

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

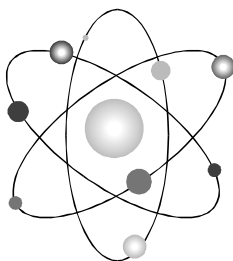
---

Н.Ю. БЕРЕЗИН

# ФИЗИКА

## Часть 2

Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия



НОВОСИБИРСК  
2020

УДК 53(075.8)  
Б 484

Рецензенты:

доцент кафедры общей физики НГТУ, канд. техн. наук *В.В. Христофоров*;  
заведующий лабораторией кафедры общей физики МГРИ,  
действительный член Академии горных наук,  
канд. техн. наук *В.А. Рафиевко*;  
дипломированный инженер-физик (МИФИ), канд. социол. наук, доцент  
кафедры государственного управления и политических технологий ГУУ,  
почетный профессор Международной геологоразведочной Академии  
(МГА), научный руководитель лаборатории-музея «Занимательная  
физика» МГРИ, член Экспертного Совета по профстандартам Комитета  
по труду, социальной политике и делам ветеранов  
Государственной думы ФС РФ *Н.Н. Соколов*

**Березин Н.Ю.**

Б 484      Физика: учебное пособие в 2 ч. / Н.Ю. Березин. – Новоси-  
бирск: Изд-во НГТУ, 2020.

ISBN 978-5-7782-4167-1

Ч. 2: – 94 с.

ISBN 978-5-7782-4169-5

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 19.03.04 «Технология продукции и организация общественного питания». В пособии описан опыт автора по организации самостоятельной деятельности студентов в рамках курса физики на примере систематизации информации для учебного процесса. Организация самостоятельной работы студентов в предлагаемой форме позволяет повысить уровень усвоения образовательных компетенций и мотивацию студентов. Также может быть полезно студентам младших курсов и преподавателям высших учебных заведений.

Работа подготовлена на кафедре общей физики

УДК 53(075.8)

ISBN 978-5-7782-4169-5 (Ч. 2)  
ISBN 978-5-7782-4167-1

© Березин Н.Ю., 2020  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2020

Дорога к мудрости не неисповедима.  
Наоборот, ее простой я вижу:  
Ошибка, промах, мимо, мимо, мимо,  
Но с каждым разом ближе, ближе,  
ближе.

*Пит Хейн. Груки*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс лекций «Физика» играет важную роль в формировании профессионального мышления будущих инженеров. Он закладывает тот фундамент исходных знаний по физике, отталкиваясь от которого студенты могут осваивать впоследствии дисциплины общего профессионального и специального профиля.

В курсе лекций студенты получают общее представление о физике как науке, об истории ее развития, своей будущей практической профессиональной деятельности, о теоретических направлениях в физике, учатся ориентироваться в этой системе знаний.

При создании учебного пособия преследовались следующие цели.

1. Помощь студентам в усвоении лекционного материала:
  - выделение и проработка наиболее важных вопросов, рассматриваемых в лекционном курсе;
  - структурирование пройденного материала.
2. Помощь преподавателю в контроле за усвоением данной дисциплины.

При написании пособия в разделе «Семинарские занятия» использованы материалы методических пособий «Вопросы для самоконтроля знаний по физике. Часть 2», составители А.В. Баранов, В.В. Давыдков, В.В. Христофоров; «Вопросы для самоконтроля знаний по физике. Часть 3», составители А.В. Баранов, В.В. Давыдков, В.В. Христофоров.

## КОНТРОЛЬ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Каждый студент должен выполнить определенное количество заданий самостоятельной работы и сдать ее преподавателю к контрольным неделям. Результат работы влияет на количество баллов, полученных студентом на контрольной неделе.

### Оценочный лист студента

| Вид деятельности                                                                                             | Количество баллов |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Лабораторная работа «Определение удельного заряда электрона методом магнетрона» (компьютерное моделирование) |                   |
| Лабораторная работа № 23                                                                                     |                   |
| Лабораторная работа № 32                                                                                     |                   |
| Лабораторная работа «Дифракция микро-частиц» (компьютерное моделирование)                                    |                   |
| Тест «Колебания»                                                                                             |                   |
| Физический диктант 1                                                                                         |                   |
| Физический диктант 2                                                                                         |                   |
| Физический диктант 3                                                                                         |                   |
| Физический диктант 4                                                                                         |                   |
| Физический диктант 5                                                                                         |                   |
| Физический диктант 6                                                                                         |                   |
| Физический диктант 7                                                                                         |                   |
| Физический диктант 8                                                                                         |                   |
| Физический диктант 9                                                                                         |                   |
| РГЗ. Задача № 1. Магнитное поле                                                                              |                   |
| РГЗ. Задача № 2. Магнитное поле                                                                              |                   |
| РГЗ. Задача № 3. Магнитное поле                                                                              |                   |

## Окончание таблицы

| Вид деятельности                 | Количество баллов |
|----------------------------------|-------------------|
| РГЗ. Задача № 4. Магнитное поле  |                   |
| РГЗ. Задача № 5. Магнитное поле  |                   |
| РГЗ. Задача № 6. Магнитное поле  |                   |
| РГЗ. Задача № 7. Магнитное поле  |                   |
| РГЗ. Задача № 8. Магнитное поле  |                   |
| РГЗ. Задача № 1. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 2. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 3. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 4. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 5. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 6. Волновая оптика |                   |
| РГЗ. Задача № 7. Волновая оптика |                   |
| Суммарный балл в семестре        |                   |
| ЭКЗАМЕН                          |                   |
| <b>ИТОГО</b>                     |                   |

До экзамена допускается студент, набравший по каждому виду деятельности минимальный балл:

- физический диктант – 50 баллов;
- тест – 16 баллов;
- лабораторная работа – 100 баллов;
- расчетно-графическое задание (одна задача) – 2 балла.

### **Критерии оценки при выполнении теста**

Тест считается выполненным **на пороговом** уровне, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, некоторые виды заданий выполнены с ошибками, оценка составляет 16 баллов. Студент дает определение основных понятий.

Тест считается выполненным **на базовом** уровне, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы

недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки, оценка составляет 25 баллов. Студент формулирует основные гипотезы, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, решает задачу по известным алгоритмам.

Тест считается выполненным **на продвинутом** уровне, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному, оценка составляет 33 балла. Студент проводит сравнительный анализ понятий, теорий, подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает различные методы решения.

### **Критерии оценки при выполнении физического диктанта**

Работа считается невыполненной, если теоретическое содержание курса не освоено, оценка составляет 00 баллов. Студент не дает определения основных понятий.

Работа считается выполненной на базовом уровне, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, некоторые виды заданий выполнены с ошибками, оценка составляет 50 баллов. Студент дает определение основных понятий.

Работа считается выполненной, если теоретическое содержание курса освоено полностью, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному, оценка составляет 100 баллов.

### **Критерии оценки при выполнении лабораторных работ**

Каждая лабораторная работа оценивается в 200 баллов с дискретизацией в 10 баллов: **максимум 100 баллов – защита работы и 100 баллов – протокол.**

**Защита** – минимум 50 баллов (вопросы первого уровня), максимум 100 баллов (вопросы третьего уровня). Защита лабораторной работы включает в себя устные ответы на вопросы из методических пособий с вопросами для защиты.

#### **Оценка протокола:**

- 1) общее оформление,
- 2) таблица измерений,
- 3) обработка результатов,
- 4) графики,
- 5) вывод.

Каждый пункт оценивается в 20 баллов. **Протокол сдан, если по каждому из пунктов студент набрал не менее 10 баллов.**

Сдать протокол измерений и защитить лабораторную работу допускается до следующего занятия включительно, иначе студент получает минимальный балл по каждому из видов контроля.

#### **Оформление протокола**

**Формат** – А4. Заготовка может быть выполнена в печатной форме. **Экспериментальные данные, графики, расчеты и выводы допускается оформлять только в рукописной форме!**

### **Критерии оценки при выполнении расчетно-графического задания**

Расчетно-графическое задание оформляется на компьютере и высылается на адрес электронной почты преподавателя. Имя файла должно быть на русском языке и выглядеть следующим образом: фамилия, имя, группа, РГЗ №... Сокращение слов, кроме общепринятых (кг, м<sup>2</sup>), не допускается. Изложение каждой задачи расчетно-графической работы начинается с новой страницы, обязательно приводится текст задачи, заголовки выделяются. Шрифт – Times New Roman, размер – 14, интервал – 1,5.

Задание следует оформлять аккуратно. Наличие полей обязательно на всех страницах (обычное).

Все формулы должны быть набраны в редакторе MathType.

Титульный лист должен быть оформлен стандартным образом (см. образец).

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

ФГБОУ ВО

Кафедра общей физики

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ  
по дисциплине «Общая физика»

Номер варианта \_\_\_\_\_

Номера заданий \_\_\_\_\_

Выполнил: Ф.И.О. студента \_\_\_\_\_

Форма обучения (дневная / заочная) \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_

Специальность \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Проверил: Ф.И.О. преподавателя \_\_\_\_\_

Оценка \_\_\_\_\_

НОВОСИБИРСК

20\_\_

Общая оценка по защите расчетно-графического задания студента определяется с учетом его теоретической подготовки, качества выполнения и оформления работы.

Защита расчетно-графического задания оценивается по 120-балльной системе. Оценка выставляется после положительной оценки, полученной в результате проверки преподавателем и устной защиты.

Результат 120 баллов выставляется студенту, который знает общие положения основного материала, грамотно его излагает и правильно применяет теоретические сведения.

Результат 30 баллов выставляется студенту, который не знает значительной части теоретического материала, допускает существенные ошибки.

### **Критерии оценки при сдаче экзамена**

Первый вопрос – 10 баллов.

Второй вопрос – 10 баллов.

Задача – 20 баллов.

Удачные обозначения обладают утонченностью и будят мысль, порой делая это, кажется, почти так же, как искусный учитель.

*Бертран Рассел*

## ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В УЧЕБНОМ ПОСОБИИ, И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

| Основные физические величины       |                                             |                              |                                  |
|------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Длина                              | $l$ , м                                     | Сила света                   | $J$ , кд                         |
| Масса                              | $m$ , кг                                    | Сила электрического тока     | $I$ , А                          |
| Время                              | $t$ , с                                     | Количество вещества          | $\nu$ , моль                     |
| Термодинамическая температура      | $T$ , К                                     |                              |                                  |
| Дополнительные физические величины |                                             |                              |                                  |
| Плоский угол                       | $\alpha$ , ф, рад                           | Телесный угол                | $\Omega$ , ср                    |
| Производные физические величины    |                                             |                              |                                  |
| Давление                           | $P$ , Па                                    | Скорость                     | $v$ , м · с <sup>-1</sup>        |
| Импульс                            | $p$ , кг · м · с <sup>-1</sup>              | Скорость угловая             | $\omega$ , рад · с <sup>-1</sup> |
| Коэффициент жесткости              | $k$ , Н · м <sup>-1</sup>                   | Скорость центра инерции      | $v_c$ , м · с <sup>-1</sup>      |
| Коэффициент трения                 | $\mu$                                       | Ускорение                    | $a$ , м · с <sup>-2</sup>        |
| Модуль Юнга                        | $E$ , Па                                    | Ускорение нормальное         | $a_n$ , м · с <sup>-2</sup>      |
| Момент импульса                    | $L$ , кг · м <sup>2</sup> · с <sup>-1</sup> | Ускорение свободного падения | $g$ , м · с <sup>-2</sup>        |
| Момент инерции                     | $J$ , кг · м <sup>2</sup>                   | Ускорение тангенциальное     | $a_\tau$ , м · с <sup>-2</sup>   |

Окончание таблицы

|                    |                                       |                            |                                               |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| Момент силы        | $M, \text{Н} \cdot \text{м}$          | Ускорение угловое          | $\varepsilon, \text{рад} \cdot \text{с}^{-2}$ |
| Мощность           | $N, \text{Вт}$                        | Частота                    | $\nu, \text{Гц}$                              |
| Напряжение упругое | $\sigma, \text{Па}$                   | Частота круговая           | $\omega, \text{с}^{-1}$                       |
| Период колебаний   | $T, \text{с}$                         | Энергия кинетическая       | $E_k, \text{Дж}$                              |
| Плотность          | $\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ | Энергия покоя              | $E_0, \text{Дж}$                              |
| Площадь            | $S, \text{м}^2$                       | Энергия полная             | $E, \text{Дж}$                                |
| Работа             | $A, \text{Дж}$                        | Энергия потенциаль-<br>ная | $E_{\text{п}}, \text{Дж}$                     |
| Сила               | $F, \text{Н}$                         | Энергия удельная           | $\frac{w}{\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}}$     |

