2\text{He}}}}.$

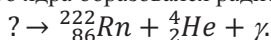
**Обсуждение результата:**

- Скольким джоулям равна энергия, выделенная в процессе  $\alpha$ -распада? Это много или мало?
- С какой скоростью удаляется от ядра  $\alpha$ -частица, образованная при распаде ядра?
- Какое свойство  $\alpha$ -излучения подтверждает это ядерное превращение?

**■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

В последнем исследовании было определено, что в повседневной жизни человек более всего подвергается радиоактивному излучению радона. Источником этого радиоактивного инертного газа могут быть стройматериалы (камень, кирпич, цемент и др.) для дома, в котором вы живете, вода, поступающая в дом из артезианского колодца, продукты сгорания используемого природного газа и др. Специалисты советуют проветривать комнаты, чтобы уменьшать в них концентрацию частиц этих излучений.

- В результате  $\alpha$ -распада какого ядра образовался радиоактивный радон?

**■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какие вещества называются стабильными, а какие радиоактивными?			
2	Перечислите свойства $\alpha$ -, $\beta$ - и $\gamma$ -излучений.			
3	Как можно определить знаки электрических зарядов частиц в $\alpha$ - и $\beta$ -излучениях?			
4	Законы сохранения каких величин выполняются в процессе радиоактивных распадов?			
5	Что означают символы $v$ и $\tilde{v}$ в уравнениях радиоактивного $\beta$ -распада?			
6	Как можно объяснить возникновение $\gamma$ -излучения?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листе эссе на тему “Радиоактивность и радиоактивные превращения ядер”.

## 4.9. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

- Для каждого радиоактивного вещества существует определенный промежуток времени, спустя который половина ядер исходного вещества испытывает превращение.
- *Периодом полураспада называется промежуток времени, за который распадается половина начального количества радиоактивных ядер.* Период полураспада обозначается буквой  $T$ , единица его измерения в системе СИ – секунда. Через промежуток времени, равный  $t_n = nT$ , число нераспавшихся в веществе ядер будет выражаться законом радиоактивного распада:

$$N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Закон радиоактивного распада был открыт в 1902 году Э.Резерфордом и Ф.Содди. Этот закон дает возможность определить число нераспавшихся радиоактивных ядер в произвольный момент времени. Для каждого радиоактивного изотопа имеется свой период полураспада, например, период полураспада для изотопа урана-238 равен 4,5 миллиарда лет, а для радия-226 – 1600 лет.

■ В 1960 году физик Френк Либби (1908-1980, США) был удостоен Нобелевской премии по химии, за открытие радиоуглеродного метода геохронологии. С помощью этого метода события, которые произошли в истории Земли и человеческой культуры, – от наскальных рисунков до пирамид египетских фараонов, начиная с “Ледникового периода” до уничтожения животных и растений, можно было определить возраст археологических находок относительно “близкого исторического периода”.

- Почему определение геохронологии называется радиоуглеродным методом?
- На какой физической закономерности основывается радиоуглеродный метод?

### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

#### Какой возраст у находки?

**Задача 1.** Лабораторный анализ археологических находок показал, что процент изотопа радиоуглерода ( $^{14}_6C$ ) в его составе уменьшился в восемь раз. Каков возраст находки, если период полураспада радиоуглерода ( $^{14}_6C$ ) составляет 5700 лет?

#### Обсуждение результата:

- Что означает период полураспада вещества?
- Какой еще параметр должен быть известен, чтобы можно было определить возраст находки в дополнение к ее периоду полураспада?

Э.Резерфорд, исследуя процесс радиоактивных превращений веществ, определил:

- активность радиоактивных веществ пропорциональна массе этого вещества;
- существует стабильный временной интервал для одного и того же радиоактивного вещества, при котором его активность уменьшается в среднем в 2 раза. Такое уменьшение не зависит от состояния вещества (от смешивания с другими веществами, от температуры, давления и т. д.);
- скорость снижения радиоактивности различных веществ различна.

Таким образом, в науку было введено понятие “период полураспада” для характеристики скорости уменьшения радиоактивности.

• *Период полураспада – это промежуток времени, в течение которого в среднем половина радиоактивных ядер распадается.*

Учитывая, что период радиоактивного полураспада для каждого вещества постоянен, легко можно определить закономерность превращения радиоактивных ядер (снижение активности). Для этого будем считать, что в начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ) число радиоактивных ядер равно  $N_0$ . Через промежуток времени, равный периоду полураспада ( $t_1 = T$ ), число радиоактивных ядер уменьшится в 2 раза:

$$N_1 = \frac{N_0}{2}.$$

Еще через такой же промежуток времени (т.е.  $t_2 = 2T$ ) число радиоактивных ядер уменьшится еще в 2 раза:

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{2^2}.$$

По этому правилу можно определить закономерность сокращения числа радиоактивных ядер:

$$\left. \begin{array}{l} t_1 = T \rightarrow N_1 = \frac{N_0}{2} \\ t_2 = 2T \rightarrow N_2 = \frac{N_0}{2^2} \\ t_3 = 3T \rightarrow N_3 = \frac{N_0}{2^3} \end{array} \right\} t_n = nT \rightarrow N = \frac{N_0}{2^n}. \quad (1)$$

Формулу для определения количества радиоактивных ядер в произвольный  $t$  момент времени можно записать так:

$$N = N_0 \cdot 2^{-n}. \quad (2)$$

Из формулы (2), учитывая, что  $n = \frac{t}{T}$ , можно получить выражение для закона радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (3)$$

Здесь  $N$  – количество нераспавшихся ядер, оставшихся после радиоактивного превращения. Согласно этой формуле мы можем графически описать зависимость закономерности убывания числа радиоактивных ядер от времени в произвольном веществе **(а)**.

Количество ядер, которые подвергаются распаду за произвольный промежуток времени  $t$ , определяется по формуле:

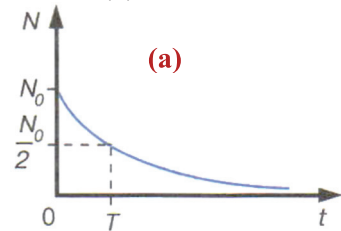
$$\Delta N = N_0 - N = N_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (4)$$

Из формулы (4) можно определить, какую часть начального количества радиоактивного ядра составляют распавшиеся ядра:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0} = 1 - 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (5)$$

Кроме периода полураспада, радиоактивные ядра характеризуются и средним временем жизни ( $\tau$  – тау), для которого справедливо соотношение с периодом полураспада:

$$\tau = 1,44T. \quad (6)$$



• Отношение числа имеющихся в момент времени  $t$  радиоактивных ядер к их среднему времени жизни называется активностью радиоактивных ядер:

$$A = \frac{N}{\tau}. \quad (7)$$

Физический смысл активности радиоактивного ядра заключается в количестве радиоактивных распадов, происходящих в ядре за единицу времени. С течением времени активность убывает по тому же закону, что и число радиоактивных ядер:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (8)$$

Единицей активности в системе СИ является беккерель (1Бк): 1 Бк равен активности такого радиоактивного вещества, в котором за 1с происходит 1 распад.

#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

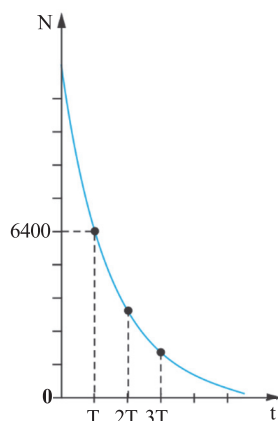
2

**Сколько нераспавшихся ядер останется после  $t = 3T$ ?**

**Задача 2.** По графику закона радиоактивного распада вещества определите, сколько нераспавшихся ядер останется после  $t=3T$ .

**Обсуждение результата:**

- Сколько радиоактивных ядер было в веществе в момент  $t = 0$ ?
- Сколько нераспавшихся ядер останется после  $t_1 = 2T$ ?
- Сколько нераспавшихся ядер останется после  $t_2 = 3T$ ?



#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

В квартире за 15,2 суток число ядер радиоактивного газа радона уменьшилось в 16 раз. Чему равен период полураспада радона?

- Какой формулой определили период полураспада радиоактивных ядер?
- Как изменилась радиоактивность радона в течение этого времени?

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Прокомментируйте закон радиоактивного распада и напишите его формулу.			
2	Какая часть радиоактивного элемента распадется за время, равное двум периодам полураспада?			
3	Какая часть радиоактивного элемента не распадется за время, равное трем периодам полураспада?			
4	Почему на Земле до сих пор не распались все радиоактивные ядра?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листке эссе на тему “Закон радиоактивного распада”.



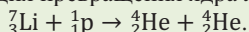
## 4.10. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

• *Превращение атомного ядра в другое атомное ядро при взаимодействии с какой-либо частицей называется ядерной реакцией.*

Для возникновения ядерной реакции необходимо, чтобы взаимодействующие между собой частицы или ядра приблизились друг к другу на расстояние радиуса действия ядерных сил ( $\approx 10^{-15}$  м). Для этого частицам необходимо сообщить большую кинетическую энергию. С этой целью используется специальная установка, называемая *ускорителем элементарных частиц*. Первая ядерная реакция с ускоренной частицей (протоном) была проведена в 1932 году. Это реакция превращения ядра лития в два ядра гелия:



Открытие нейтрона сыграло очень важную роль в изучении ядерных реакций. Так, электро нейтральный нейтрон даже без ускорения может беспрепятственно входить в ядро атома, превращая его в другое ядро.