Греческий алфавит

|               |              |               |               |
|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Α α – альфа   | Η η – эта    | Ν ν – ню      | Τ τ – тау     |
| Β β – бета    | Θ θ – тэта   | Ξ ξ – кси     | Υ υ – ипсилон |
| Γ γ – гамма   | Ι ι – йота   | Ο ο – омикрон | Φ φ – фи      |
| Δ δ – дельта  | Κ κ – каппа  | Π π – пи      | Χ χ – хи      |
| Ε ε – эпсилон | Λ λ – ламбда | Ρ ρ – ро      | Ψ ψ – пси     |
| Ζ ζ – дзета   | Μ μ – мю     | Σ σ – сигма   | Ω ω – омега   |

Приставки и множители десятичных кратных  
и дольных единиц международной системы СИ

|       |    |           |       |    |            |
|-------|----|-----------|-------|----|------------|
| экса  | Э  | $10^{18}$ | деци  | д  | $10^{-1}$  |
| пета  | П  | $10^{15}$ | санتي | с  | $10^{-2}$  |
| тера  | Т  | $10^{12}$ | милли | м  | $10^{-3}$  |
| гига  | Г  | $10^9$    | микро | мк | $10^{-6}$  |
| мега  | М  | $10^6$    | нано  | н  | $10^{-9}$  |
| кило  | к  | $10^3$    | пико  | п  | $10^{-12}$ |
| гекто | г  | $10^2$    | фемто | ф  | $10^{-15}$ |
| дека  | да | $10^1$    | атто  | а  | $10^{-18}$ |

### Фундаментальные физические константы

|                                                           |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Абсолютный ноль температуры                               | $t = -273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$                                 |
| Атомная единица массы                                     | $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$               |
| Гравитационная постоянная                                 | $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$      |
| Заряд $\alpha$ -частицы                                   | $q = 2e = 3,204 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                             |
| Комптоновская длина волны электрона                       | $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$                            |
| Магнитная постоянная                                      | $\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$                     |
| Магнитный момент протона                                  | $\mu_p = 1,4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$                       |
| Магнитный момент электрона                                | $\mu_e = 9,28483 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$                         |
| Масса $\alpha$ -частицы                                   | $m_\alpha = 6,644 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                           |
| Масса покоя нейтрона                                      | $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                            |
| Масса покоя протона                                       | $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                            |
| Масса покоя электрона                                     | $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                             |
| Постоянная Ридберга                                       | $R_n = 1,097 \cdot 10^7 \text{ 1/м}$                                   |
| Объем одного моля идеального газа при нормальных условиях | $V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$                 |
| Ускорение свободного падения                              | $g = 9,81 \text{ м/с}^2$                                               |
| <b>Нормальные условия:</b>                                |                                                                        |
| Атмосферное давление                                      | $p_0 = 101325 \text{ Н/м}^2$                                           |
| Температура                                               | $T = 273 \text{ К}$                                                    |
| Постоянная Авогадро                                       | $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$                       |
| Постоянная Больцмана                                      | $k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$                             |
| Постоянная Вина                                           | $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$                      |
| Постоянная Планка                                         | $h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$                |
| Постоянная Стефана–Больцмана                              | $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ |
| Постоянная Фарадея                                        | $F = 96,48456 \cdot 10^3 \text{ Кл/моль}$                              |
| Скорость света в вакууме                                  | $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$                                |
| Универсальная газовая постоянная                          | $R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$                  |
| Элементарный заряд                                        | $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                              |
| Удельный заряд электрона                                  | $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$                               |
| Электрическая постоянная                                  | $\epsilon_0 = 8,85418783 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$                   |
| Электронвольт                                             | $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$                         |

## Окончание таблицы

|                                       |                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Удельная теплоемкость воды            | $c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ |
| Удельная теплота плавления льда       | $\lambda = 333,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$           |
| Удельная теплота парообразования воды | $r = 2,256 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$                 |
| Масса Земли                           | $M_3 = 5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$               |
| Радиус Земли                          | $R_3 = 6,371 \cdot 10^6 \text{ м}$                   |
| Масса Солнца                          | $M_C = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ кг}$              |
| Радиус Солнца                         | $R_C = 6,955 \cdot 10^8 \text{ м}$                   |
| Масса Луны                            | $M_{\text{Л}} = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$       |
| Радиус Луны                           | $R_{\text{Л}} = 1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$           |

## ФОРМУЛЫ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ. ВОЛНЫ. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА»

**Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля**

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\mu$  – магнитная проницаемость изотропной среды (для вакуума  $\mu = 1$ );  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля.

**Магнитная индукция (индукция магнитного поля):**

- *в центре кругового тока*  $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$ ,

где  $R$  – радиус кругового тока;

- *поля бесконечно длинного прямого тока*  $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$ ,

где  $r$  – кратчайшее расстояние до оси проводника;

- *поля, созданного прямолинейным отрезком проводника с током:*

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы между направлением тока в проводнике и радиусом-вектором, соединяющим концы отрезка с точкой поля;

- *поля бесконечно длинного соленоида*

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида.

## Сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}].$$

По модулю

$$F = qvB \sin \alpha,$$

где  $F$  – сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле;  
 $v$  – скорость заряда  $q$ ;  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

## Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток через площадку $S$ ):

- для однородного магнитного поля

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к площадке;

- для неоднородного поля

$$\Phi = \int_S B \cos \alpha dS.$$

## Потокосцепление (полный поток)

$$\Psi = N\Phi,$$

где  $N$  – число витков катушки.

## Закон Фарадея–Ленца

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad \text{или} \quad \varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{для } N = 1),$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции.

## ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность контура ( $L = \text{const}$ ).

### **Индуктивность бесконечного соленоида**

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad n = \frac{N}{l},$$

где  $n$  – отношение числа намотанных витков  $N$  к длине соленоида  $l$ ;  
 $V$  – объем соленоида.

### **Энергия магнитного поля**

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V.$$

### **Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока через контур**

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R},$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – приращение магнитного потока;  $R$  – сопротивление контура.

### **Работа поля по перемещению замкнутого проводящего контура с постоянным током $I$ в магнитном поле**

$$A = I \Delta\Phi.$$

### **Уравнение гармонических колебаний**

$$x = A \cos(\omega t + \alpha), \quad \text{или} \quad x = A \sin(\omega t + \alpha),$$

где  $x$  – смещение (отклонение) колеблющейся величины от положения равновесия;  $A$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая (циклическая) частота;  $t$  – время;  $\omega t + \alpha$  – фаза,  $\alpha$  – начальная фаза.

### **Уравнение скорости**

$$v(t) = x'(t) = -A\omega \sin(\omega t + \alpha), \quad \text{или} \quad v(t) = x'(t) = A\omega \cos(\omega t + \alpha).$$

### **Уравнение ускорения**

$$a(t) = v'(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \alpha), \quad \text{или} \quad a(t) = v'(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \alpha).$$

### **Амплитуда скорости**

$$v_{\max} = A\omega.$$

### **Амплитуда ускорения**

$$a_{\max} = A\omega^2.$$

### **Связь между периодом и круговой частотой**

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

### **Частота**

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

### **Связь круговой частоты с частотой**

$$\omega = 2\pi\nu.$$

### **Полная энергия гармонического осциллятора**

$$W = \frac{kA^2}{2},$$

где  $k = m\omega^2$ ;  $k$  – жесткость пружины.

### **Периоды собственных незатухающих колебаний:**

- *пружинного маятника*

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где  $k$  – жесткость пружины;

- *математического маятника*

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

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

- *колебательного контура*

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC},$$

где  $L$  – индуктивность контура;  $C$  – емкость конденсатора;

- *физического маятника*

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mga}},$$

где  $J$  – момент инерции тела;  $a$  – расстояние центра масс маятника от оси колебаний.

### **Частота собственных колебаний**

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}.$$

### **Сложение двух косинусоидальных гармонических колебаний одинаковой частоты и направления:**

- *амплитуда результирующего колебания*

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды складываемых колебаний;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – начальные фазы складываемых колебаний;

- *начальная фаза результирующего колебания*

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \alpha_1 + A_2 \sin \alpha_2}{A_1 \cos \alpha_1 + A_2 \cos \alpha_2}.$$

### **Биения:**

- *период биений*

$$T_6 = \frac{2\pi}{|\omega_2 - \omega_1|} = \frac{1}{|\nu_2 - \nu_1|},$$

где  $\omega_2$ ,  $\omega_1$  – циклические частоты складываемых колебаний;  $\nu_2$ ,  $\nu_1$  – частоты складываемых колебаний;

- *уравнение биений*

$$x = 2A \cos\left(\frac{|\omega_2 - \omega_1|}{2}t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right).$$

### **Уравнение затухающих колебаний**

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

### **Закон изменения амплитуды затухающих колебаний**

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

где  $A_0$  – амплитуда в начальный момент времени;  $\beta$  – коэффициент затухания;  $t$  – время.

### **Коэффициент затухания:**

- *колеблющегося тела*

$$\beta = \frac{r}{2m},$$

где  $r$  – коэффициент сопротивления среды;  $m$  – масса тела;

- *колебательного контура*

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

где  $R$  – активное сопротивление;  $L$  – индуктивность контура.

### **Частота затухающих колебаний**

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

### **Период затухающих колебаний**

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

### Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}.$$

**Связь логарифмического декремента  $\lambda$  и коэффициента затухания  $\beta$**

$$\lambda = \beta T.$$

### Добротность

$$Q = \frac{\pi}{\lambda}.$$

### Значение амплитуды вынужденных колебаний

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

где  $\omega$  – частота вынужденных колебаний;  $f_0$  – приведенная амплитуда вынуждающей силы;

- *при механических колебаниях*

$$f_0 = \frac{F_0}{m};$$

- *при электромагнитных колебаниях*

$$f_0 = \frac{U_m}{L}.$$

### Резонансная частота

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

### Резонансная амплитуда

$$A_p = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

### **Полная энергия колебаний**

$$W = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 .$$

### **Уравнение плоской волны**

$$\xi = A \cos(\omega t - kx), \quad \text{или} \quad \xi = A \sin(\omega t - kx),$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\xi$  – смещение точек среды с координатой  $x$  в момент времени  $t$  ( $k$  – волновое число).

### **Длина волны**

$$\lambda = vT ,$$

где  $v$  – фазовая скорость распространения колебаний в среде;  $T$  – период колебаний.

### **Связь разности фаз $\Delta\varphi$ колебаний двух точек среды с расстоянием $\Delta x$ между точками среды**

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x .$$

### **Соотношение для координат пучностей**

$$x_{\text{пучн}} = \pm \frac{n\lambda}{2} .$$

### **Соотношение для координат узлов**

$$x_{\text{узл}} = \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} .$$

### **Собственные частоты струны (частоты нормальных колебаний)**

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2l} n ,$$

где  $v$  – скорость распространения волн;  $l = n \frac{\lambda}{2}$  – длина струны;  $n$  – целое число укладываемых половин длин волн.

### **Абсолютный показатель преломления**

$$n = \frac{c}{v},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$v$  – фазовая скорость распространения света в среде.

### **Относительный показатель преломления**

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления второй и первой среды.

### **Оптическая длина пути**

$$L = nr,$$

где  $n$  – показатель преломления среды;  $r$  – геометрическая длина пути световой волны.

### **Оптическая разность хода**

$$\Delta = L_2 - L_1,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – оптические пути двух световых волн.

### **Условие интерференционного (для синфазных источников):**

- *максимума*

$$\Delta = \pm m\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots;$$

- *минимума*

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

где  $\lambda_0$  – длина световой волны в вакууме;  $m$  – порядок интерференционного максимума или минимума.

**Оптическая разность хода волн в тонких пленках  
(показатель преломления окружающей среды  $n_0 = 1$ ):**

- *в отраженном свете*

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2};$$

- *в проходящем свете*

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i},$$

где  $d$  – толщина пленки;  $i$  – угол падения света;  $n$  – показатель преломления пленки.

**Ширина интерференционных полос в опыте Юнга**

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d},$$

где  $d$  – расстояние между когерентными источниками света;  $L$  – расстояние от источника до экрана.

**Радиус внешней границы  $m$ -й зоны Френеля  
для сферической волны**

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda,$$

где  $m$  – номер зоны Френеля;  $\lambda$  – длина волны;  $a$ ,  $b$  – соответственно расстояния диафрагмы с круглым отверстием от точечного источника и от экрана, на котором дифракционная картина наблюдается;

*для плоского фронта*

$$r_m = \sqrt{m\lambda r_0},$$

где  $m$  – номер зоны Френеля;  $\lambda$  – длина волны;  $r_0$  – расстояние от диафрагмы до экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

## **Дифракция Фраунгофера на щели**

Условие минимума

$$b \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad m = 1, 2, \dots$$

Условие максимума

$$b \sin \varphi = \pm \left( m\lambda + \frac{\lambda}{2} \right), \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $b$  – ширина щели;  $\varphi$  – угол дифракции.

## **Условие главных максимумов дифракционной решетки**

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $d$  – постоянная дифракционной решетки;  $\varphi$  – угол дифракции.

## **Постоянная дифракционной решетки**

$$d = \frac{1}{N_0},$$

где  $N_0$  – число штрихов на единицу длины решетки.

## **Общее число щелей решетки**

$$N = \frac{a}{d},$$

где  $a$  – ширина дифракционной решетки;  $d$  – постоянная дифракционной решетки.

## **Разрешающая способность дифракционной решетки**

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

где  $\Delta\lambda$  – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, разрешаемых решеткой;  $m$  – порядок спектра;  $N$  – общее число щелей решетки.

## **Закон Малюса**

$$I = I_0 \cos^2 \alpha ,$$

где  $I_0$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;  $I$  – интенсивность света, прошедшего через анализатор;  $\alpha$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

**Связь интенсивности естественного света  $I_{\text{ест}}$  с интенсивностью света, прошедшего поляризатор (и падающего на анализатор):**

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} (1 - k) ,$$

где  $k$  – относительная потеря интенсивности света в поляризаторе.

## **Закон Брюстера**

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21} ,$$

где  $\alpha_{\text{Бр}}$  – угол Брюстера (угол падения, при котором отраженный луч максимально поляризован);  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

## **Дисперсия вещества**

$$D = \frac{dn}{d\lambda} .$$

## **Средняя дисперсия**

$$\langle D \rangle = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1} .$$

## **Групповая скорость света**

$$u = \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right) .$$

## Фазовая скорость света

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

## Закон Стефана–Больцмана

$$R_e = \sigma T^4,$$

где  $R_e$  – энергетическая светимость (излучательность) черного тела;  
 $T$  – термодинамическая температура;  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$  (Дж/с·м<sup>2</sup>) / К<sup>4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана.

**Связь энергетической светимости  $R_e$  и спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\nu, T}(r_{\lambda, T})$  черного тела**

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda.$$

## Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^c = A_T \sigma T^4,$$

где  $A_T$  – поглощательная способность серого тела.

## Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где  $\lambda_{\max}$  – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела;  $b$  – постоянная Вина,

$$b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

## **Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры**

$$(r_{\lambda, T}) = CT^5,$$

где  $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ .

## **Формула Рэлея–Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела**

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

## **Энергия кванта**

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме;  $h = 2\pi\hbar$ .

## **Формула Планка**

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}; \quad r_{\lambda, T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{h\nu}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}.$$

## **Связь радиационной $T_p$ и истинной $T$ температур**

$$T_p = \sqrt[4]{A_T T},$$

где  $A_T$  – поглощательная способность серого тела.

## Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\varepsilon = h\nu = A + T_{\max},$$

где  $\varepsilon = h\nu$  – энергия фотона, падающего на поверхность металла;  $A$  – работа выхода электрона из металла;  $T_{\max} = \frac{m2\pi v_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

### «Красная граница» фотоэффекта для данного металла

$$\nu_0 = \frac{A}{h}; \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где  $\lambda_0$  – максимальная длина волны излучения ( $\nu_0$  – соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен.

### Масса и импульс фотона

$$m_\gamma = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}; \quad p_\gamma = \frac{h\nu}{c},$$

где  $h\nu$  – энергия фотона.

### Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\theta}{2} = 2\lambda_c \sin^2\frac{\theta}{2},$$

где  $\lambda$  и  $\lambda'$  – длины волн падающего и рассеянного излучения;  $m_0$  – масса электрона;  $\theta$  – угол рассеяния,  $\lambda_c = \frac{h}{m_0c}$  – комптоновская длина волны.

## Длина волны де Бройля

*Для нерелятивистской частицы*

$$\lambda_B = \frac{2\pi \hbar}{p} = \frac{2\pi \hbar}{mv},$$

где  $p$  – импульс нерелятивистской частицы

$$\lambda_B = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2mE}},$$

где  $E$  – кинетическая энергия нерелятивистской частицы;  $m$  – масса частицы

$$\lambda_B = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{3mkT}},$$

где  $m$  – масса частицы;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура

$$\lambda_B = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2mqU}},$$

где  $q$  – заряд частицы;  $U$  – разность потенциалов

*Для релятивистской частицы*

$$\lambda_B = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2E_{\text{кин}} m_0 + \frac{E_K^2}{c^2}}},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы;  $E_{\text{кин}}$  – кинетическая энергия релятивистской частицы,  $E_{\text{кин}} = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2$ ;  $p$  – импульс,

$$\frac{h}{\lambda} = p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{c} \sqrt{E_{\text{кин}} (E_{\text{кин}} + 2m_0 c^2)}$$

### Соотношения неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar; \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar; \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar; \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где  $\Delta p_x$ ,  $\Delta p_y$ ,  $\Delta p_z$  – неопределенности проекции импульса частицы на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – неопределенности ее координат;  $\Delta E$  – неопределенность энергии состояния частицы;  $\Delta t$  – время пребывания частицы в данном квантовом состоянии.

# УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА. ОДНОМЕРНЫЙ БЕСКОНЕЧНО ГЛУБОКИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ЯЩИК. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР. АТОМ ВОДОРОДА. МОЛЕКУЛЫ

**Волновая функция  $\psi$  (или пси-функция)**

Вероятность  $dP$  того, что частица в момент времени  $t$  будет обнаружена в пределах объема  $dV$  :

$$dP = |\psi|^2 dV = \psi\psi^* dV ;$$

$\int \psi\psi^* dV = 1$  – условие нормировки.

**Общее уравнение Шрёдингера (уравнение Шрёдингера, зависящее от времени)**

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U(x, y, z, t)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t},$$

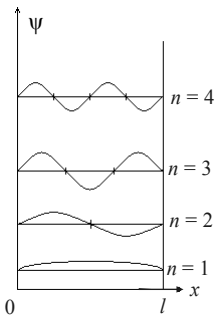
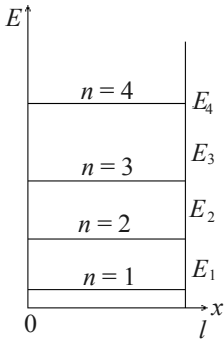
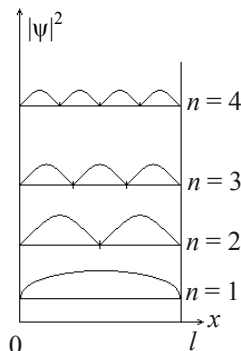
где  $m$  – масса частицы;  $i$  – мнимая единица;  $U(x, y, z, t)$  – потенциальная функция частицы в силовом поле, в котором она движется;  $\Delta$  – оператор Лапласа  $\left( \Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} \right)$ ;  $\psi(x, y, z, t)$  – волновая функция частицы.

## Стационарное уравнение Шрёдингера

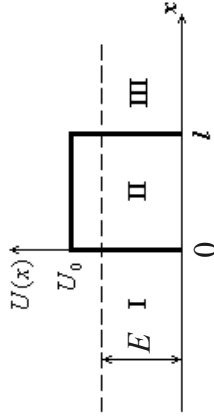
$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0,$$

где  $E$  – полная энергия частицы;  $U$  – потенциальная энергия частицы в силовом поле, в котором она движется.

### Частица в одномерном бесконечно глубоком потенциальном «ящике»

| Собственные $\psi$ -функции                                                                                                          | Собственные значения энергии электрона                                                                                               | Расстояние между энергетическими уровнями                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l},$ $n=1, 2, 3, 4, \dots$                                                           | $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2},$ $n=1, 2, 3, 4, \dots$                                                                           | $\Delta E_n = E_{n+1} - E_n =$ $= \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (2n+1) \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n$                          |
|  <p style="text-align: center;"><math>a</math></p> |  <p style="text-align: center;"><math>б</math></p> |  <p style="text-align: center;"><math>в</math></p> |

# Прохождение частицы сквозь потенциальный барьер. Туннельный эффект



| Об-<br>ласть | Уравнение<br>Шрёдингера                                          | Решение<br>уравнения Шрёдингера                                                                                                       | Значения коэффи-<br>циентов $k_1, k_2$ и $\beta$                                             | Коэффициент<br>отражения $R$                                                                                                                                  | Коэффициент<br>прозрачности $D$                                                                                                   |
|--------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I и III      | 1. $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0$         | 3. $\psi_1 = A_1 e^{iK_1 X} + B_1 e^{-iK_1 X}$ .<br>4. $\psi_3 = A_3 e^{iK_1 X} + B_3 e^{-iK_1 X}$ ,<br>или $\psi_3 = A_3 e^{iK_1 X}$ | 7. $k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$                                                          |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                   |
| II           | 2. $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0)\psi = 0$ | 5. $\psi_2 = A_2 e^{iK_2 X} + B_2 e^{-iK_2 X}$ .<br>6. $\psi_2 = A_2 e^{-\beta X} + B_2 e^{\beta X}$                                  | 8. $k_2 = \frac{\sqrt{2m(E - U_0)}}{\hbar}$<br>9. $\beta = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$ | $R = \frac{ B_1 ^2}{ A_1 ^2} = \frac{ k_1 - k_2 ^2}{ k_1 + k_2 ^2} = \frac{\left 1 - \sqrt{\frac{U_0}{E}}\right ^2}{\left 1 + \sqrt{\frac{U_0}{E}}\right ^2}$ | $D = \frac{ A_3 ^2}{ A_1 ^2} = \frac{4k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \approx \frac{2}{e^{\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} l}} = 1 - R$ |

## Атом водорода

Энергия электрона

$$E_n = - \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2} \text{ (Дж)},$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Состояние, в котором находится электрон с минимальным значением энергии, называется *основным* ( $E_1 = -13,6$  эВ). Все остальные состояния ( $E_2, E_3, \dots$ ) называются возбужденными.

## КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА

**Главное квантовое число  $n$**  определяет энергию электрона в атоме ( $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ).

**Орбитальное квантовое число  $l$**  определяет момент импульса электрона в атоме. При заданном значении  $n$  квантовое число  $l$  может принимать значения  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$ . Момент импульса (механический орбитальный момент) электрона квантуется (принимает дискретные значения) и рассчитывается по формуле

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

**Магнитное квантовое число  $m_l$**  определяет проекцию момента импульса  $L_{l_z}$  электрона на физически заданное направление. При заданном  $l$  число  $m_l$  может принимать значения  $m_l = -l, -(l-1), \dots, 0, 1, \dots, l$ , всего  $(2l+1)$  значений.

Проекция момента импульса  $L_{l_z}$  принимает квантованные значения

$$L_{l_z} = m_l \hbar.$$

**Спиновое квантовое число  $s$**  принимает у электрона значения  $s = \pm \frac{1}{2}$ . Спин электрона – квантовая величина, у нее нет классического аналога; это внутреннее неотъемлемое свойство электрона, подобно его заряду.

Собственный механический момент импульса (спин)  $L_s$  квантуется:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}.$$

Проекция спина  $L_{sz}$  на направление внешнего магнитного поля – величина квантованная:

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

где  $m_s$  – спиновое магнитное квантовое число.

Оно может иметь только два значения:  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ .

**Спектры испускания и поглощения** атома водорода. В квантовой механике вводятся *правила отбора*, ограничивающие число возможных переходов электронов в атоме, связанных с испусканием и поглощением света.

Изменение орбитального квантового числа  $\Delta l$  удовлетворяет условию

$$\Delta l = \pm 1.$$

Изменение магнитного квантового числа  $\Delta m_l$  удовлетворяет условию

$$\Delta m_l = \pm 1.$$

При переходе электрона в атоме водорода с одного энергетического уровня на другой испускается или поглощается квант энергии с частотой  $\omega$ :

$$\omega = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где  $n$  определяет серию ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );  $m$  – отдельные линии соответствующей серии ( $n = m + 1, n = m + 2, n = m + 3, \dots$ );  $R$  – постоянная Ридберга  $\left( R = 2,07 \cdot 10^{16} \frac{1}{c} \right)$ .

### Молекулы. Молекулярные спектры

Энергия молекулы, имеющей момент инерции  $I$  и вращающейся с угловой скоростью  $\omega_r$ , равна

$$E_r = \frac{I \omega_r^2}{2} = \frac{I^2 \omega_r^2}{2I} = \frac{L^2}{2I} = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2I},$$

где  $L = I \omega_r$  – момент импульса молекулы.

Момент импульса молекулы – величина квантованная:

$$L = \hbar \sqrt{J(J+1)},$$

где  $J$  – вращательное квантовое число. Оно может принимать значения  $J = 0, 1, 2, \dots$

Для вращательного квантового числа имеется правило отбора

$$\Delta J = \pm 1.$$

### **Вращательные полосы**

Наименьшей энергией обладают фотоны, соответствующие переходам молекулы из одного вращательного состояния в другое:

$$\hbar\omega = \Delta E_r = \frac{\hbar^2(J+1)(J+2)}{2I} - \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2I} = \frac{\hbar^2 \cdot 2(J+1)}{2I}.$$

Частоты линий, испускаемых при переходах между вращательными уровнями, могут иметь значения:

$$\omega = \frac{\Delta E_r}{\hbar} = \frac{\hbar}{2I} 2(J+1) = 2B(J+1) = \omega_1(J+1),$$

где  $B = \frac{\hbar}{2I}$ ;  $J$  – квантовое число уровня, на который совершается переход.