■ В 1911 году Э. Резерфорд в знаменитом эксперименте, бомбардировав атомы золота ( ${}^{197}_{79}\text{Au}$ )  $\alpha$ -частицами (ядро  ${}^4_2\text{He}$ ), обосновал планетарную модель атома. В этом эксперименте никаких изменений в атоме золота не было обнаружено, просто всего одна частица из 2000 отскакивала на 180 градусов от ядра атома золота. Но в опытах, проведенных Резерфордом в 1919 году, – при бомбардировке ядра атома азота  ${}^{14}_7\text{N}$   $\alpha$ -частицами было получено ядро нового химического элемента с испусканием дополнительной частицы.

• Почему при бомбардировке тяжелого ядра  $\alpha$ -частицами не происходит преобразования в этом ядре, но бомбардировка “легких” ядер этими же частицами приводит к их изменению?

### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

#### В чем разница между реакциями?

**Задача 1.** Определите неизвестный изотоп в данных реакциях.

1)  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He}$ ; 2)  ${}^8_3\text{Li} \rightarrow ? + {}^0_{-1}\text{e}$ ; 3)  ${}^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He}$ ; 4)  ${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ? + {}^1_0\text{n}$ .

**Обсуждение результата:**

• Какая реакция является ядерным преобразованием, какая – ядерной реакцией? Почему?

**Характер ядерной реакции и закон сохранения энергии.** Характер ядерной реакции может быть разным в зависимости от типа и энергии частиц, находящихся во взаимодействии:

1. После захвата частицы, с которой взаимодействует ядро, оно возвращается в исходное состояние путем излучения нескольких гамма-квантов. В ядре никаких изменений не происходит.

2. Ядро, захватывая бомбардирующиеся частицы, превращается в новое ядро с относительно большим массовым числом. Такое ядро обычно находится в возбужденном состоянии и оно, испуская частицы (нейтрон, протон, электрон,  $\alpha$ -частицу и др.), превращается в ядро другого элемента.

3. После захвата частицы ядро распадается на осколки, они, в свою очередь, путем испускания частиц превращаются в ядра других элементов.

Символически ядерные реакции записываются в следующем виде:



здесь  $X$  – исходное ядро,  $a$  – частица, бомбардирующая исходное ядро,  $Y$  – получаемое новое ядро,  $b$  – частица, получаемая из реакции. Во время ядерных реакций

выполняются законы сохранения энергии, массового и зарядового числа. В таких реакциях происходит превращение ядер, и поэтому их внутренняя энергия, следовательно, и их удельная энергия связи изменяется. А это приводит к изменению кинетической энергии частиц в соответствии с законом сохранения энергии.

• *Изменение кинетических энергий частиц, участвующих в ядерной реакции, называется энергетическим выходом ядерной реакции:*

$$\Delta E = E'_K - E_K. \quad (2)$$

Здесь  $E_K$  и  $E'_K$  — соответственно начальное и конечное значения кинетической энергии частиц, участвующих в ядерной реакции;  $\Delta E$  — энергетический выход ядерной реакции.

Если энергетический выход ядерной реакции  $\Delta E > 0$ , то такая реакция называется *экзотермической ядерной реакцией*. Поскольку в экзотермической ядерной реакции суммарная масса исходных частиц больше суммарной массы образовавшихся частиц, то эта реакция идет с выделением энергии.

Если энергетический выход ядерной реакции  $\Delta E < 0$ , то реакция называется *эндотермической*. Поскольку в эндотермической ядерной реакции суммарная масса исходных частиц меньше суммарной массы образовавшихся частиц, то эта реакция идет с поглощением энергии.

Согласно закону сохранения энергии формулу (2) можно записать в виде разности энергии связи ядер:

$$\Delta E = E'_{св.} - E_{св.}, \quad (3)$$

или

$$\Delta E = (m_1 - m_2)c^2 = (m_1 - m_2) \cdot 931,5 \text{ MeV}. \quad (4)$$

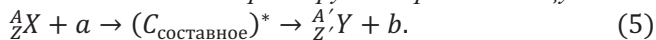
Здесь  $m_1$  — суммарная масса исходных частиц,  $m_2$  — суммарная масса образовавшихся (конечных) частиц.

• *Энергетический выход ядерной реакции равен разности энергии связи конечного и исходного ядер.*

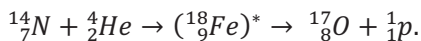
Согласно представлениям Н.Бора, ядерные реакции протекают в два этапа.

*На первом этапе: происходит поглощение частицы исходным ядром и образованием составного ядра, находящегося в возбужденном состоянии. Энергия распределяется между всеми нуклонами этого ядра. Нуклоны обмениваются между собой энергией, в результате в одном из них или в нескольких нуклонах может сконцентрироваться энергия, достаточная для преодоления сил ядерной связи.*

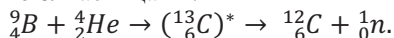
*На втором этапе: составное ядро за очень короткое время ( $\approx 10^{-14} \div 10^{-12}$  с), выделяя путем излучения лишнюю энергию, возвращается в состояние с минимальной энергией — в стабильное состояние. В результате происходит превращение возбужденного составного ядра в другое ядро и частицу:*



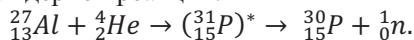
**Первые ядерные реакции.** Первую искусственную ядерную реакцию в 1919 году осуществил Резерфорд. Это была реакция превращения азота в кислород и открытие протона:



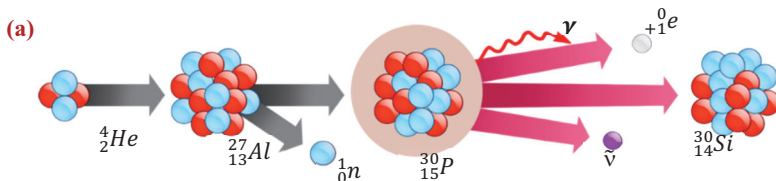
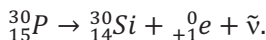
В 1932 году учеником Резерфорда Джеймсом Чедвиком (1891–1974) был открыт нейтрон в реакции радиоактивного превращения ядер бериллия в изотоп углерода при бомбардировке  $\alpha$ -частицами:



В 1934 году французскими физиками Фредериком Жолио-Кюри (1890–1958) и Иреном Жолио-Кюри (1897–1956) впервые было получено ядро радиоактивного изотопа фосфора в ходе ядерной реакции:



Далее изотоп  ${}_{15}^{30}\text{P}$  самопроизвольно превращается в изотоп  ${}_{14}^{30}\text{Si}$  с испусканием позитрона  $\beta^+$  (а):



#### ПРИМЕНЕНИЕ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

2

#### Можете ли вы написать реакцию?

**Задача 2.** При бомбардировке ядра железа  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  нейтронами образуется  $\beta^-$  радиоактивный нуклид марганца с массовым числом  $A = 56$ . Напишите реакцию получения марганца и реакцию происходящего  $\beta^-$  распада.

#### Обсуждение результата:

- Какие частицы образуются в результате этих реакций?
- Какая из этих реакций является ядерной реакцией? Почему?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

Вычислите энергию при образовании ядра гелия  ${}_2^4\text{He}$ , выделяющуюся при ядерной реакции:  ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ .

**Подсказка.** Используйте формулу (4) и данные таблицы 4.4.

- Чем в результате закончится эта ядерная реакция: выделением энергии или с поглощением? Почему?

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Что означает справедливость закона сохранения энергии в ядерных реакциях? Приведите примеры.			
2	Как вычисляется энергетический выход ядерной реакции?			
3	В каком случае ядерная реакция заканчивается с выделением энергии, а в каком – с поглощением?			
4	Что означает справедливость закона сохранения массового и зарядового чисел в ядерных реакциях? Приведите примеры.			
5	В результате ядерных реакций ${}_{82}^{204}\text{Pb} + {}_{18}^{40}\text{Ar} \rightarrow ? + 2{}_0^1\text{n}$ и ${}_{10}^{22}\text{Ne} + {}_{94}^{242}\text{Pu} \rightarrow ? + 4{}_0^1\text{n}$ были получены два химических элемента, которые в Земле раньше не существовали. Какие это элементы?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листке эссе на тему “Ядерная реакция”.

## 4.11. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

При бомбардировках тяжелых ядер нейтронами, проводимых в одинаковых условиях, наблюдаются странные явления: а) образуются ядра элементов средней части периодической системы химических элементов; б) образуется новое поколение нейтронов; в) новые нейтроны участвуют в новых ядерных реакциях деления, и этот процесс повторяется в растущем режиме; г) выделяется большое количество энергии.

При столкновении нейтронов нового “поколения”, возникающих при реакции распада ядер урана, с новыми ядрами урана происходит реакция их распада. При каждой такой реакции возникает следующее поколение нейтронов, также способное осуществить деление и, таким образом, под влиянием первичных нейтронов возникает длинная цепь распада ядер урана.

• **Цепная реакция** – это лавинообразное увеличение числа делящихся ядер урана.

Для осуществления цепной ядерной реакции необходимо выполнение двух условий:

**I условие:** при цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице или превышать ее.

• Коэффициентом размножения нейтронов называется отношение числа нейтронов в данном поколении цепной реакции к их числу в предыдущем поколении:

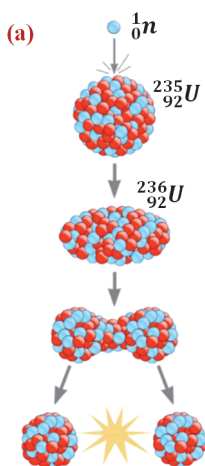
$$k = \frac{N_{\text{следующее}}}{N_{\text{предыдущее}}}$$

Значит, для протекания цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть  $k \geq 1$ . При  $k > 1$  число нейтронов, вызывающих распад ядра, со временем увеличивается и происходит неуправляемая цепная ядерная реакция, приводящая к взрыву. При коэффициенте размножения нейтронов  $k < 1$  число нейтронов постепенно убывает, и реакция затухает. А при коэффициенте размножения нейтронов  $k = 1$  число нейтронов, вызывающих распад ядра, не меняется, и цепная ядерная реакция носит управляемый характер.