### **Приведенная масса двухатомной молекулы**

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы атомов, входящих в состав молекулы.

### **Собственная круговая частота двухатомной молекулы**

$$\omega = \sqrt{\frac{\beta}{\mu}},$$

где  $\beta$  – коэффициент квазиупругой силы.

## **Энергия колебания квантового гармонического осциллятора**

$$E_n = \hbar\omega \left( n + \frac{1}{2} \right),$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$

### **Нулевая энергия**

$$E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}.$$

## **Энергия диссоциации двухатомной молекулы**

$$E_d = \frac{\hbar\omega}{4\gamma}(1 - 2\gamma),$$

где  $\gamma$  – коэффициент ангармоничности.

**Момент инерции двухатомной молекулы относительно оси, проходящей через ее центр инерции перпендикулярно прямой, соединяющей ядра атомов:**

$$I = \mu d^2,$$

где  $\mu$  – приведенная масса молекулы;  $d$  – межъядерное расстояние.

## **Энергия вращательного движения двухатомной молекулы**

$$E_J = BJ(J+1),$$

где  $J$  – вращательное квантовое число;  $B$  – вращательная постоянная,

$$B = \frac{\hbar^2}{2I}.$$

## ПОРЯДОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Записать все данные (с их единицами) и искомые в задаче величины.

2. Записать все данные задачи в СИ.

3. Сделать чертеж, схему или рисунок с обозначением данных задачи (в зависимости от условий задачи).

4. Установить, какие физические законы отвечают содержанию данной задачи.

5. Решить задачу в общем виде (получить «рабочую формулу»), т. е. выразить искомую величину через заданные в задаче. При изучении движения точки (поступательного движения твердого тела) необходимо:

а) выбрать систему отсчета, относительно которой изучается движение;

б) связать с ней систему координат;

в) записать закон движения точки в векторном виде;

г) перейти к скалярной записи уравнений движения в проекциях на выбранные оси;

д) записать начальные данные и дополнительные условия рассматриваемого движения;

е) решить полученную систему уравнений и проанализировать ответ;

ж) если в движении участвует несколько тел, то удобно выбрать общие для всех начала отсчета перемещения и времени.

При изучении вращения тела вокруг неподвижной оси надо перейти к угловым характеристикам движения (угловому перемещению, угловой скорости, угловому ускорению), так как они одинаковы для всех точек тела, в то время как линейные характеристики различны.

6. Произвести вычисления.

7. Желательно произвести проверку единиц величин, подставив их в «рабочую формулу». Полученная единица должна совпадать с единицей искомой в задаче величины.

## **КОНСПЕКТЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ ЗАПОЛНЯЮТСЯ СТУДЕНТАМИ ВМЕСТЕ С ПРЕПОДАВАТЕЛЕМ НА ЗАНЯТИЯХ**

### **Занятие 1. «Магнетизм»**

- Магнитное поле.
- Индукция и напряженность магнитного поля.

### **Занятие 2. «Магнетизм»**

- Законы электромагнетизма.

### **Занятие 3. «Магнетизм»**

- Электромагнитная индукция.
- Самоиндукция.
- Энергия магнитного поля.

### **Занятие 4. «Колебания и волны»**

- Механические колебания и волны.

### **Занятие 5. «Колебания и волны»**

- Электромагнитные колебания и волны.

### **Занятие 6. «Волновая оптика»**

- Волновые свойства света.

### **Занятие 7. «Тепловое излучение»**

- Тепловое излучение.

### **Занятие 8. «Тепловое излучение»**

- Фотоны.
- Давление света.
- Фотоэффект.
- Эффект Комптона.

### **Занятие 9. «Квантовая физика»**

- Электронные оболочки атома.
- Теория Бора.
- Элементы квантовой механики.

## **ЗАНЯТИЕ 1**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Магнетизм»***

1. Как можно обнаружить магнитное поле в какой-либо области пространства?
2. Что является источником магнитного поля?
3. В чем проявляется релятивистский характер магнитного поля?
4. Дайте определение вектору магнитной индукции **B**. В каких единицах она измеряется?
5. Как экспериментальным путем можно определить вектор магнитной индукции **B** в интересующей нас точке пространства?
6. Что представляют собой линии магнитной индукции? Какими свойствами они характеризуются? Всегда ли они замкнуты?
7. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора магнитной индукции. На какие особенности магнитного поля она указывает?
8. Почему магнитное поле называют вихревым или соленоидальным?
9. Какое магнитное поле называется однородным?
10. В чем заключается принцип суперпозиции для магнитного поля и вектора магнитной индукции?
11. Как рассчитывается вектор магнитной индукции поля точечного заряда, движущегося без ускорения? Как называются и какой имеют смысл величины, входящие в выражение?
12. Как найти модуль и определить направление вектора магнитной индукции поля движущегося точечного заряда в интересующей нас точке?
13. Как выглядят линии магнитной индукции поля прямолинейно и равномерно движущегося точечного заряда? Как определяется их направление?
14. Как рассчитать индукцию магнитного поля, создаваемого несколькими движущимися зарядами?
15. Сформулируйте закон Био–Савара–Лапласа. Что он позволяет определить? Как называются и какой смысл имеют величины, входящие в выражение?
16. Как определяются направление и модуль вектора  $d\mathbf{B}$  из формулы закона Био–Савара–Лапласа?
17. Как рассчитать индукцию магнитного поля произвольного проводника с током в интересующей нас точке пространства, используя закон Био–Савара–Лапласа?

18. Как называется и какой физический смысл имеет величина  $\mu_0$ , входящая в формулу закона Био–Савара–Лапласа?

19. Запишите выражение для расчета магнитной индукции поля бесконечного прямого проводника с током.

20. Как выглядят линии магнитной индукции поля бесконечного прямого проводника с током? Как определяется их направление?

21. Как можно рассчитать индукцию магнитного поля бесконечного прямого проводника с током в интересующей точке пространства, используя закон Био–Савара–Лапласа?

22. Запишите выражение для магнитной индукции поля в центре кругового витка с током.

23. Как выглядят линии магнитной индукции поля кругового витка с током? Как определяется их направление?

24. Как можно рассчитать индукцию магнитного поля кругового витка с током в интересующей точке пространства, используя закон Био–Савара–Лапласа?

25. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора магнитной индукции для магнитного поля, созданного несколькими постоянными токами в вакууме.

26. Запишите выражение для расчета магнитной индукции поля внутри бесконечного соленоида с током.

27. Как выглядят линии магнитной индукции поля соленоида с током? Как определяется их направление?

28. Как можно рассчитать индукцию магнитного поля внутри бесконечного соленоида с током, используя теорему о циркуляции вектора магнитной индукции?

29. Запишите выражение для расчета магнитной индукции поля внутри тороидальной катушки с током.

30. Как выглядят линии магнитной индукции поля тороидальной катушки с током? Как определяется их направление?

31. Как рассчитать индукцию магнитного поля внутри тороидальной катушки с током, используя теорему о циркуляции вектора магнитной индукции?

32. Что такое сила Лоренца? Чему она равна? Как называются и какой имеют смысл величины, входящие в выражение?

33. Как определяются направление и модуль силы Лоренца?

34. Как под действием силы Лоренца может двигаться заряженная частица?

35. Может ли заряженная частица в магнитном поле двигаться по прямой?

36. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если скорость частицы направлена перпендикулярно линиям индукции?

37. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если скорость частицы не направлена перпендикулярно линиям индукции?

38. Может ли сила Лоренца изменить кинетическую энергию частицы, на которую она действует?

39. Как сила Лоренца влияет на скорость заряженной частицы, движущейся в магнитном поле?

40. Что такое сила Ампера? Чему она равна? Как называются и какой смысл имеют величины, входящие в выражение для силы Ампера?

41. Каков механизм возникновения силы Ампера?

42. Как определяются направление и модуль силы Ампера для элемента  $dl$  тонкого проводника с током?

43. Как определить равнодействующую силы Ампера для произвольной конфигурации проводника с током?

44. Чему равна равнодействующая силы Ампера для контура с током, находящимся в однородном магнитном поле?

45. Как ведет себя контур с током в однородном магнитном поле?

46. Как ведет себя контур с током в неоднородном магнитном поле?

47. Чему равен момент сил, действующий на контур с током в однородном магнитном поле? Как называются и какой имеют смысл величины, входящие в выражение?

48. Как определяется вектор магнитного момента контура с током? В каких единицах он измеряется?

49. Как определить модуль и направление вектора магнитного момента контура с током?

### • *Магнитное поле*

#### • *Индукция и напряженность магнитного поля*

1. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 50 см друг от друга, в одном направлении текут токи силой по 5 А. Между проводниками на расстоянии 30 см от первого расположен центр кольцевого проводника, сила тока в ко-

тором 5 А. Радиус кольца 20 см. Определить индукцию и напряженность магнитного поля, создаваемого токами в центре кольцевого проводника (рассмотреть несколько вариантов расположения кольцевого проводника).

2. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга, текут токи силой 5 А в каждом. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого токами в точке, лежащей посередине между проводниками в случаях, когда: 1) проводники параллельны и токи текут в одном направлении; 2) проводники перпендикулярны.

3. Изолированный проводник изогнут в виде прямого угла со сторонами 20 см каждая. В плоскости угла помещен кольцевой проводник радиусом 10 см так, что стороны угла являются касательными к кольцу. Найти индукцию в центре кольца. Силы токов в проводнике равны 2 А. Влияние подводящих проводов не учитывать.

4. Два бесконечно длинных прямых проводника, сила тока в которых 6 и 8 А, расположены перпендикулярно друг другу. Определить индукцию и напряженность магнитного поля на середине кратчайшего расстояния между проводниками, равного 2 см.

5. По двум бесконечно длинным прямым проводникам, расстояние между которыми 15 см, в одном направлении текут токи 4 и 6 А. Определить расстояние от проводника с меньшей силой тока до геометрического места точек, в котором напряженность магнитного поля равна нулю.

6. По двум бесконечно длинным прямым проводникам, расстояние между которыми 15 см, в противоположных направлениях текут токи 4 и 6 А. Определить расстояние от проводника с меньшей силой тока до геометрического места точек, в котором напряженность магнитного поля равна нулю.

7. В кольцевом проводнике радиусом 10 см сила тока 4 А. Параллельно плоскости проводника на расстоянии 2 см над его центром проходит бесконечно длинный проводник, сила тока в котором 2 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре кольца. Рассмотреть все возможные случаи.

8. Два круговых витка с током лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Радиус большего витка 12 см, а меньшего 2 см. Напряженность поля в центре витков равна 50 А/м, если токи текут в одном направлении, и равна нулю, если в противоположных. Определить силу тока в витках.

9. По квадратной рамке со стороной 0,2 м течет ток 4 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре рамки.

## **ЗАНЯТИЕ 2**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Магнетизм»***

1. Что происходит с веществом при помещении в магнитное поле?
2. Какие существуют механизмы намагничивания вещества?
3. В чем заключается процесс намагничивания вещества?
4. Что такое вектор намагниченности? В каких единицах он измеряется?
5. Что такое молекулярный ток?
6. Что такое ток намагничивания? Чем он отличается от тока проводимости? В каких единицах он измеряется?
7. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора намагниченности.
8. Что такое вектор напряженности магнитного поля? Каков смысл введения этого вектора? В каких единицах он измеряется?
9. Сформулируйте и запишите теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.
10. Как вектор индукции магнитного поля связан с вектором напряженности магнитного поля для однородного изотропного магнетика? Как они направлены по отношению друг к другу?
11. Как вектор намагниченности связан с вектором напряженности магнитного поля в однородном изотропном магнетике? Как они направлены по отношению друг к другу?
12. Что такое магнитная восприимчивость вещества? В каких единицах она измеряется?
13. Что такое магнитная проницаемость вещества? В каких единицах она измеряется?
14. Какие существуют разновидности магнетиков?
15. В чем заключается механизм намагничивания диамагнетиков?

16. Что такое прецессия электронной орбиты? Когда она возникает?
17. Как направлен индуцированный магнитный момент, возникающий за счет прецессии электронных орбит?
18. Почему собственное магнитное поле диамагнетика направлено противоположно внешнему магнитному полю?
19. В чем заключается механизм намагничивания парамагнетиков?
20. Почему собственное магнитное поле парамагнетика направлено по внешнему магнитному полю?
21. В чем заключается механизм намагничивания ферромагнетиков?
22. Всегда ли собственное магнитное поле ферромагнетика направлено по внешнему магнитному полю?
23. Как магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля?
24. Что такое спонтанная намагниченность?
25. Каким магнетикам свойственно явление гистерезиса?
26. В чем заключается явление гистерезиса?
27. Чем объясняется явление гистерезиса?
28. Для каких магнетиков свойственно явление остаточного намагничивания?
29. Чем объясняется явление остаточного намагничивания?
30. Что такое остаточная намагниченность?
31. Что такое коэрцитивная сила? В каких единицах она измеряется?
32. Что такое домен?
33. Как ведут себя домены ферромагнетика при уменьшении и увеличении магнитного поля?
34. Что такое температура Кюри для ферромагнетика?
35. Как выглядит основная кривая намагничивания ферромагнетика на диаграмме намагниченность—напряженность магнитного поля?
36. Как выглядит основная кривая намагничивания ферромагнетика на диаграмме магнитная индукция—напряженность магнитного поля?
37. Как выглядит зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля для основной кривой намагничивания?
38. Что такое магнитомягкие ферромагнетики? Для чего их используют?
39. Что такое магнито жесткие ферромагнетики? Для чего их используют?