**II условие:** масса урана не должна иметь значение, меньшее определенного, называемого критической массой.

• Минимальное значение массы урана, требуемое для протекания цепной ядерной реакции, называется критической массой.

Механизм деления ядра урана Нильс Бор объяснил на основе капельной модели ядра. По его мнению, ядро напоминает каплю жидкости, состоящую из сгустка нуклонов. Эта капля при столкновении с нейтроном возбуждается. В результате нарушается баланс между силами, действующими между нуклонами. Ядро, деформируясь, приобретает вытянутую форму, и нуклоны на его концах отодвигаются друг от друга. Наконец, наступает такой момент, что ядро делится на два осколка, и они с очень большим значением кинетической энергии выбрасываются в сторону (а).



- Между какими силами нарушается баланс, действующими между нуклонами возбужденного ядра при приеме им нейтрона?
- Почему осколки (ядра), полученные при делении, имеют очень большую кинетическую энергию?
- Чему равна суммарная кинетическая энергия этих осколков, согласно закону сохранения энергии?
- Какими элементами могут быть в периодической системе химических элементов эти осколки, полученные при делении ядра?

**Можете ли вы написать реакцию деления ядер и радиоактивное  $\beta^-$ -превращение ядер?**

**Задача 1.** При бомбардировке нейтронами ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  образовались два ядра:  $\beta^-$ -радиоактивное ядро стронция-95 и  $\beta^-$ -радиоактивное ядро ксенона-139. Напишите реакции получения этих ядер и их  $\beta^-$ -превращений.

**Обсуждение результата:**

- Какие еще частицы возникли в процессе деления ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$ ?

**Деление ядра урана.** Особый тип ядерных реакций представляют ядерные деления “тяжелых” ядер (элементов, расположенных в конце периодической системы химических элементов). Такие реакции сопровождаются выделением огромного количества энергии. Это видно из графика удельной энергии связи нуклонов (см. тема 4.7). Например, для ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  удельная энергия связи составляет  $\approx 7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . Ядра химических элементов из середины периодической системы химических элементов обладают максимальной удельной энергией связи – примерно до  $8,8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . Это означает, что при делении тяжелого ядра на 2-3 более легких осколка энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличится на величину порядка  $\approx 1 \text{ МэВ}$ . Число нуклонов в каждом ядре урана равна 235, а это значит, что реакция деления одного ядра приводит к выделению  $\approx 200 \text{ МэВ}$  энергии. Согласно закону сохранения энергии такое же количество энергии выделится при каждом делении ядра. Эти теоретические вычисления были подтверждены независимыми экспериментами, осуществленными немецкими учеными Отто Ганом (1879–1968) и Фрицем Штрассманом (1902–1980), австрийскими учеными Лизе Мейтнерой (1878–1968) и Отто Фришем (1904–1979) в 1939 году. В результате многочисленных экспериментов было установлено, что при бомбардировке ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  нейтронами оно делится на два радиоактивных ядра-осколка с массовыми числами, примерно близкими друг другу. Каждое такое деление сопровождается испусканием 2-3-х новых нейтронов и выделением  $\approx 200 \text{ МэВ}$  энергии:



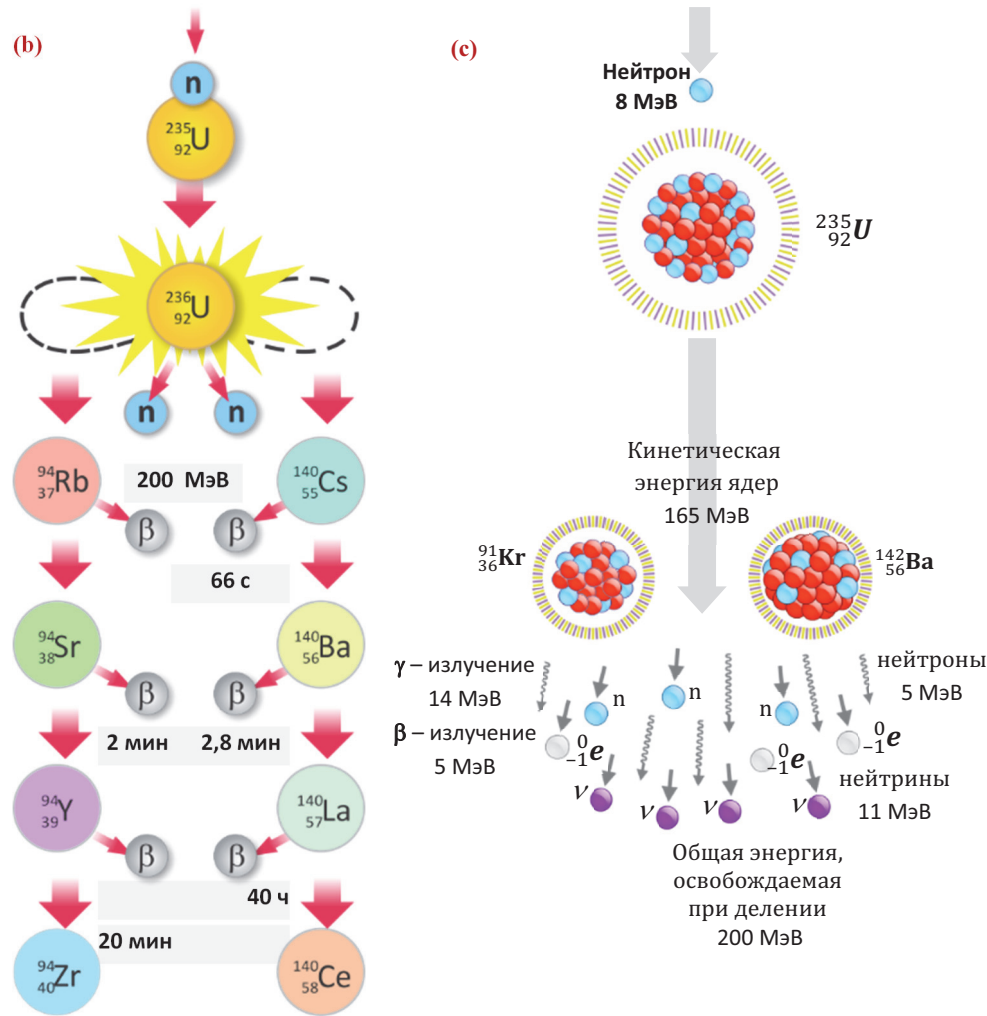
Образовавшиеся ядра-осколки обычно являются  $\beta^-$  радиоактивными. Поэтому после ряда  $\beta^-$  распадов они превращаются в стабильные изотопы (b).

Суммарная кинетическая энергия этих осколков ( $\approx 165 \text{ МэВ}$ ) составляет основную долю всей энергии, остальную часть составляют энергии различных излучений, освобождаемые при делении ядра (c).

**Ценная ядерная реакция.** Процесс каждого деления, сопровождаемый испусканием 2-3-х новых “поколений” нейтронов, является очевидным фактом практического использования энергии при делении ядра урана. Если освобождающиеся в

первой реакции эти нейтроны попадут в другие ядра, то они могут вызвать реакции их деления – возникают следующие “поколения” нейтронов. Таким образом, под действием первичных нейтронов происходит цепная реакция деления ядра урана (d).

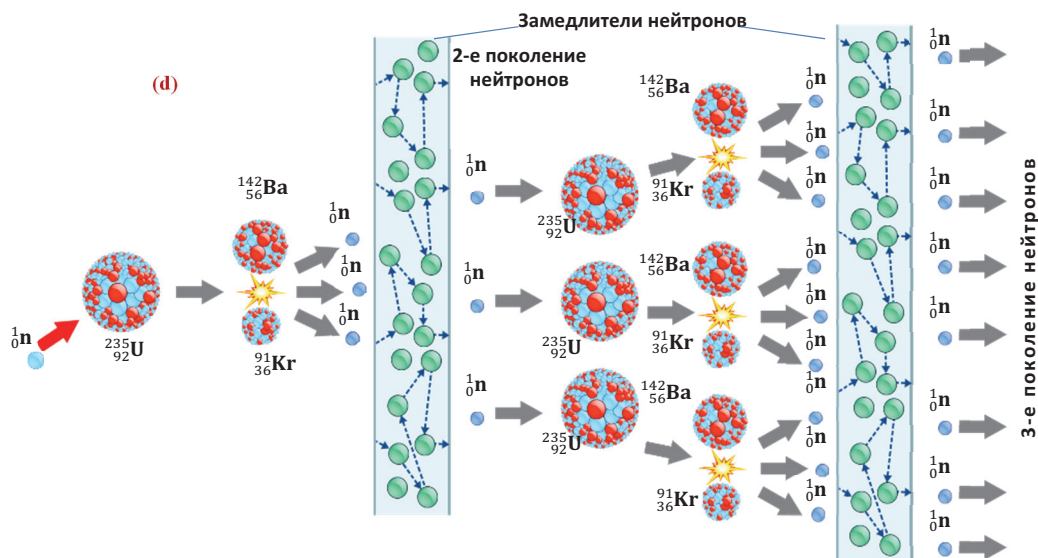
• *Цепная реакция – это такая реакция, которая вызывается частицей (нейтроном), появившейся как продукт реакции на предыдущем шаге последовательности.*



Если при осуществлении цепной реакции число делящихся ядер урана и появление новых “поколений” нейтронов лавинообразно возрастает, реакция становится неуправляемой – происходит взрыв. На этом основан принцип действия атомной бомбы.