40. Что такое петля гистерезиса?
41. Что такое перемагничивание ферромагнетика?
42. Как связана энергия, затрачиваемая на перемагничивание ферромагнетика, с петлей гистерезиса?
43. Почему на перемагничивание ферромагнетика затрачивается энергия?
44. Как связаны нормальные составляющие вектора магнитной индукции на границе раздела двух магнетиков?
45. Как связаны тангенциальные составляющие вектора магнитной индукции на границе раздела двух магнетиков?
46. Как связаны нормальные составляющие вектора напряженности магнитного поля на границе раздела двух магнетиков?
47. Как связаны тангенциальные составляющие вектора напряженности магнитного поля на границе раздела двух магнетиков?
48. Что такое поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)? В каких единицах он измеряется?
49. Чему равен поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность? Ответ поясните.
50. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле?

• *Законы электромагнетизма*

1. Виток радиусом 5 см помещен в однородное магнитное поле напряженностью 5000 А/м так, что нормаль к витку составляет угол  $60^\circ$  с направлением поля. Сила тока в витке 1 А. Какая работа совершается при повороте витка в устойчивое положение?

2. Пройдя ускоряющую разность потенциалов 3,52 кВ, электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Индукция поля 0,01 Тл, радиус траектории 2 см. Определить удельный заряд электрона.

3. Виток радиусом 2 см, сила тока в котором 10 А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 1,5 Тл. Линии индукции перпендикулярны плоскости витка. Определить работу, совершаемую внешними силами при повороте витка на угол  $90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром витка. Считать, что при повороте витка сила тока в нем поддерживается неизменной.

4. Квадратная рамка со стороной 4 см содержит 100 витков и помещена в однородное магнитное поле напряженностью 100 А/м. Направление поля составляет с нормалью к рамке угол  $30^\circ$ . Какая работа совершается при повороте рамки на  $30^\circ$  в одну и в другую сторону, если сила тока в ней 1 А?

5. Под действием однородного магнитного поля перпендикулярно линиям индукции начинает перемещаться прямой проводник массой 2 кг, сила тока в котором 10 А. Какой магнитный поток пересечет этот проводник к моменту времени, когда его скорость станет равна 31,6 м/с?

6. Проводник, сила тока в котором 1 А, длиной 0,3 м равномерно вращается вокруг оси, проходящей через его конец, в плоскости, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля напряженностью 1 кА/м. За 1 мин вращения совершается работа 0,1 Дж. Определить угловую скорость вращения проводника.

7. Протон движется в магнитном поле напряженностью  $10^5$  А/м по окружности радиусом 2 см. Найти кинетическую энергию протона.

8. Момент импульса протона в однородном магнитном поле напряженностью 20 кА/м равен  $6,6 \cdot 10^{-23}$  кг·м<sup>2</sup>/с. Найти кинетическую энергию протона, если он движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля.

9. Электрон с энергией 300 эВ движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля напряженностью 465 А/м. Определить силу Лоренца, скорость и радиус траектории электрона.

### **ЗАНЯТИЕ 3**

#### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Магнетизм»***

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Какова природа электромагнитной индукции?
3. Почему при движении проводника в магнитном поле в нем возникает индукционная ЭДС?

4. Почему в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле, возникает индукционная ЭДС?
5. Что такое индукционный ток?
6. Сформулируйте правило Ленца для определения направления индукционного тока. Объясните, как им пользоваться.
7. Что такое ЭДС индукции?
8. Сформулируйте и запишите закон Фарадея для ЭДС электромагнитной индукции.
9. Что такое полный магнитный поток или потокосцепление?
10. В каком случае поток вектора магнитной индукции называется собственным?
11. В чем заключается явление самоиндукции?
12. Запишите закон Фарадея для ЭДС самоиндукции, считая индуктивность постоянной величиной.
13. Что такое индуктивность проводника? От чего она зависит? В каких единицах она измеряется?
14. Как ЭДС самоиндукции связана с электрическим током в проводнике?
15. В чем заключается явление взаимной индукции?
16. Что такое взаимная индуктивность? В каких единицах она измеряется?
17. Сформулируйте теорему взаимности для индуктивности.
18. Сформулируйте и запишите закон Фарадея для ЭДС взаимной индукции.
19. Как рассчитывается энергия магнитного поля проводника с током?
20. Как определяется плотность энергии магнитного поля?
21. Как рассчитать энергию магнитного поля для определенной пространственной области ограниченного объема?
22. Из чего складывается энергия магнитного поля двух контуров с током?
23. Что такое взаимная магнитная энергия двух проводников с током?
24. Как взаимная магнитная энергия связана с токами в проводниках?
25. Как взаимная магнитная энергия связана с магнитными полями проводников?
26. Что такое ток смещения? Чем он отличается от тока проводимости? В каких единицах он измеряется?
27. Как рассчитывается плотность тока смещения?

28. Запишите систему уравнений Максвелла в интегральной форме. Поясните смысл уравнений.

29. Запишите систему уравнений Максвелла в интегральной форме для стационарных полей. Поясните смысл уравнений.

- *Электромагнитная индукция*
  - *Самоиндукция*
- *Энергия магнитного поля*

1. Сила тока в соленоиде равномерно возрастает от 0 до 10 А за 1 мин, при этом соленоид накапливает энергию 20 Дж. Какая ЭДС индуцируется в соленоиде?

2. Однослойный соленоид без сердечника длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную намотку медным проводом диаметром 0,1 мм. За 0,1 с сила тока в нем равномерно убывает с 5 А до 0. Определить ЭДС самоиндукции в соленоиде.

3. Обмотка соленоида имеет сопротивление 10 Ом. Какова его индуктивность, если при прохождении постоянного тока, созданного источником, за 0,05 с в нем выделяется количество теплоты, эквивалентное энергии магнитного поля соленоида?

4. В плоскости, перпендикулярной магнитному полю напряженностью  $2 \cdot 10^5$  А/м, вращается стержень длиной 0,4 м относительно оси, проходящей через его сердцевину. В стержне индуцируется ЭДС 0,2 В. Определить угловую скорость стержня.

5. Соленоид без сердечника длиной 15 см и диаметром 4 см имеет 100 витков на 1 см длины и включен в цепь источника тока. За 1 мс сила тока в нем изменилась на 10 мА. Определить ЭДС самоиндукции, считая, что ток в цепи изменяется равномерно.

6. На концах крыльев самолета с размахом 20 м, летящего со скоростью 900 км/ч, возникает ЭДС индукции 0,06 В. Определить вертикальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

7. По обмотке соленоида с параметрами: число витков 1000, длина 0,5 м, диаметр 4 см течет ток 0,5 А. Определить потокоцепление, энергию, объемную плотность энергии соленоида.

8. Однородное магнитное поле, объемная плотность энергии которого  $0,4 \text{ Дж/м}^3$ , действует на проводник с током, расположенный перпендикулярно линиям индукции с силой  $0,1 \text{ мН}$  на  $1 \text{ см}$  его длины. Определить силу тока в проводнике.

9. Соленоид без сердечника имеет плотную однослойную намотку проводом диаметром  $0,2 \text{ мм}$ , и по нему течет ток  $0,1 \text{ А}$ . Длина соленоида  $20 \text{ см}$ , диаметр  $5 \text{ см}$ . Найти энергию магнитного поля соленоида.

## **ЗАНЯТИЕ 4**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Колебания и волны»***

#### ***Гармонические колебания***

1. Какие процессы называют колебательными?
2. Какие колебания называют периодическими?
3. Что такое гармонические колебания?
4. Какое значение имеют гармонические колебания для анализа колебательных процессов?
5. По какому закону происходят гармонические колебания?
6. Напишите уравнение гармонического колебания и назовите входящие в него величины.
7. Что такое амплитуда гармонического колебания?
8. Что такое фаза гармонического колебания? Напишите выражение, описывающее фазу.
9. Что такое начальная фаза гармонического колебания?
10. Что такое циклическая частота гармонического колебания? Каков физический смысл циклической частоты?
11. В каких единицах измеряется циклическая частота?
12. Что такое частота гармонического колебания?
13. В каких единицах измеряется частота?
14. Что такое период гармонического колебания?
15. В каких единицах измеряется период?
16. Как связаны между собой частота и период гармонического колебания?
17. Как связаны между собой циклическая частота и частота гармонического колебания?

18. Как связаны между собой период и циклическая частота гармонического колебания?

19. В каких формах можно представлять гармонические колебания? Перечислите их.

20. Как изменится график гармонического колебания, если увеличить амплитуду гармонического колебания?

21. Как изменится график гармонического колебания, если увеличить частоту гармонического колебания?

22. Как изменится график гармонического колебания, если уменьшить частоту гармонического колебания?

23. Как изменится график гармонического колебания, если увеличить период гармонического колебания?

24. Как изменится график гармонического колебания, если уменьшить период гармонического колебания?

25. Как изменится график гармонического колебания, если увеличить циклическую частоту гармонического колебания?

26. Как изменится график гармонического колебания, если уменьшить циклическую частоту гармонического колебания?

27. Как изменится график гармонического колебания, если увеличить начальную фазу гармонического колебания?

28. Как изменится график гармонического колебания, если уменьшить начальную фазу гармонического колебания?

29. Как представить гармоническое колебание в векторной форме?

а) Чему равен модуль вектора  $\mathbf{A}$ , используемого для представления гармонического колебания в векторной форме?

б) В каких единицах измеряется модуль вектора  $\mathbf{A}$ ?

в) Под каким углом к оси отсчета (оси  $x$ ) в начальный момент времени изображают вектор  $\mathbf{A}$ , представляющий гармоническое колебание?

г) В какую сторону принято вращать вектор  $\mathbf{A}$ , представляющий гармоническое колебание?

д) Чему равна угловая скорость вращения вектора  $\mathbf{A}$ , представляющего гармоническое колебание?

е) По какому закону изменяется проекция вектора  $\mathbf{A}$ ?

30. В каком случае возникает необходимость сложения нескольких колебаний?

31. Как найти результат сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний, пользуясь представлением колебаний в векторной форме?

32. Что является результатом сложения одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми частотами?

33. Как с помощью векторного представления найти амплитуду колебания, являющегося результатом сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми частотами? Напишите выражение для ее расчета.

34. Как с помощью векторного представления найти начальную фазу колебания, являющегося результатом сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми частотами? Напишите выражение для ее расчета.

35. Что является результатом сложения одинаково направленных гармонических колебаний с разными частотами?

36. Что является результатом сложения одинаково направленных гармонических колебаний с близкими частотами?

37. Напишите уравнение биений.

38. Чему равен период биения? Что изменяется с таким периодом?

39. Что такое взаимно перпендикулярные колебания?

40. В каком случае возникает необходимость сложения взаимно перпендикулярных колебаний?

41. Что является результатом сложения взаимно перпендикулярных колебаний?

42. Что такое фигура Лиссажу? Как ее можно получить (объясните на примере материальной точки, участвующей в двух взаимно перпендикулярных колебаниях)?

43. Какую форму может принимать фигура Лиссажу при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми частотами?

44. Какую форму может принимать фигура Лиссажу при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными частотами?

45. Как с помощью фигуры Лиссажу найти соотношение частот складываемых колебаний?

46. Что такое осциллятор (колебательная система)?

47. Что такое идеальный осциллятор?

48. Что такое гармонический осциллятор?

49. Напишите дифференциальное уравнение гармонического осциллятора.

50. Каков физический смысл величин, входящих в дифференциальное уравнение гармонического осциллятора?

51. Напишите результат решения дифференциального уравнения гармонического осциллятора. Какой процесс описывается этим решением?

52. От чего зависят значения величин, входящих в решение дифференциального уравнения?

53. Напишите выражение для расчета циклической частоты собственных колебаний идеального пружинного маятника. От чего она зависит?

54. По какому закону изменяется координата груза пружинного маятника, совершающего гармонические колебания?

55. По какому закону изменяется скорость груза пружинного маятника, совершающего гармонические колебания?

56. По какому закону изменяется ускорение груза пружинного маятника, совершающего гармонические колебания?

57. Как соотносятся по фазе собственные колебания координаты, скорости и ускорения идеального пружинного маятника?

58. Напишите выражение для расчета циклической частоты колебаний математического маятника. От чего она зависит?

59. Напишите выражение для расчета циклической частоты колебаний физического маятника. От чего она зависит?

60. Напишите выражение для расчета циклической частоты колебаний в идеальном колебательном контуре. От чего она зависит?