Если в цепной реакции число делящихся ядер остаётся постоянным, то реакция протекает не в виде взрыва, а стационарно. Такая цепная реакция называется управляемой.



### Как осуществляется управляемая цепная ядерная реакция?

**Первое,** осуществление цепной ядерной реакции делением ядер урана  $^{235}_{92}\text{U}$  при облучении их медленными нейтронами. Энергия таких нейтронов меньше, чем кинетическая энергия нейтронов, образующихся при делении ядер, поэтому возникает необходимость в замедлителях нейтронов. В качестве замедлителя нейтронов используется тяжёлая вода, или чистый графит. Замедляющие свойства дейтерия и графита обусловлены тем, что ядра этих веществ сравнительно лёгкие. Благодаря этому при столкновениях с нейтронами они эффективно отбирают у нейтронов значительную часть их кинетической энергии (см. **d**).

**Второе,** в цепной реакции ядер урана коэффициент размножения нейтронов должен быть  $k = 1$ . Для обеспечения постоянства числа нейтронов используются “поглотители нейтронов”. В качестве поглотителей обычно применяют стержни из кадмия или бора: нейтроны хорошо поглощаются ядрами этих веществ.

**Третье,** необходимо создать условия, чтобы основная часть нейтронов, образовавшихся при делении ядер, оставалась в уране, вызывая новые реакции деления. А это значит, что нейтроны должны пройти в веществе достаточно большой путь, то есть размеры образца, а следовательно, и его масса должны быть в размере критической массы. Для шарообразного образца – “горючего” изотопа урана  $^{235}_{92}\text{U}$  критическая масса равна примерно 48 кг. Однако её можно намного уменьшить, окружив образец бериллиевой оболочкой, так как она отражает вылетающие нейтроны обратно в зону реакции, тем самым увеличивает их путь в образце.

**Какой элемент и сколько нейтронов возникло в ядерной реакции?**

**Задача 2.** При делении ядра изотопа урана  $^{235}_{92}\text{U}$  образовались осколки с массовыми числами 96 и 138. Сколько нейтронов выделилось при этой реакции?

**Обсуждение результата:**

- Как вы определили число возникающих нейтронов нового поколения в результате этой реакции?

**■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

В природном уране на долю изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$  приходится 99,3%, а на долю изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  всего лишь 0,7%. Поэтому для получения из состава природного урана в достаточном количестве ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  в качестве чистого ядерного топлива необходимо произвести дорогостоящие и очень трудоемкие работы. Если бы в качестве ядерного топлива можно было использовать ядра изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$ , то можно было бы получить еще больше энергии.

- При каком условии можно было бы использовать изотоп  $^{238}_{92}\text{U}$  природного урана в цепной ядерной реакции?
- В этом случае для осуществления управляемой цепной ядерной реакции что можно было бы не применять?

**■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Почему при делении ядра урана может возникнуть цепная ядерная реакция?			
2	Сколько энергии выделяется в реакции деления ядра урана? Что определяет эту энергию?			
3	Как обеспечивается управляемая цепная ядерная реакция?			
4	Почему неэффективно использовать в качестве ядерного горючего природный изотоп урана $^{238}_{92}\text{U}$ ?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листке эссе о механизме цепной ядерной реакции, происходящей с участием ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  и изобразите ее схематически.

## 4.12. ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

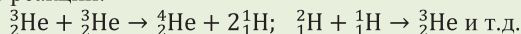
### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

#### Физика – 9

Для слияния (синтеза) двух ядер они должны преодолеть кулоновскую силу отталкивания имеющих одинаковые электрические заряды протонов и сблизиться до расстояния действия ядерных сил ( $10^{-15}\text{м}$ ). Для этого ядра должны иметь очень большую кинетическую энергию. Для получения ядер таких энергий реакцию синтеза необходимо проводить при очень высокой температуре ( $10^8\div 10^9\text{К}$ ), так как высокая температура является причиной резкого увеличения скорости и кинетической энергии ядер.

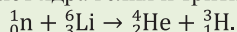
• *Реакция слияния (синтеза) легких ядер, протекающая при очень высокой температуре, называется термоядерной реакцией.*

Исследования показали, что внутри Солнца и других звезд, вероятнее всего, протекают следующие ядерные реакции:



• *Солнце и другие звезды – это самоуправляемые естественные термоядерные реакторы.*

Неуправляемая термоядерная реакция было получена при взрыве водородной бомбы. Боеголовка бомбы состоит из смеси дейтерия и трития, называемой LiD. В качестве запала (детонатора) используется атомная бомба. Сначала внутри водородной бомбы взрывают атомную бомбу. В результате резко возрастает температура, и возникает мощный поток нейтронов. Происходит реакция слияния нейтронов с изотопом лития. При ядерной реакции синтеза возникают ядра гелия и трития:



При слиянии ядер дейтерия и лития с нейтроном при высокой температуре происходит неуправляемая термоядерная реакция – выделяется огромное количество энергии, и водородная бомба взрывается.

■ Работающие на основе цепной реакции тяжелых ядер атомные электростанции (АЭС) имеют два важных преимущества по сравнению с тепловыми электростанциями: экологически более чистые, чем тепловые, и производят большое количество энергии, используя малое количество ядерного топлива.

Но вместе с тем АЭС ставит перед лицом человечества две серьезные проблемы: во-первых, радиоактивные элементы (в основном, уран и торий) составляют около  $(3\div 8) \cdot 10^{-4}\%$  от массы земной коры, и их добыча все усложняется; во-вторых, проблема безопасного захоронения растущего количества радиоактивных отходов.

- Существуют ли какие-либо ядерные реакции, которые, заменяя реакцию деления тяжелых ядер, сохраняя преимущества АЭС, устраняли бы её недостатки?
- Что может быть таким эффективным топливом?



Недостатки цепных ядерных реакций тяжелых ядер можно устранить, если для получения энергии использовать не реакции деления тяжелых ядер, а реакции синтеза (слияния) легких ядер. Реакции синтеза ядер эффективно протекают при сверхвысоких температурах порядка  $\approx 10^9\text{К}$  и самоподдерживаются за счет значительного выделения в них энергии. Причина выделения колоссальной энергии в таких

реакциях, названных термоядерными, та же, что и в случае реакции деления. То есть удельная энергия связи ядер, являющихся продуктами реакции, выше, чем у исходных ядер. Суммарная масса двух легких ядер, участвующих в реакции синтеза, больше, чем масса образованного из них результирующего ядра. Поэтому в результате реакции возникающий дефект массы является причиной выделения огромного количества энергии, определяемой по формуле:  $\Delta E = (m_1 - m_2) \cdot 931,5 \text{ МэВ}$ .

#### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

**В результате какой реакции на один нуклон выделяется больше энергии: в реакции синтеза двух легких ядер или в реакции деления тяжелых ядер?**

**Задача 1.** Простейшей термоядерной реакцией является преобразование двух ядер дейтерия в ядро гелия:  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ .

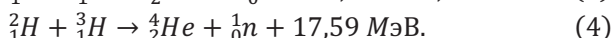
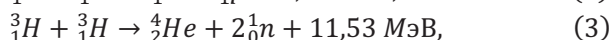
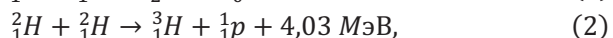
Определите удельную энергию связи ядра, выделяемую при этой реакции. Сравните значение этой энергии с соответствующим значением энергии, выделяемой в реакции деления ядра урана.

**Обсуждение результата:**

- В результате какой реакции на один нуклон выделяется больше энергии: в реакции синтеза двух легких ядер или в реакции деления тяжелых ядер? Почему?

Термоядерная реакция в природе происходит только в ядре Солнца и других звезд. Для осуществления их в условиях Земли необходимо разогреть вещество либо ядерным взрывом, либо мощным газовым разрядом, либо гигантским импульсом лазерного излучения, либо бомбардировкой интенсивным пучком частиц.

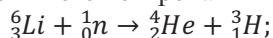
Для получения управляемой реакции синтеза необходимо создать термоядерный реактор. В таких реакторах, вероятнее всего, можно осуществить следующие ядерные реакции синтеза:



Как видно, наиболее энергетически выгодной является реакция (4), так как при этой реакции синтеза на один нуклон выделяется 3,5 МэВ энергии. В то время как в реакциях деления ядра урана на один нуклон выделяется всего 1 МэВ энергии.

Если было бы возможно создать термоядерный реактор, то он имел бы неоспоримое преимущество по сравнению с АЭС. Эти преимущества следующие:

- 1) производство энергии в огромном количестве;
- 2) имеется запас топлива в гигантском количестве: на Земле существуют практически неисчерпаемые запасы дейтерия (в воде морей и океанов), а тритий можно получать из лития при облучении его нейтронами в самом реакторе:



- 3) высокая экологическая безопасность реактора, так как при реакциях синтеза не образуются радиоактивные отходы.

К сожалению, на Земле не удаётся создать управляемый термоядерный реактор, работающий на сверхвысоких температурах, чтобы вырабатывать энергию в промышленных масштабах. Если бы можно было создать такой реактор, то энергетическая проблема на Земле была бы решена раз и навсегда. На Земле удалось

осуществить в настоящее время лишь неуправляемую термоядерную реакцию синтеза при взрыве водородной бомбы (см. Физика 9).

ПРИМЕНЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ

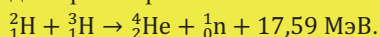
2

**Сколько энергии выделяется при термоядерной реакции получения гелия?**

**Задача 2.** Вычислите энергетический выход термоядерной реакции синтеза ядра гелия в 1 кг из ядер дейтерия и трития. Определите, сколько необходимо сжечь каменного угля, чтобы получить такое же количество энергии (удельная теплота сгорания угля  $3 \cdot 10^8$  Дж/кг).

**ПОДСКАЗКА**

Вычислите энергетический выход термоядерной реакции синтеза 1 кг ядра гелия из ядер дейтерия и трития:



**Обсуждение результата:**

- Сколько энергии выделится при реакции синтеза ядра гелия в 1 кг?
- Сколько кг каменного угля необходимо сжечь, чтобы получить такое же количество энергии?

#### ■ СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ

- Почему до сих пор не удалось создать реактор, работающий на основе термоядерной реакции синтеза? Решение какой проблемы в этом направлении ученые не могут найти?

#### ■ ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Чем объяснить, что при реакции синтеза ядер выделяется энергия в огромном количестве?			
2	Почему ядерные реакции синтеза происходят лишь при очень высокой температуре?			
3	Сравните энергии, приходящиеся на один нуклон, при синтезе и при реакциях деления ядер.			
4	Какие преимущества имеет термоядерный реактор по сравнению с АЭС? А в чем проблемы?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листке план реферата на тему “Атомное и ядерное оружие”.

#### ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ.

Напишите реферат на основе этого плана.

## 4.13. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕГИСТРАЦИИ

### • ВСПОМНИТЕ ПРОЙДЕННОЕ •

Физика – 9



Для возникновения ядерной реакции необходимо, чтобы взаимодействующие между собой частицы или ядра приблизились друг к другу на расстояние радиуса действия ядерных сил ( $\approx 10^{-15}$  м). По этой причине этим частицам необходимо сообщить большую кинетическую энергию. С этой целью используется специальная установка, называемая ускорителем элементарных частиц. На рисунке представлена блок-схема установки подземного ускорителя элементарных частиц длиной в десятки километров (а). В таких ускорителях, например,  $\alpha$ -частице сообщается кинетическая энергия, в сотни тысяч раз превышающая энергию  $\alpha$ -частицы при радиоактивном превращении. Первая ядерная реакция с ускоренной частицей (протоном) была проведена в 1932 году. Это реакция превращения ядра лития в два ядра гелия:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

■ Когда вы ознакомились с ядерными реакциями, вероятно, обратили внимание на такой факт: почти во всех реакциях участвуют элементарные частицы – фотоны, электроны, нейтроны, позитроны, нейтрино, антинейтрино. Эти частицы возникают из ядерных реакций либо путем взаимодействия ядер, либо путем создания других частиц, которые сами исчезают.

● **Что такое элементарные частицы? Чем они отличаются от других частиц?**

### ИССЛЕДОВАНИЕ

1

#### Определите заряд частицы

**Задача 1.** Поток частиц входит в однородное магнитное поле с индукцией 2 Тл перпендикулярно к ее линиям индукции со скоростью  $1,5 \cdot 10^7$  м/с. Если сила, действующая на поток частиц в магнитном поле, составляет  $1,5 \cdot 10^{-11}$  Н, определите заряд каждой частицы.

#### Обсуждение результата:

- Под действие какой силы попадет поток заряженных частиц, движущийся перпендикулярно к линиям индукции однородного магнитного поля?
- Как определяется заряд каждой частицы?
- Можно ли определить знак заряда потока частиц? Как?

#### Элементарные частицы.

● *Элементарными частицами называются такие частицы материи, которые невозможно расщепить на составные части.*

В современной физике к элементарным частицам относится большая группа частиц, которые не содержатся в атоме и атомном ядре. В эту группу входят фотон, электрон, нейтрон, протон, а также мезоны, мюоны, нейтрино, барионы, кварки и др. – всего приблизительно 400 частиц.

*Общими характеристиками всех элементарных частиц являются масса, время жизни, электрический заряд и спин.*



Первоначальная классификация элементарных частиц осуществлялась по их массе, что и получило отражение в названиях типов частиц: *лептоны – легкие, мезоны – средние, барионы – тяжелые.*

*Электрические заряды элементарных частиц* являются кратными положительным или отрицательным, дробным и нулевым значением величины элементарного электрического заряда. Например, электрический заряд фотона, нейтрино, бозона  $Z^0$ , мезона  $\pi^0$  равен нулю, а кварки обладают дробной величиной элементарного электрического заряда.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на три группы: *стабильные, квазистабильные и нестабильные.* В пределах точности современных измерений стабильными являются протон, электрон, фотон и нейтрино. Например, у протона продолжительность жизни равна  $10^{32}$  лет. Среднее время жизни у квазистабильных частиц  $\approx 10^{-20}$  с, а у нестабильных –  $\approx 10^{-23}$  с. Так как большинство элементарных частиц являются нестабильными, они почти не встречаются в природе. Такие частицы появляются в лабораторных условиях. Основным методом их получения является метод столкновения ускоренных стабильных частиц. В этот момент часть кинетической энергии этих частиц преобразуется в энергию вновь образовавшихся частиц. Можно сказать, что почти все элементарные частицы были получены лабораторными методами в ускорителях частиц. Пробный запуск самого большого в мире ускорителя элементарных частиц – Большого адронного коллайдера (БАК) – состоялся 10 сентября 2008 года.



**(b)** – Схема “Большого адронного коллайдера” (БАК). Здесь *ATLAS* (A Toroidal LHC ApparatuS), *ALICE* (A Large Ion Collider Experiment), *LHCb* (Large Hadron Collide Beauty Experiment) и *CMS* (Compact Muon Solenoid) – названия экспериментов, проведенных на установке БАК.

• Большой адронный коллайдер (БАК) – это установка, дающая возможность, сконцентрировать очень большую энергию в очень малой области пространства в результате ускорения стабильных частиц и их столкновений **(b)**.

Энергии частиц в БАКе измеряются в тераэлектронвольтах. Там сталкиваются пучки одинаковых частиц – протонов или ионов свинца. Пучки создаются в существующем циклическом ускорителе и вводятся в БАК. Там они движутся по окружности и могут делать до миллиона оборотов. На каждом круге пучки получают дополнительную энергию, и энергия двух сталкивающихся протонов повышается до 14 ТэВ.

Ученые выявили новую частицу, называемую *бозоном Хиггса*, в результате эксперимента, проведенного на установке БАК в 2012 году.

*Спин элементарных частиц* является целым или полуцелым кратным постоянной Планка  $\hbar$  механического момента частицы.

**Фундаментальные взаимодействия.** По современным представлениям, все взаимодействия в природе являются проявлениями четырех видов фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами (**таблица 4.5**).

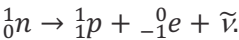
**Таблица 4.5.** Фундаментальные взаимодействия

Виды	Квант взаимодействий	Радиус воздействия, м	Относительная интенсивность
Сильное взаимодействие	Глюон	$10^{-15}$	1
Электромагнитное взаимодействие	Фотон	$\infty$	$10^{-2}$
Слабое взаимодействие	Бозоны $Z^0$ и $W^\pm$	$10^{-18}$	$10^{-10}$
Гравитационное взаимодействие	Гравитон	$\infty$	$10^{-38}$

**Сильное взаимодействие**, обеспечивает существование атомных ядер: существование протона и нейтрона в ядре, кварков в составах протона и нейтрона. Носителями сильного взаимодействия между кварками являются частицы, называемые глюонами. Современная классификация элементарных частиц определяется по их участию в сильном взаимодействии: группа частиц *адронов* (от греч. “*adros*” – *большой, сильный*), которые участвуют в сильных взаимодействиях, и группу *лептонов* (от греч. “*leptos*” – *тонкий, легкий*), которые не участвуют в сильном взаимодействии.

**Электромагнитное взаимодействие** характерно для всех частиц, обладающих электрическим зарядом. Оно осуществляется благодаря обмену фотонами между частицами. Электромагнитное взаимодействие обеспечивает возможность существования атомов, молекул, кристаллов и определяет свойства вещества (твердых тел, жидкостей, газов и плазмы). В зависимости от знака заряда частиц оно проявляется либо в виде сил притяжения, либо отталкивания.

**Слабое взаимодействие** обеспечивает преобразование элементарных частиц. Поэтому это взаимодействие характерно для всех элементарных частиц (кроме фотона). Примером слабого взаимодействия может служить  $\beta$ -распад нейтрона:



Слабое взаимодействие осуществляется благодаря обмену между тремя очень массивными частицами, которые назвали промежуточными векторными бозонами. Масса каждой из них почти в сто раз больше массы нуклона.

Из всех фундаментальных взаимодействий лишь *гравитационное* является универсальным. Гравитационное взаимодействие проявляется в виде сил тяготения между всеми частицами, у которых имеется масса.

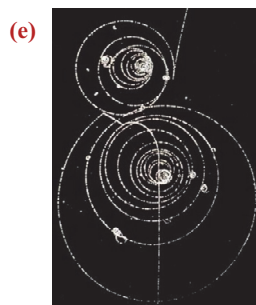
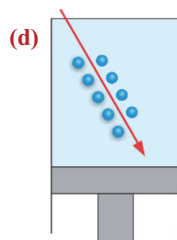
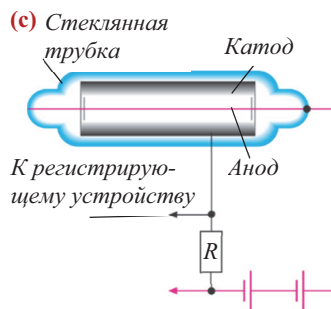
**Методы регистрации элементарных частиц.** Для регистрации частиц и для того, чтобы охарактеризовать их свойства, используются различные установки. Регистрация элементарных частиц основана на их свойстве вызывать ионизацию атомов вещества. Ознакомимся с двумя из них.

**Счетчик Гейгера.** Счетчик Гейгера – это устройство, используемое для подсчета частиц. Его принцип работы основан на ударной ионизации.

Счетчик состоит из стеклянной трубки, запаянной с обоих концов. Трубка заполнена инертным газом аргоном под давлением в 10 кПа и покрыта изнутри металлическим слоем – катодом. Тонкая металлическая нить, идущая вдоль оси трубки, является анодом (с). Между анодом и катодом создается высокое постоянное напряжение. Заряженная частица, попадая в трубку, вызывает ионизацию газа аргона. Электрическое поле, увеличивая скорость образованных ионов и электронов, направляет их соответственно к катоду и аноду. Ускоренные электроны при взаимодействии с нейтральными атомами газа вызывают вторичную ионизацию. Таким образом, возникает лавина ионов и электронов, и ток через счетчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения. Этот импульс передается к регистрирующему устройству, которое регистрирует радиоактивные частицы (в основном  $\gamma$ -кванты).

**Камера Вильсона.** Камера Вильсона – это устройство, позволяющее наблюдать следы быстрых частиц или сфотографировать эти следы. Действие устройства основано на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек воды.

Камера Вильсона представляет собой цилиндр с поршнем (d). Рабочий объем камеры заполнен насыщенным паром воды или спирта. При резком перемещении поршня вниз пар в объеме адиабатически расширяется и охлаждается, при этом становясь перенасыщенным. В этом состоянии пар легко конденсируется. Когда в этом пространстве пролетает частица, создающая на своем пути ионы, то на этих ионах образуются капельки сконденсировавшегося пара. Эти капельки образуют видимый след пролетевшей частицы – трек. По длине трека можно определить значение кинетической энергии, а по числу капелек на единицу длины трека оценивается ее скорость. Чем длиннее трек частицы, тем больше ее кинетическая энергия, а чем больше капелек воды образуется на единицу длины трека, тем



меньше ее скорость. Частицы с большим зарядом оставляют трек большей толщины. Если камеру поместить в однородное магнитное поле, то траектория заряженной частицы искривляется (е). По радиусу кривизны можно определить удельный заряд ( $\frac{q}{m}$ ) частицы.

ПРИМЕНЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ

2

**Чему равен удельный заряд частицы?**

**Задача 2.** Частица со скоростью  $v = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$  влетает в камеру Вильсона, находящуюся в магнитном поле с индукцией 1 Тл. Частица оставляет след радиусом  $R = 10 \text{ см}$ . Определите удельный заряд этой частицы.

**Обсуждение результата:**

- На основе какой формулы вы определили удельный заряд ( $\frac{q}{m}$ ) частицы?
- Чему равен удельный заряд частицы?

■ **СВЯЖИТЕ С ЖИЗНЬЮ**

Одним из регистрирующих устройств частиц является “Пузырьковая камера” (f).

- На чем основан принцип действия “Пузырьковой камеры”?

ПОДСКАЗКА

Необходимую информацию можно получить по следующим адресам:

1. [http://elibrary.bsu.az/110/N\\_106.pdf](http://elibrary.bsu.az/110/N_106.pdf)

2. <http://www.kimnezamanicatetti.com/kabarcik-odasi/?i=1>

3. [https://xn--j1ahfl.xn--p1ai/lessons/metodi\\_registracii\\_zaryazhennih\\_chastitc\\_124918.html](https://xn--j1ahfl.xn--p1ai/lessons/metodi_registracii_zaryazhennih_chastitc_124918.html)

■ **ОЦЕНИТЕ СВОИ ЗНАНИЯ:**

№	Вопросы	Знаю		
		слабо	средне	хорошо
1	Какие частицы называются элементарными?			
2	Каковы основные характеристики всех элементарных частиц?			
3	По каким характеристикам различают фундаментальные взаимодействия?			
4	Как классифицируются элементарные частицы по отношению к фундаментальным взаимодействиям?			
5	Какими методами регистрируются элементарные частицы? В чем разница между ними?			

**ЧТО ВЫ УЗНАЛИ?** Напишите в рабочем листке план реферата на тему “Методы регистрации элементарных частиц”.

#### 4.14. ФИЗИКА И СОВРЕМЕННАЯ ЖИЗНЬ (Урок-презентация)

При работе над презентацией можно использовать в качестве образца предложенные слайды или вы можете использовать рекомендуемый план.

**I. ОБРАЗЦЫ СЛАЙДОВ:** подготовьте слайды по соответствующим темам и комментируйте физическую основу принципа их действий.

*Слайд 1.*



*Слайд 2.*











**II. Презентацию можно подготовить на основе следующего плана**

**План:**

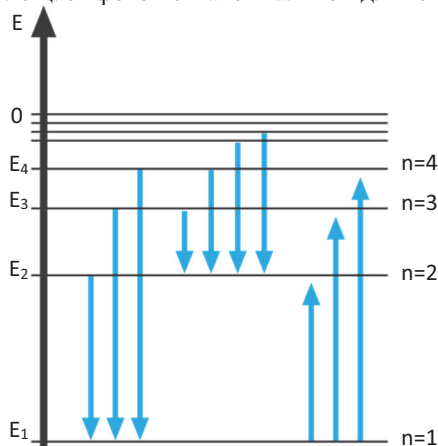
- 1. Что изучает физика?**
- 2. Современная физика и техника.**
- 3. Физика и сельское хозяйство: применение изотопов в сельском хозяйстве.**

4. Роль физики в исследовании космоса с Земли, в изучении Земли из космоса.
5. Физика и технология использования альтернативных источников энергии.
6. Физика и экология.

### **III. Рекомендуемые адреса электронной почты:**

1. <http://www.myshared.ru/slide/301352>
2. <https://ppt4web.ru/fizika/pochemu-fiziku-schitajut-osnovojj-tehniki.html>
3. <http://pandia.ru/text/79/459/28830.php>
4. <https://prezi.com/-9kfw7lq4prl/modern-fizigin-teknolojideki-uygulamalari/>
5. <https://esmaa08.wordpress.com/teknoloji-nasil-hayatimiza-girdi/>
6. <http://nurayyorulmaz.blogspot.ru/2016/01/11snf-fizik-modern-fizik-konu-anlatm>
7. <http://900igr.net/prezentacija/astronomija/issledovanie-kosmicheskikh-tel-245547/fizicheskie-osnovy-kosmicheskikh-poljotov-3.html>
8. [https://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2013/09/19/ is sledovaniya-zemli-iz-kosmosa](https://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2013/09/19/is sledovaniya-zemli-iz-kosmosa)
9. <http://allrefs.net/c30/11pft/p7/>
10. <http://stroychik.ru/raznoe/alternativnaya-energiya>
11. <http://www.novate.ru/blogs/280415/31040/>
12. <http://works.doklad.ru/view/oMxvntdkipc.html>
13. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract16.htm>
14. <http://www.derszamani.net/izotop-nedir-izotoplarin-ozellikleri.html>
15. <http://fhn.gov.az/ajax/boxNews.ajax.php?aze/4277>

- 4.1. Определите энергию и импульс фотона инфракрасного излучения длиной волны 1 мкм ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).
- 4.2. Зависит ли сила тока вакуумного фотоэлемента в опыте (см. рисунок б, тема 4.2):  
 а) от материала катода;  
 б) от интенсивности падающего света?
- 4.3. Зависит ли скорость фотоэлектронов в опыте (см. рисунок б, тема 4.2):  
 а) от интенсивности падающего света;  
 б) от частоты падающего света?
- 4.4. Будет ли наблюдаться фотоэффект при освещении серебряной пластины видимым светом? Работа выхода электронов из серебра 4,3 эВ.
- 4.5. При переходе электрона в атоме с одного стационарного уровня на другой был поглощен фотон с частотой  $6 \cdot 10^{14}$  Гц. Как изменилась энергия атома?
- 4.6. На рисунке изображены энергетические уровни атома и переходы между этими уровнями. Определите переходы, где атом излучает фотон с максимальной энергией и где поглощает фотон с максимальной длиной волны.