61. Напишите выражение для расчета зависимости кинетической энергии пружинного маятника от времени.

62. Напишите выражение для расчета зависимости потенциальной энергии пружинного маятника от времени.

63. Напишите выражение для расчета полной энергии гармонического осциллятора. Как она зависит от времени?

### ***Затухающие колебания***

64. Что такое затухающие колебания?

65. По какой причине амплитуда затухающих колебаний уменьшается с течением времени?

66. Чем реальный осциллятор отличается от идеального?

67. Как соотносятся частоты колебаний идеального и реального осцилляторов с одинаковыми упругими и инертными свойствами?

68. Напишите дифференциальное уравнение осциллятора с потерями энергии.

69. Какие уравнения являются результатом решения дифференциального уравнения осциллятора, совершающего затухающие колебания? Каким режимам они соответствуют?

70. Напишите выражение, описывающее решение дифференциального уравнения осциллятора для режима затухающих колебаний. Каков физический смысл величин, входящих в это решение?

71. Чему равна циклическая частота затухающих колебаний осциллятора? Каков физический смысл величин, входящих в выражение для расчета циклической частоты?

72. По какому закону уменьшается амплитуда колебаний осциллятора, совершающего затухающие колебания? Каков физический смысл величин, входящих в уравнение, описывающее этот закон?

73. Что такое коэффициент затухания? Каков физический смысл коэффициента затухания?

74. Как изменяется циклическая частота затухающих колебаний осциллятора с увеличением коэффициента затухания?

75. Что обозначено символом  $\omega_0$  в выражении для расчета частоты затухающих колебаний пружинного маятника? Каков физический смысл этой величины?

76. Чему равна  $\omega_0$  пружинного маятника? Назовите величины, входящие в выражение для ее расчета.

77. Чему равен коэффициент затухания  $\beta$  пружинного маятника? Назовите величины, входящие в выражение для его расчета.

78. Что обозначено символом  $\omega_0$  в выражении для расчета частоты затухающих колебаний в колебательном контуре? Каков физический смысл этой величины?

79. Чему равна  $\omega_0$  колебательного контура? Назовите величины, входящие в выражение для ее расчета.

80. Чему равен коэффициент затухания  $\beta$  колебательного контура? Назовите величины, входящие в выражение для его расчета.

81. Что такое время релаксации?

82. Во сколько раз уменьшается амплитуда затухающих колебаний за время релаксации?

83. Как связаны между собой время релаксации и коэффициент затухания?

84. Напишите определение логарифмического декремента затухания. Что такое  $A(t)$ ? Что такое  $A(t + T)$ ?

85. Каков физический смысл логарифмического декремента затухания?

86. Чем взаимно дополняют друг друга коэффициент затухания и логарифмический декремент затухания?

87. Напишите определение добротности осциллятора, совершающего затухающие колебания.

88. Являются ли затухающие колебания гармоническими?

89. Что принято называть периодом затухающих колебаний? Чему он равен?

90. Что такое критический режим осциллятора? Как соотносятся  $\omega_0$  и  $\beta$  в этом режиме?

91. Как ведет себя реальный осциллятор с критическим затуханием после вывода из равновесного состояния?

92. Напишите уравнение, описывающее осциллятор с критическим затуханием. Назовите величины, входящие в это уравнение.

93. Напишите определение добротности для осциллятора, совершающего затухающие колебания. Назовите входящие в него величины.

94. Как связаны между собой добротность и коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания? Напишите выражения, описывающие эту связь.

95. Напишите уравнение, описывающее зависимость полной энергии реального осциллятора от времени. Назовите величины, входящие в это уравнение.

96. Как соотносятся скорости уменьшения амплитуды затухающих колебаний и полной энергии реального осциллятора?

### ***Вынужденные колебания***

97. Что такое вынужденные колебания реального осциллятора?

98. Почему вынужденные колебания реального осциллятора не затухают с течением времени?

99. Какие особенности присущи колебаниям осциллятора, на который оказывается периодическое внешнее воздействие?

100. По какому закону изменяется с течением времени внешнее воздействие на осциллятор?

101. Почему в данном разделе курса физики рассматриваются колебания осциллятора, на который оказывается внешнее гармоническое воздействие?

102. Напишите дифференциальное уравнение, описывающее поведение осциллятора, на который оказывается внешнее гармоническое воздействие. Назовите физические величины, входящие в дифференциальное уравнение.

103. Из чего складывается общее решение неоднородного дифференциального уравнения второго порядка, описывающее вынужденные колебания осциллятора?

104. Напишите общее решение однородного дифференциального уравнения второго порядка. Какой процесс описывает это решение?

105. Напишите частное решение неоднородного дифференциального уравнения второго порядка. Какой процесс описывает это решение?

106. Что такое время установления вынужденных колебаний? При каком условии вынужденные колебания можно считать установившимися?

107. С какой частотой происходят вынужденные колебания?

108. Почему амплитуда внешнего воздействия при исследовании амплитудно-частотной характеристики вынужденных колебаний на всех частотах внешнего воздействия одинакова?

109. Зависит ли от частоты внешнего воздействия амплитуда вынужденных колебаний смещения? Если зависит, то каков характер этой зависимости при  $2\beta^2 < \omega_0^2$ , при  $2\beta^2 \geq \omega_0^2$ ?

110. Напишите выражение, описывающее зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия. Назовите физические величины, входящие в это выражение.

111. Как зависит от частоты внешнего воздействия разность фаз между колебаниями смещения осциллятора и колебаниями внешнего гармонического воздействия? Напишите выражение, описывающее эту зависимость.

112. Что такое резонанс смещения осциллятора?

113. Что такое резонанс скорости осциллятора?

114. На какой частоте наступает резонанс смещения осциллятора? Напишите выражение для ее расчета.

115. На какой частоте наступает резонанс скорости осциллятора? Напишите выражение для ее расчета.

116. Напишите выражение для расчета резонансной амплитуды смещения вынужденных колебаний.

117. Напишите выражение для расчета резонансной амплитуды скорости вынужденных колебаний.

118. Чему приблизительно равна резонансная амплитуда смещения вынужденных колебаний при слабом ( $\beta \ll \omega_0$ ) затухании? Напишите выражение для ее расчета.

119. Чему приблизительно равна амплитуда вынужденных колебаний смещения в области низких частот ( $\omega \ll \omega_0$ ) при слабом ( $\beta \ll \omega_0$ ) затухании? Напишите выражение для ее расчета.

120. Чему приблизительно равна амплитуда вынужденных колебаний смещения в области высоких частот ( $\omega \gg \omega_0$ ) при слабом ( $\beta \ll \omega_0$ ) затухании? Напишите выражение для ее расчета.

121. Напишите определение добротности для осциллятора, совершающего вынужденные гармонические колебания. Назовите входящие в него величины.

122. Как рассчитать добротность осциллятора по амплитудно-частотной характеристике?

123. Чему равна разность фаз между колебаниями смещения осциллятора и колебаниями внешнего гармонического воздействия при резонансе?

• *Механические колебания и волны*

1. Материальная точка массой 20 г совершает гармонические колебания с периодом 9 с. Начальная фаза колебания  $10^\circ$ . Через какое время от начала движения смещение точки достигнет половины амплитуды? Найти амплитуду, максимальные скорость и ускорение точки, если полная ее энергия равна  $10^{-2}$  Дж.

2. Материальная точка массой 1 г колеблется гармонически. Амплитуда колебания равна 5 см, циклическая частота  $2 \text{ с}^{-1}$ , начальная фаза равна 0. Определить силу, действующую на точку в тот момент, когда ее скорость равна 6 см/с.

3. Найти закон изменения периода колебания математического маятника над поверхностью земли в зависимости от высоты над поверхностью земли.

4. Однородный диск радиусом 49 см совершает малые колебания относительно оси, которой является гвоздь, вбитый перпендикулярно стене. Колебания совершаются в плоскости, параллельной стене.

Найти частоту колебаний диска, если гвоздь находится на расстоянии  $2R/3$  от центра диска.

5. Материальная точка массой 10 г совершает гармонические колебания, уравнения которых имеют вид  $x = 0,2 \sin 8\pi t$  (м). Найти возвращающую силу в момент времени 0,1 с и полную энергию точки.

6. Материальная точка массой 10 г совершает гармонические колебания с периодом 2 с. Полная энергия колеблющейся точки  $10^{-4}$  Дж. Найти амплитуду колебаний, написать уравнение колебаний, наибольшее значение силы, действующей на точку.

7. В упругой среде распространяется волна со скоростью 20 м/с. Частота колебаний  $2 \text{ с}^{-1}$ , амплитуда 2 см. Определить фазу колебаний, смещение, скорость, ускорение точки, отстоящей на расстоянии 60 м от источника в момент времени 4 с, и длину волны. Считать начальную фазу колебаний источника равной нулю.

8. Волна распространяется по прямой со скоростью 20 м/с. Две точки, находящиеся на этой прямой на расстоянии 12 и 15 м от источника колебаний, колеблются по закону синуса с амплитудами, равными 0,1 м, и с разностью фаз  $135^\circ$ . Найти длину волны, написать уравнение этой волны и найти смещение указанных точек в момент времени 1,2 с. Считать начальную фазу колебаний источника равной нулю.

9. Колеблющиеся точки, находящиеся на одном луче, удалены от источника колебания на 6 и 8,7 м и колеблются с разностью фаз  $\frac{3\pi}{4}$ . Период колебания источника  $10^{-2}$  с. Чему равны длина волны и скорость распространения колебаний в данной среде? Составить уравнение колебания для первой и второй точки волны, считая амплитуды колебаний точек равными 0,5 м.

## **ЗАНЯТИЕ 5**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Колебания и волны»***

#### ***Волны***

1. Что такое волна? Приведите примеры.
2. В чем состоит разница между волнами и колебаниями?
3. Каковы условия возникновения волн?
4. Напишите волновое уравнение и объясните его смысл.
5. Какие волны называются поперечными?
6. Какие волны называются продольными?
7. Что такое волновой фронт?
8. Какие волны называются плоскими?
9. Какие волны называются сферическими?
10. Что такое акустическая волна?
11. Что такое электромагнитная волна?
12. Какие волны называются гармоническими?
13. Какую роль играют гармонические волны при анализе волновых процессов?
14. Что такое плоская гармоническая волна?
15. Запишите уравнение плоской бегущей гармонической волны?  
Дайте определение величинам, входящим в уравнение.
16. В каком направлении распространяется волна, если уравнение волны имеет вид  $\psi = \psi_0 \cos(\omega t - kx)$  ?
17. В каком направлении распространяется волна, если уравнение волны имеет вид  $\psi = \psi_0 \cos(\omega t + kx)$  ?
18. Что такое амплитуда плоской бегущей гармонической волны?
19. В каких единицах измеряется амплитуда плоской бегущей гармонической волны?
20. Чем определяется значение амплитуды плоской бегущей гармонической волны?
21. Какова структура плоской бегущей гармонической электромагнитной волны?
22. Какие две составляющие поля характеризуют бегущую электромагнитную волну?
23. Запишите уравнения для электрической и магнитной составляющих плоской бегущей гармонической электромагнитной волны.

24. Как связаны между собой пространственные и временные изменения электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны?

25. Как соотносятся по фазе колебания электрической и магнитной составляющих плоской бегущей гармонической электромагнитной волны?

26. Как амплитуда сферической гармонической волны, распространяющейся в однородной среде без потерь энергии, зависит от расстояния до источника?

27. Что такое фаза плоской бегущей гармонической волны? От чего она зависит?

28. Что такое волновая поверхность?

29. Какой смысл имеет циклическая частота плоской бегущей гармонической волны?

30. В каких единицах измеряется циклическая частота?

31. Чем определяется значение циклической частоты бегущей гармонической волны?

32. Что такое волновой вектор? Куда он направлен? Что такое волновое число?

33. В каких единицах измеряется волновое число?

34. Чем определяется значение волнового числа гармонической волны?

35. Что такое фазовая скорость волны? Что именно движется с такой скоростью?

36. В каких единицах измеряется фазовая скорость?

37. Чем определяется значение фазовой скорости волны?

38. Чему равна и чем определяется фазовая скорость электромагнитных волн в вакууме?

39. Чему равна фазовая скорость электромагнитных волн в однородной изотропной диэлектрической среде?

40. Чему равна фазовая скорость поперечных волн, бегущих по тонкой непрерывной и однородной струне?

41. Что такое длина волны?

42. В каких единицах измеряется длина волны?

43. Чем определяется значение длины волны?

44. Как связаны между собой частота, длина волны и фазовая скорость?

45. Как связаны между собой волновое число и длина волны?

46. Что такое волновой пакет?