- 4.7. Определите частоту фотона, испускаемого при переходе атома водорода с уровня 2 на уровень 1.
- 4.8. Сколько электронов, протонов и нейтронов имеется в 360 г изотопа кислорода  $^{18}_8\text{O}$  ( $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ )?
- 4.9. Сколько электронов, протонов и нейтронов имеется в 112 г изотопе железа  $^{56}_{26}\text{Fe}$  ( $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ )?
- 4.10. Какой наименьшей энергией должен иметь  $\gamma$  – квант, чтобы осуществилась данная реакция:  $^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow ^1_1\text{H} + ^1_0\text{n}$ ?
- 4.11. Определите энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре  $^{13}_6\text{C}$ .
- 4.12. Поглощается или выделяется энергия в данной ядерной реакции, почему?  
 $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$

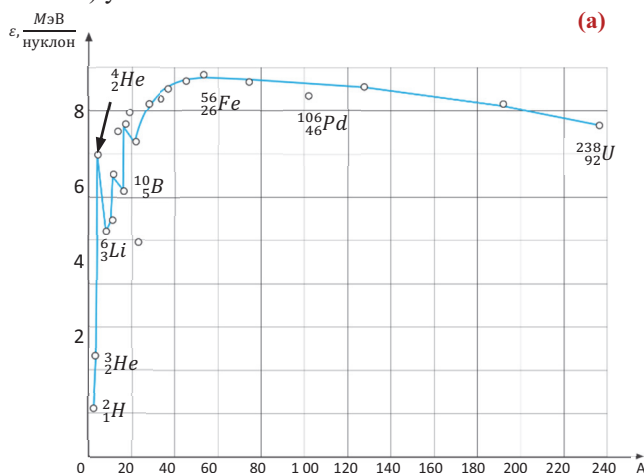
4.13. По графику зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов определите:

А. у какого элемента удельная энергия связи больше:

- 1) у элемента с массовым числом 200 или 100;
- 2) у элемента с массовым числом 20 или 80;
- 3) у элемента с массовым числом 50 или 150?

В. у какого элемента энергия связи больше:

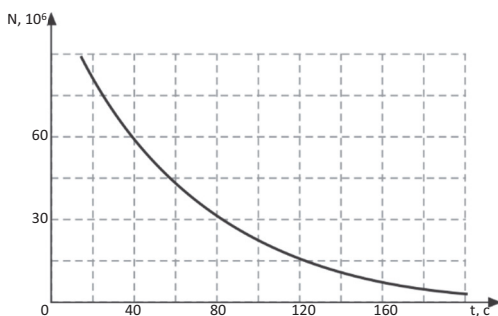
- 1) у элемента с массовым числом 200 или 100;
- 2) у элемента с массовым числом 20 или 80;
- 3) у элемента с массовым числом 50 или 150?



4.14. Какой изотоп образуется из изотопа сурьмы  $^{133}_{51}\text{Sb}$  после 4-х  $\beta$ -распадов?

4.15. Какой изотоп образуется из изотопа актиния  $^{227}_{89}\text{Ac}$  после 5-ти  $\beta$ -распадов и 2-х  $\alpha$ -распадов?

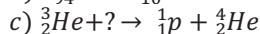
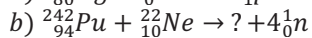
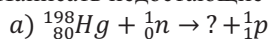
4.16. На рисунке показан график зависимости числа не-распавшихся изотопов от времени. Определите период полураспада этого изотопа.



4.17. При бомбардировке ядра бора  $^{11}_5\text{B}$  протонами образуется изотоп бериллия  $^8_4\text{Be}$ . Напишите реакцию и определите:

- а) какое еще ядро получается в реакции;
- б) сколько энергии выделится при этом?

4.18. Написать недостающие частицы в следующих ядерных реакциях:



4.19. Определите энергетический выход ядерной реакции:  ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ .

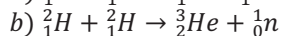
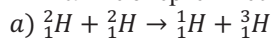
Массовые числа для лития-7, водорода -2 (дейтерия) и бериллия -8 соответственно равны: 7,01601 а.е.м., 2,0141 а.е.м. и 8,00531 а.е.м.

4.20. При захвате нейтрона ядром урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  образовались два ядра-осколка – барий  ${}^{142}_{56}\text{Ba}$  и криптон  ${}^{91}_{36}\text{Kr}$ , а также вылетели три нейтрона. Удельные энергии связи этих ядер:

$$\varepsilon_{235\text{U}} = 7,59 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}, \varepsilon_{142\text{Ba}} = 8,38 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}, \varepsilon_{91\text{Kr}} = 8,55 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}.$$

Напишите ядерную реакцию и определите энергетический выход этой реакции.

4.21. Вычислите энергетический выход в следующих термоядерных реакциях:



4.22. Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0,015 Тл по окружности радиусом 10 см. Определите импульс иона.

4.23. Из каких кварков состоят нейтрон и протон?

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

### Глава I

#### • ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

1.1.  $-3q$ .

1.2. а)  $6 \cdot 10^{23}$ ;

б) 10;

с)  $6 \cdot 10^{24}$ ;

д)  $-10^6$  Кл.

1.3.  $4,2 \cdot 10^{42}$ .

1.4.  $49 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$

1.5.  $9 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

1.6.  $2E$ .

1.7.  $10^3 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

1.8. а) 50В;

б)  $4 \cdot 10^{-4}$  Дж.

1.9.  $2200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

1.10. а) на участке 1 – поле совершает отрицательную работу, потенциальная энергия заряда увеличивается;

б) на участке 2 – поле совершает положительную работу, потенциальная энергия заряда уменьшается;

с) на участке 3 – поле не совершает работу, потенциальная энергия заряда не меняется.

1.11. Увеличивается в 4 раза.

1.12. а) Увеличивается в 3 раза; б) Увеличивается в 3 раза.

1.13. а)  $W_1 = 3W_2$ ;

б)  $q_1 = 3q_2$ ;

с)  $U_1 = U_2$ .

1.14. а)  $W_2 = 3W_1$ ;

б)  $q_1 = q_2$ ;

с)  $U_2 = 3U_1$ .

1.15. Если заряженная частица движется параллельно линиям индукции магнитного поля, то на нее сила Лоренца не действует, и заряд движется в поле равномерно прямолинейно.

1.16. Перпендикулярно к плоскости изображения.

1.17. а)  $1,6 \cdot 10^{-14}$  Н;

б) 1,4 мм.

1.18. а) направление вектора индукции магнитного поля проводника 1 в точке А перпендикулярно к плоскости рисунка;

б) направление вектора индукции магнитного поля проводника 2 в точке В перпендикулярно от плоскости рисунка вверх.

1.19. а) 0Н; б) 4,5Н

1.20. а) вверх; б) от нас в направлении к плоскости рисунка;

с) в противоположном направлении скорости перемещения стержня.

### Глава II

#### • ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

2.1.  $45 \cdot 10^{19}$

2.2.  $1,5625 \cdot 10^{-5}$  м/с

2.3.  $-187,5^\circ\text{C}$

2.4. До включения лампы ее спираль накаливания холодная, соответственно, сопротивление ее маленькое. По этой причине в момент включения лампы значение силы тока во много раз больше номинального значения, и в этот момент тонкая спираль накаливания лампы перегорает, не выдерживая большую силу тока.

2.5. Яркость увеличивается, так как на участке электрод-катод увеличится сопротивление, а электрическое поле ослабляется, напряжение будет уменьшаться, и поле не может препятствовать движению электронов.



- 2.6. 24 кВ.  
 2.7. 400 м.  
 2.8. 1,5 Ом; 2А.  
 2.9. а) 1 А; б) 0,2 А; в) 1,6 В; д) 0.  
 2.10. В соответствии с валентностью.  
 2.11. Элемент с большим отношением  $\frac{M}{\rho}$ .  
 2.12. Увеличится в 2 раза.  
 2.13. Уменьшатся оба.  
 2.15. n-типа: сурьма и фосфор; p-типа: индий, галлий и скандий.  
 2.16. 35 мА;  $\approx 1$  мА.  
 2.17. 1- проходит ток; 2- не проходит ток.  
 2.18. С примесью.  
 2.19. Толщина слоя в прямом соединении уменьшается, а в обратном соединении – увеличивается.  
 2.20.  $U_2 \gg U_1$ ;  $P_2 \gg P_1$ . Здесь учтено, что:  
 $P_1 = I_e^2 R_1$  и  $P_2 = I_k^2 R_2 \rightarrow I_e \approx I_e \rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_2}{R_1}$  или  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2}{U_1}$ .

### Глава III

#### • ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- 3.1. Увеличится в 2 раза.  
 3.2.  $2,4 \cdot 10^{-3}$  с; 417 Гц.  
 3.3. 2.  
 3.4. Увеличить в 5,76 раза.  
 3.5.  $t = \frac{1}{4}T = \frac{1}{4} \cdot 2\pi\sqrt{LC} = 15 \cdot 10^{-4}$  с.  
 3.6. 14 А.  
 3.7. 4 А.  
 3.8.  $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 68,75$  мкФ;  
 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 68,75} = 46,33$  Ом;  
 $I_m = \frac{U_m}{X_C}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} X_C} = \frac{20}{1,4 \cdot 46,33} = 0,31$  А;  
 $U = IX_C = 0,31 \cdot 46,33 = 14,36$  В.  
 3.9. 200 В.  
 3.10. R – 3;  $X_C$  – 1;  $X_L$  – 2.  
 3.11.  $125 \frac{\text{оборот}}{\text{мин}}$ .  
 3.12.  $7,46 \cdot 10^2$  Гц ÷  $7,46 \cdot 10^7$  Гц.  
 3.13.  $83,3 \cdot 10^{-8}$  с.  
 3.14.  $l_1 = \frac{c}{2v} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1700} \text{ м} = 88,235$  км.  
 $l_2 = \frac{ct}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}}{2} \text{ м} = 1,2 \cdot 10^2 \text{ м} = 120$  м.  
 3.15. Белый, серый, черный.

3.16. Синий.

3.17. 5.

3.18. 1, 3, 6.

3.19.  $k = 4$ .

3.20.  $k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2 \Rightarrow \lambda_2 = \frac{k_1\lambda_1}{k_2} = 466,7 \text{ нм}$ .

## Глава IV

### • АТОМНАЯ ФИЗИКА

4.1.  $E = 1,99 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,24 \text{ эВ}$ ;  $p = 6,63 \cdot 10^{-28} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

4.2. а) Чем меньше работа выхода фотоэлектрона из металла, тем больше сила тока;  
б) чем больше интенсивность света, тем больше сила тока.

4.3. а) не зависит;  
б) квадратичная зависимость.

4.4. Поскольку  $h\nu = 3,3 \text{ эВ}$ ,  $h\nu < A_{\text{вых}}$  фотоэффект не наблюдается.

4.5. Увеличится на  $|E_m - E_n| = h\nu = 3,978 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

4.6.  $4 \rightarrow 1$ ;  $1 \rightarrow 2$ .

4.7.  $2,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ .

4.8.  $N_e = 9,6 \cdot 10^{25}$ ;  $N_p = 9,6 \cdot 10^{25}$ ;  $N_n = 12 \cdot 10^{25}$ .

4.9.  $N_e = 3,12 \cdot 10^{25}$ ;  $N_p = 3,12 \cdot 10^{25}$ ;  $N_n = 3,6 \cdot 10^{25}$ .

4.10.  $E = 3 \text{ МэВ} = 4,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .

4.11.  $7,2657 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .

4.12. Поглощается энергия, потому что:

$$\Delta E = (m_{14\text{N}} + m_{4\text{He}} - m_{17\text{O}} - m_{1\text{H}}) \cdot 931,5 \text{ МэВ} = -0,6893 \text{ МэВ} < 0.$$

4.13. А. а) у элемента с массовым числом 100;  
б) у элемента с массовым числом 80;  
с) у элемента с массовым числом 50.

В. а) у элемента с массовым числом 200;  
б) у элемента с массовым числом 80;  
с) у элемента с массовым числом 150.

4.14. Получен изотоп цезия:  $^{133}_{51}\text{Sb} \rightarrow ^{133}_{55}\text{Cs} + 4 \cdot ^0_{-1}\text{e}$ .

4.15. Получен изотоп тория:  $^{227}_{89}\text{Ac} \rightarrow ^{219}_{90}\text{Th} + 5 \cdot ^0_{-1}\text{e} + 2 \cdot ^4_2\text{He}$ .

4.16. 40 с.

4.17. а)  $^{11}_5\text{B} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^8_4\text{Be} + ^4_2\text{He}$ ;  
б) 6,66 МэВ.

4.18. а)  $^{198}_{79}\text{Au}$ ; б)  $^{260}_{104}\text{Rf}$ ; с)  $^2_1\text{H}$

4.19. 15 МэВ.

4.20.  $^{235}_{93}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{142}_{56}\text{Ba} + ^{91}_{36}\text{Kr} + 3 \cdot ^1_0\text{n} + E$ ;  $E \approx 200 \text{ МэВ}$ .

4.21. а) 4,6 МэВ;

б) 3,26 МэВ.

4.22.  $p = qBR = 2,4 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

4.23.  $p(uud)$ ;  $n(udd)$ .

## Источники

1. Abdurazaqov R.R., Məsimov N. M., Padarov X.İ. Fizika. Hazırlıq şöbəsi üçün dərslik. Elektrodinamika. Optika. Atom və nüvə fizikası. – Bakı, Elm və təhsil, 2011, 260 s.
2. Abdurazaqov R.R. Fizika. Elektrodinamika. Optika. Kvant fizikası. Elektron dərslik komplekti. Metodik vəsait.– Bakı, Bakınəşr, 2007, 48 s.
3. Fizikadan nümayiş eksperimenti. 2 cildə. II cild. Elektrodinamika, Optika, Atom və atom nüvəsi fizikası. Müəllimlər üçün vəsait. – Bakı: Maarif, 1977, 361 s.
4. Məsimov E.Ə., Mürsəlov N.M. Atom fizikası. Dərslik. – Bakı, Çəşioğlu, 2002, 910 s.
5. Murquzov M.İ., Abdurazaqov R.R., Allahverdiyev A.M., Hüseynli M.B., Hüseynov C.İ. Fizika. Testlər. 9-11-ci siniflər üçün. – Bakı: Bakınəşr, 2012, 280 s.
6. Murquzov M.İ. Atom Fizikası. Dərslik. – Bakı, Elm və təhsil, 2011, 400 s.
7. Nəsirov V.İ. Elektrik və maqnetizm. Dərs vəsaiti. – Bakı, Adiloğlu, 2008, 392 s.
8. Qocayev N.M. Ümumi fizika kursu. Optika. 4 cildə. IV cild. – Bakı, Çəşioğlu, 2009, 624 s.
9. Fizik. Sınıf. 12. Ders kitabı. – Ankara, Korzayayıcılık, 2015. 342 s.
10. Çepni, Salih, Ayvacı Hakan Şevki, Çil Emine. Fen ve teknoloji. Laboratuvar uygulamalar. – Ankara, Pegem Akademi, 2012, 484 s.
11. Complete Physics for Cambridge IGCSE Student Book, Oxford University Press, 2017.
12. Gandhi, Jagdish. Education for Protection and Security: of the world's two billion children and generations yet to be born / J. Gandhi. Luckhom: Global Classroom, Pvt. Ltd., 2010. 260 p.
13. Стивен Попл. Физика в диаграммах. Оксфордские учебные пособия. М.: АСТ-Астрель, 2006, 160 с.
14. Жилко В.В., Маркович Л.Г. Решение творческих задач. – Минск, Аверсэв, 2012, 126 с.
15. Лукьянова А.В. Учимся решать задачи. Физика 11. – М.: Интеллект-центр, 2011, 176 с.
16. Хорошавин С. А. Демонстрационный эксперимент по физике. Оптика. Атомная физика. 10-11 классы. – М.: Просвещение, 2007, 240 с.
17. Якута Е.В. Физика. Подготовка к ОГЭ в 2017 году. Диагностические работы. – М.: МЦНМО, 2017, 122 с.

*BURAXILIŞ MƏLUMATI*

---

**FİZİKA – 11**

*Ümumtəhsil məktəblərinin 11-ci sinfi üçün  
Fizika fənni üzrə dərslik  
Rus dilində*

**Tərtibçi heyət:**

Müəlliflər: **Rasim Rəşid oğlu Abdurazaqov**  
**Rövşən Mirzə oğlu Əliyev**  
**Qalib Mövsüm oğlu Şərifov**

Elmi redaktor	<b>Mirzəli Murquzov</b>
Tərcüməçi	<b>Fəridə Babazadə</b>
Redaktor	<b>Oqtay Həsənov</b>
Bədii redaktor	<b>Taleh Məlikov</b>
Texniki redaktor	<b>Zeynal İsayev</b>
Dizayner	<b>Taleh Məlikov</b>
Rəssam	<b>Elmir Məmmədov</b>
Korrektor	<b>Olqa Kotova</b>

*Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin qrif nömrəsi:*  
*2018 – 207*

**© Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi – 2018**

Müəlliflik hüquqları qorunur. Xüsusi icazə olmadan bu nəşri və yaxud onun hər hansı hissəsini yenidən çap etdirmək, surətini çıxarmaq, elektron informasiya vasitələri ilə yaymaq qanuna ziddir.

Hesab-nəşriyyat həcmi: 9,3. Fiziki çap vərəqi: 13. Səhifə sayı: 208.  
Kağız formatı: 70 × 100<sup>1/16</sup>. Ofset kağızı. Məktəb qarnituru. Ofset çapı.  
Tirajı 7141. Pulsuz. Bakı – 2018

“Bakı” nəşriyyatı,  
Bakı, AZ1001, H.Seyidbəyli küç. 30

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

периоды	ряды	группы																												
		A	I	В	A	II	В	A	III	В	A	IV	В	A	V	В	A	VI	В	A	VII	В	A	VIII	В					
1	1	(H)																												
2	2	Li	3	Be	4	B	5	C	6	N	7	O	8	F	9	Ne									10					
3	3	Na	11	Mg	12	Al	13	Si	14	P	15	S	16	Cl	17	Ar									18					
4	4	K	19	Ca	20	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni									
5	5	29		Cu	30	Zn	31	Ga	32	As	33	Se	34	Br	35	Kr	36									37				
6	6	Rb	37	Sr	38	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd									
7	7	47		Ag	48	Cd	49	In	50	Sb	51	Te	52	I	53	Xe	54									55				
8	8	Cs	55	Ba	56	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt									
9	9	79		Au	80	Hg	81	Pb	82	Bi	83	Po	84	At	85	Rn	86									87				
10	10	Fr	87	Ra	88	89	Ac	106	Rf	104	Db	104	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110										
*Лантаноиды	Ce	Pr	58	Nd	60	Pm	61	Sm	62	Eu	63	Gd	64	Tb	65	Dy	66	Ho	67	Er	68	Tm	69	Yb	70	Lu				
**Актиноиды	Th	Pa	90	U	92	Np	93	Pu	94	Am	95	Cm	96	Bk	97	Cf	98	Es	99	Fm	100	Md	101	No	102	Lr				

# Pulsuz



## **Əziz məktəbli !**

Bu dərslik sənə Azərbaycan dövləti tərəfindən bir dərs ilində istifadə üçün verilir. O, dərs ili müddətində nəzərdə tutulmuş bilikləri qazanmaq üçün sənə etibarlı dost və yardımçı olacaq.

İnanırıq ki, sən də bu dərsliyə məhəbbətlə yanaşacaq, onu zədələnmələrdən qoruyacaq, təmiz və səliqəli saxlayacaqsan ki, növbəti dərs ilində digər məktəbli yoldaşın ondan sən kimi rahat istifadə edə bilsin.

Sənə təhsildə uğurlar arzulayırıq!