47. Что такое спектр волнового пакета?
48. В каком случае волновой пакет не меняет свою форму в процессе распространения в пространстве?
49. В каком случае волновой пакет изменяет свою форму в процессе распространения в пространстве?
50. Что такое групповая скорость волн?
51. Как, зная связь циклической частоты и волнового числа, определить групповую скорость волн?
52. Как связаны между собой групповая и фазовая скорости волн?
53. В каком случае групповая скорость равна фазовой скорости волны?
54. Что такое дисперсия волн?
55. Что такое дисперсионное уравнение?
56. Какая дисперсия называется нормальной?
57. Какая дисперсия называется аномальной?
58. Откуда следует, что акустические волны переносят энергию?
59. Что такое вектор Умова?
60. Каков физический смысл модуля вектора Умова?
61. Каков физический смысл направления вектора Умова?
62. В каких единицах измеряется модуль вектора Умова?
63. Как вектор Умова связан с объемной плотностью энергии волны?
64. Как можно рассчитать поток энергии через произвольную поверхность для бегущей волны?
65. Откуда следует, что электромагнитные волны переносят энергию?
66. Как объемная плотность энергии электромагнитной волны связана с энергией двух составляющих поля?
67. Запишите выражения для объемной плотности энергии электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны.
68. Как соотносятся значения объемной плотности энергии электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны?
69. Запишите выражение для объемной плотности энергии электромагнитной волны.
70. Что такое вектор Пойнтинга?
71. Каков физический смысл модуля вектора Пойнтинга?
72. Каков физический смысл направления вектора Пойнтинга?
73. В каких единицах измеряется модуль вектора Пойнтинга?
74. Как вектор Пойнтинга связан с объемной плотностью электромагнитной энергии?

75. Как можно рассчитать поток электромагнитной энергии через произвольную поверхность?

76. Как вектор Пойнтинга связан с электрической и магнитной составляющими плоской бегущей гармонической электромагнитной волны?

77. Почему происходит отражение волн на границе раздела сред?

78. В каком случае не возникает явление отражения волны на границе раздела сред?

79. Как соотносятся фазы падающей и прошедшей гармонических волн на границе раздела двух сред?

80. Как соотносятся фазы падающей и отраженной гармонических волн на границе раздела двух сред?

81. В каком случае отраженная волна на границе раздела двух сред оказывается противофазной к падающей волне?

82. В каком случае отраженная волна на границе раздела двух сред оказывается в фазе с падающей волной?

83. Что такое интерференция волн? Когда наблюдается интерференция?

84. Что такое стоячая волна? При каких условиях она возникает?

85. Напишите уравнение стоячей волны? Чем это уравнение отличается от уравнения бегущей волны?

86. Что такое амплитуда стоячей волны?

87. Почему для стоячих волн амплитуда колебаний точек струны зависит от их положения на струне?

88. Напишите и проанализируйте уравнение для амплитуды стоячей волны.

89. Что такое узлы стоячей волны? На каких расстояниях друг от друга они находятся?

90. Как объясняется существование узлов стоячей волны с точки зрения фазовых соотношений?

91. Как соотносятся фаза прямой и обратной бегущих волн в узлах стоячей волны?

92. Почему расстояние между соседними узлами стоячей волны составляет ровно половину длины волны?

93. Что такое пучности стоячей волны? На каких расстояниях друг от друга они находятся?

94. Как объясняется существование пучностей стоячей волны с точки зрения фазовых соотношений?

95. Как соотносятся фаза прямой и обратной бегущих волн в пучностях стоячей волны?

96. Почему расстояние между соседними пучностями стоячей волны составляет ровно половину длины волны?

97. Почему в случае бегущей плоской гармонической волны амплитуда колебаний не зависит от координат точек среды, а в случае стоячей волны – зависит?

98. Почему через узлы стоячей волны нет переноса энергии?

99. Сформулируйте и объясните условия возникновения стоячих волн на струне.

100. Как определить возможные значения длин волн, соответствующих звучанию струны?

101. Почему при увеличении силы натяжения струны частота ее звучания растет, а при увеличении линейной плотности струны она уменьшается?

102. Запишите уравнения для электрической и магнитной составляющих стоячей электромагнитной волны, существующей в пространстве между двумя параллельными металлическими пластинами.

103. Как соотносятся колебания электрической и магнитной составляющих стоячей электромагнитной волны?

104. Как по отношению друг к другу расположены в пространстве пучности электрической и магнитной составляющих стоячей электромагнитной волны?

105. Как по отношению друг к другу расположены в пространстве узлы электрической и магнитной составляющих стоячей электромагнитной волны?

### • Электромагнитные колебания и волны

1. Напряжение на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется по закону  $U = 10 \cos 10^4 t$  (В). Емкость конденсатора 10 мкФ. Найти индуктивность контура и закон изменения силы тока в нем.

2. Сила тока в колебательном контуре изменяется по закону  $I = 0,1 \sin 10^3 t$  (А). Индуктивность контура 0,1 Гн. Найти закон изменения напряжения на конденсаторе и его емкость.

3. В колебательном контуре максимальная сила тока 0,2 А, максимальное напряжение на обкладках конденсатора 40 В. Найти энергию колебательного контура, если период колебаний 15,7 мкс.

4. Максимальная сила тока в колебательном контуре 0,1 А, максимальное напряжение на обкладках конденсатора 200 В. Найти циклическую частоту колебаний, если энергия контура 0,2 Дж.

5. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 37,5 нФ и катушки с индуктивностью 0,68 Гн. Максимальное значение заряда на обкладках конденсатора равно 2,5 мкКл. Написать уравнение изменения напряжения и заряда на обкладках конденсатора и тока в цепи и найти значения этих величин в момент времени  $T/2$ .

6. Изменение разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре происходит в соответствии с уравнением  $U = 50 \cos 10^4 \pi t$ . Емкость конденсатора равна 0,1 мкФ. Найти период колебаний, индуктивность контура, закон изменения силы тока со временем и длину волны, на которую настроен контур.

7. Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с магнитной проницаемостью, равной единице, имеет вид  $E = 10 \sin(6,28 \cdot 10^8 t - 4,19x)$ . Определить диэлектрическую проницаемость среды и длину волны.

8. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, амплитуда напряженности электрического поля которой 100 В/м. Какую энергию переносит эта волна через площадку 50 см<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, за 1 мин? Период волны  $T \ll t$ .

9. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны 0,1 А/м. Определить энергию, переносимую этой волной через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, за время 1 с. Период волны  $T \ll t$ .

## **ЗАНЯТИЕ 6**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Волновая оптика»***

#### ***Интерференция световых волн***

1. Что изучает волновая оптика?
2. Что представляет собой свет с точки зрения волновой теории?
3. Что такое световой вектор?
4. Чем характеризуется световая волна?
5. Что такое интенсивность световой волны?
6. Как определить амплитуду  $A$  результирующего колебания, полученного при суперпозиции двух волн в некоторой точке пространства? Считать частоты волн одинаковыми, а возбужденные ими колебания одинаково направленными.
7. Чему равна интенсивность  $I$  результирующего колебания, если разность фаз колебаний, возбужденных волнами в некоторой точке пространства, хаотично изменяется со временем? Когерентны ли такие волны (колебания)?
8. Чему равна интенсивность  $I$  результирующего колебания, если разность фаз колебаний, возбужденных волнами в некоторой точке пространства, остается постоянной со временем? Можно ли считать такие волны (колебания) когерентными?
9. Что такое интерференция волн?
10. Запишите условие минимума при интерференции двух световых волн.
11. Запишите условие максимума при интерференции двух световых волн.
12. Что такое геометрическая длина пути  $r$ ?
13. Что такое оптическая длина пути  $L$ ?
14. Что такое оптическая разность хода  $\Delta$ ?
15. Как связана разность фаз колебаний  $\delta$ , возбужденных двумя когерентными световыми волнами в некоторой точке пространства, с оптической разностью хода  $\Delta$  этих волн? (Источники волн считать синфазными.)
16. Запишите условия максимума и минимума при интерференции двух световых волн, распространяющихся от синфазных источников, через оптическую разность хода  $\Delta$  этих волн.

17. Запишите условия максимума и минимума при интерференции двух световых волн, распространяющихся от синфазных источников, через геометрическую разность хода  $\Delta r$  этих волн. В каких случаях следует пользоваться этими условиями максимума и минимума?

18. Почему невозможно получить устойчивую интерференционную картину при суперпозиции световых волн от двух источников естественного света даже при одинаковой частоте этих волн?

19. Какие условия необходимо создать, чтобы получить устойчивую интерференционную картину для естественного света?

20. Является ли реальная световая волна монохроматической?

21. Что такое время когерентности  $t_{\text{ког}}$ ?

22. Что такое длина когерентности  $l_{\text{ког}}$ ?

23. При какой максимальной разности хода устойчивая интерференционная картина еще наблюдается?

24. На каком наибольшем расстоянии  $d$  могут находиться две щели разделительного устройства, на которое падает монохроматический свет от источника конечного размера, чтобы можно было наблюдать интерференционную картину?

### ***Интерференция в тонких пластинах (пленках)***

25. За счет чего в пленках происходит разделение падающей световой волны на две, три и т. д. волны?

26. Почему условия максимума и минимума при интерференции в пленках записывают через оптическую, а не геометрическую разность хода?

27. Назовите три причины, благодаря которым может возникать оптическая разность хода между волнами, интерферирующими в пленке.

28. Запишите выражение для оптической разности хода двух интерферирующих на пленке волн, если наблюдение ведется в отраженном свете и пленка с обеих сторон окружена одинаковой средой.

29. Запишите выражение для оптической разности хода двух интерферирующих на пленке волн, если наблюдение ведется в проходящем свете и пленка с обеих сторон окружена одинаковой средой.

30. Почему при увеличении толщины пленки интерференция на ней исчезает?

31. При каких условиях наблюдается на пленке интерференционная картина, которую называют полосами равного наклона?

32. При каких условиях наблюдается на пленке интерференционная картина, которую называют полосами равной толщины?

33. Кольца Ньютона – это полосы равного наклона или полосы равной толщины?

34. Почему при наблюдении колец Ньютона центральное пятно в отраженном свете является темным, а в проходящем свете – светлым?

35. Как связан радиус  $r_k$  некоторого  $k$ -го кольца Ньютона с радиусом линзы  $R$  и длиной волны в вакууме  $\lambda_0$ ? Считать, что интерференция происходит на воздушной пленке ( $n \cong 1$ ) и наблюдается в отраженном свете.

36. Зачем на поверхности линз в качественных сложных объективах оптических приборов наносится тонкая пленка?

### ***Многолучевая интерференция***

37. Чем отличается интерференционная картина при многолучевой интерференции света от  $N$  источников и картина, полученная при интерференции от двух источников? Считать, что цепочка источников расположена вдоль прямой, и они находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, которое много больше длины волны испускаемого источниками света.

38. Как зависят от количества источников  $N$  амплитуда и интенсивность результирующих колебаний, возбужденных в месте расположения главных максимумов при многолучевой интерференции?

39. Сколько дополнительных минимумов и максимумов расположено между соседними главными максимумами при многолучевой интерференции от  $N$  источников?

### ***Дифракция***

40. Что такое дифракция волн?

41. Какой принцип позволяет качественно объяснить явление огибания волнами препятствий и определить положение фронта волны в разные моменты времени? Сформулируйте этот принцип.

42. Какой принцип позволяет количественно оценить распределение интенсивности колебаний при их распространении в среде с резкими неоднородностями? Сформулируйте этот принцип.

### ***Метод зон Френеля***

43. Что такое дифракция Френеля?
44. Какой метод позволяет определить интенсивность колебаний в точке  $P$ , лежащей за круглым отверстием на его оси при дифракции Френеля на этом отверстии?
45. На какой поверхности и как строятся зоны Френеля?
46. Запишите формулу для расчета внешнего радиуса  $m$ -й зоны Френеля. Назовите величины, входящие в эту формулу.
47. Какое число соседних зон Френеля следует открыть, чтобы в точке  $P$ , лежащей за круглым отверстием на его оси, при дифракции на этом отверстии выполнялось условие минимума?
48. Какое число соседних зон Френеля следует открыть, чтобы в точке  $P$ , лежащей за круглым отверстием на его оси, при дифракции на этом отверстии наблюдались колебания с минимально возможной амплитудой? Назовите номера этих зон.
49. Какое число соседних зон Френеля следует открыть, чтобы в точке  $P$ , лежащей за круглым отверстием на его оси, при дифракции на этом отверстии выполнялось условие максимума?
50. Какое число соседних зон Френеля следует открыть, чтобы в точке  $P$ , лежащей за круглым отверстием на его оси, при дифракции на этом отверстии наблюдались колебания с максимально возможной амплитудой? Назовите номера этих зон.
51. Во сколько раз отличаются интенсивности колебаний в точке наблюдения  $P$ , если открыта только первая зона Френеля ( $I_1$ ) и если открыты все зоны ( $I_0$ ) ?
52. Чему равна интенсивность света в центре геометрической тени, созданной непрозрачным диском, закрывающим несколько первых зон Френеля?
53. Что такое зонная пластинка Френеля? Каков принцип ее работы?

### ***Дифракция Фраунгофера на щели***

54. Что такое дифракция Фраунгофера?
55. С помощью какого критерия можно понять, какой вид дифракции – Френеля или Фраунгофера имеет место? Запишите формулу для расчета критерия и назовите входящие в нее величины.

56. Запишите условие минимума при дифракции Фраунгофера на щели. Назовите входящие в формулу величины.

57. Запишите условие максимума при дифракции Фраунгофера на щели. Назовите входящие в формулу величины.

58. Запишите выражение для расчета интенсивности колебаний при дифракции Фраунгофера на щели. Назовите входящие в формулу величины.

### *Дифракционная решетка*

59. Что такое одномерная дифракционная решетка?

60. Что такое период дифракционной решетки?

61. Запишите условие главных максимумов для дифракционной решетки. Назовите входящие в формулу величины.

62. Запишите условие главных минимумов для дифракционной решетки. Назовите входящие в формулу величины.

63. Запишите условие добавочных минимумов для дифракционной решетки. Назовите входящие в формулу величины.

64. Как изменится дифракционная картина для монохроматического света, если увеличить период решетки?

65. Как изменится дифракционная картина для монохроматического света, если увеличить ширину щелей решетки?

66. Как изменится дифракционная картина для монохроматического света, если увеличить количество щелей решетки?

67. Как изменится дифракционная картина, если на решетку направить белый свет вместо монохроматического?

68. Какое количество добавочных минимумов наблюдается между соседними главными максимумами при дифракции на решетке, имеющей  $N$  щелей?

69. Какое количество добавочных максимумов наблюдается между соседними главными максимумами при дифракции на решетке, имеющей  $N$  щелей?

70. Во сколько раз интенсивность главных максимумов  $I_{\max}$  для дифракционной решетки больше интенсивности  $I_{\phi}$ , создаваемой в направлении  $\phi$  одной щелью?

71. Чему равен наибольший порядок главного максимума  $m_{\text{наиб}}$  для дифракционной решетки с периодом  $d$  для света с длиной волны  $\lambda$ ?

72. Что такое угловая дисперсия  $D$  спектрального прибора?
73. Как связана угловая дисперсия  $D$  с порядком главного максимума  $m$  и длиной световой волны  $\lambda$  при небольших углах дифракции  $\varphi$ ?
74. Что такое линейная дисперсия  $D_{\text{лин}}$  спектрального прибора?
75. Что такое разрешающая сила  $R$  спектрального прибора?
76. Как связана разрешающая сила  $R$  дифракционной решетки с порядком главного максимума  $m$  и числом щелей  $N$ ?

### ***Поляризация света***

77. Какую световую волну называют поляризованной?
78. Какую световую волну называют неполяризованной (естественной)?
79. Назовите виды поляризации волн.
80. Что такое степень поляризации частично поляризованного света? Напишите выражение для ее расчета. Назовите входящие в него величины.
81. Какие физические явления позволяют превратить естественный свет в поляризованный?
82. Что такое идеальный поляризатор?
83. Во сколько раз уменьшается интенсивность естественного света  $I_{\text{ест}}$  после прохождения через идеальный поляризатор?
84. Запишите закон Малюса для идеального поляризатора. Назовите входящие в формулу величины.
85. Запишите закон Брюстера. Назовите входящие в формулу величины. Для каких веществ выполняется этот закон?
86. Чему равен угол между отраженным и преломленным лучами, если свет на границу диэлектриков падает под углом Брюстера?
87. Как поляризованы отраженная и преломленная волны, если на границу диэлектриков свет падает под углом Брюстера?
88. Что такое стопа Столетова? Для чего она применяется?
89. Что такое явление двойного лучепреломления?
90. Чем отличается характер распространения обыкновенного и необыкновенного лучей?
91. Что такое оптическая ось кристалла?
92. Как поляризованы обыкновенный и необыкновенный лучи?
93. Что такое дихроизм?

94. В чем разница между положительным и отрицательным двоякопреломляющим кристаллом?

95. Как превратить плоскополяризованный свет в свет, поляризованный по кругу?

96. Какие внешние воздействия на вещество можно использовать, чтобы в нем возникло двойное лучепреломление?

97. Что такое оптическая активность вещества?

98. Как можно возбудить оптическую активность в оптически неактивном веществе?

99. Как можно увеличить оптическую активность в оптически активном веществе?

• *Волновые свойства света*

1. Монохроматический свет длиной волны 0,5 мкм падает на мыльную пленку ( $n = 1,3$ ) толщиной 0,1 мкм, находящуюся в воздухе. Найти наименьший угол падения, при котором пленка в проходящем свете кажется темной.

2. Найти угловое расстояние между соседними светлыми полосами в опыте Юнга, если известно, что экран отстоит от когерентных источников света на 1 м, а пятая светлая полоса на экране расположена на расстоянии 1,5 мм от центра интерференционной картины.

3. Для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,25, меньшим, чем у стекла (просветление оптики). При какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной волны 0,72 мкм не будет наблюдаться, если угол падения лучей  $60^\circ$ ?

4. Постоянная дифракционной решетки 2,5 мкм. Определить наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов в дифракционной картине и угол дифракции в спектре второго порядка при нормальном падении монохроматического света с длиной волны 0,62 мкм.

5. Дифракционная решетка шириной 12 мм содержит 4800 штрихов. Определить число главных максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки для длины волны 0,55 мкм.

6. На узкую щель шириной 0,1 мм падает нормально плоская монохроматическая волна с длиной волны 0,585 мкм. Найти расстояние между первыми дифракционными минимумами на экране, удаленном от щели на 0,6 м.

7. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы свет, отраженный от поверхности воды, был максимально поляризован (показатель преломления равен 1,33)?

8. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор, уменьшилась в 2,3 раза. Во сколько раз она уменьшится, если за первым поставить второй такой же поляризатор так, чтобы угол между их главными плоскостями был равен  $60^\circ$ ?

9. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, плоскости поляризации которых повернуты по отношению друг к другу на угол  $45^\circ$ . Каждый николь поглощает 8 % света, падающего на него.

## **ЗАНЯТИЕ 7**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Тепловое излучение»***

#### ***Тепловое излучение***

1. Что такое тепловое излучение?
2. За счет чего испускается тепловое излучение?
3. В каком интервале длин волн испускается тепловое излучение?
4. Как температура тела влияет на тепловое излучение?
5. Что такое излучательная способность тела? Напишите определение этой характеристики. Назовите входящие в него величины.
6. Что такое поглощательная способность тела? Напишите определение этой характеристики. Назовите входящие в него величины.
7. Что такое энергетическая светимость тела? Напишите выражение, связывающее энергетическую светимость и излучательную способность тела.
8. Что такое абсолютно черное тело (ачт)?
9. Что такое серое тело?

10. Как соотносятся испускательные способности ачт и обычного (серого) тела?

11. Напишите закон Кирхгофа для теплового излучения. Назовите входящие в него величины.

12. Напишите закон Стефана–Больцмана. Назовите входящие в него величины.

13. Напишите закон смещения Вина. Назовите входящие в него величины.

14. Напишите формулу Рэлея–Джинса. Назовите входящие в нее величины. В чем заключается ее недостаток?

15. Что такое квант излучения? Чему равна его энергия?

16. Напишите формулу Планка. Назовите входящие в нее величины.

#### • Тепловое излучение

1. Мощность потока энергии, излучаемой из смотрового окошка мартеновской печи,  $P = 2,17$  кВт. Площадь смотрового окошка  $S = 6 \text{ м}^2$ . Определить температуру печи.

2. Найти площадь излучающей поверхности нити 25-ваттной лампы, если температура нити  $2450 \text{ К}$ . Излучение нити составляет 30 % излучения абсолютно черного тела при данной температуре. Потерями тепла, связанными с теплопроводностью, пренебречь.

3. Вследствие изменения температуры тела максимум его спектральной энергетической светимости переместился с  $\lambda_1 = 2,5 \text{ мкм}$  до  $\lambda_2 = 0,125 \text{ мкм}$ . Тело абсолютно черное. Во сколько раз изменилась: а) температура тела; б) интегральная энергетическая светимость?

4. Максимальная спектральная светимость абсолютно черного тела  $r_{\lambda, T_{\max}} = 4,16 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2$ . На какую длину волны она приходится?

5. Диаметр вольфрамовой проволоки в электрической лампочке равен  $0,33 \text{ мм}$ , длина проволоки  $5 \text{ см}$ . При включении лампочки в цепь напряжением  $127 \text{ В}$  через лампочку идет ток силой  $0,31 \text{ А}$ . Найти температуру лампочки. Считать, что по установлении равновесия все выделяющееся в нити тепло теряется в результате лучеиспускания.

Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела считать для этой температуры равным 0,31.

6. Железный шар радиусом 10 см, нагретый до температуры 1227 °С, остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 К? При расчете принять, что отношение энергетических светимостей железа и абсолютно черного тела 0,5. Считать, что потеря энергии происходит только за счет излучения. Воздух находится при нормальных условиях.

7. Абсолютно черное тело было нагрето от температуры 100 до 300 °С. Найти, во сколько раз при этом изменилась мощность суммарного излучения.

8. Температура абсолютно черного тела понизилась с 1000 до 850 К. Определить, как и на сколько при этом изменилась длина волны, отвечающая максимуму распределения энергии.

9. Во сколько раз увеличится мощность излучения черного тела, если максимум энергии излучения сместится от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

## **ЗАНЯТИЕ 8**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Тепловое излучение»***

#### ***Явление внешнего фотоэффекта***

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Изобразите схему вакуумного фотоэлемента, использованного А.Г. Столетовым для исследования фотоэффекта.
3. Почему окно для освещения катода фотоэлемента Столетова было изготовлено из кварца?
4. Каков знак заряда частиц, вырывающихся из вещества при внешнем фотоэффекте?
5. Какие частицы вырываются из вещества при внешнем фотоэффекте?

6. Как влияет интенсивность света на количество вырываемых из вещества электронов?
7. Как изменяется сила тока, текущего через вакуумный фотоэлемент Столетова, при увеличении разности потенциалов между катодом и анодом?
8. Как называется максимальное значение силы тока в вакуумном фотоэлементе Столетова?
9. Что такое ток насыщения вакуумного фотоэлемента?
10. От чего зависит значение тока насыщения?
11. Что такое работа выхода электрона из вещества?
12. От чего зависит работа выхода?
13. Как зависит максимальная кинетическая энергия электронов от интенсивности света, падающего на фотокатод?
14. Как зависит максимальная кинетическая энергия электронов от частоты света, падающего на фотокатод?
15. Что такое красная граница фотоэффекта?
16. Чем объясняется существование красной границы фотоэффекта?
17. При каких длинах волн свет вызывает явление внешнего фотоэффекта?
18. В каком виде (в виде электромагнитной волны или в виде порции энергии) поглощается энергия света, падающего на вещество?
19. Чему равна энергия порции света, поглощаемого при фотоэффекте?
20. Напишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Какие величины входят в это уравнение?
21. Почему не все вырванные из вещества электроны имеют максимальную кинетическую энергию?
22. Чем объясняется рост фототока с увеличением интенсивности света?
23. Как изменяется максимальная энергия фотоэлектронов с увеличением длины волны падающего света?
24. Чему равна длина волны падающего излучения, соответствующая красной границе фотоэффекта?
25. Что такое запирающее напряжение вакуумного фотоэлемента?
26. Как связаны между собой запирающее напряжение и максимальная кинетическая энергия электронов в вакуумном фотоэлементе?
27. Как изменится вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента при увеличении интенсивности падающего на катод света и при постоянной частоте падающего излучения?

28. Как изменится вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента при увеличении частоты падающего на катод света и при постоянной интенсивности падающего излучения?

29. Как изменится вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента при увеличении работы выхода электронов?

### ***Фотоны. Свойства фотонов***

30. Что такое фотон? Чему равна его энергия?

31. Напишите выражение для расчета импульса фотона. Назовите входящие в него величины.

32. Напишите выражение, связывающее импульс фотона с волновым вектором. Назовите входящие в него величины. Поясните, как соотносится направление распространения световой волны с направлением скорости фотона.

33. В чем заключается двойственность природы электромагнитного излучения?

34. В каких явлениях проявляет себя волновая природа света?

35. В каких явлениях проявляет себя корпускулярная природа света?

- *Фотоны*
- *Давление света*
- *Фотоэффект*
- *Эффект Комптона*

1. На зачерненную поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $0,65 \text{ мкм}$ , производя давление  $5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ . Определить концентрацию фотонов, падающих на площадь  $1 \text{ м}^2$  в  $1 \text{ с}$ .

2. Определить давление, оказываемое светом с длиной волны  $0,4 \text{ мкм}$  на черную поверхность, если ежесекундно на  $1 \text{ см}^2$  поверхности нормально падает  $6 \cdot 10^{16}$  фотонов.

3. Давление света с длиной волны  $0,55 \text{ мкм}$ , нормально падающего на зеркальную поверхность, равно  $9 \text{ мкПа}$ . Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

4. Красная граница фотоэффекта для никеля равна  $0,257 \text{ мкм}$ . Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если

фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной 1,5 В.

5. Какую часть энергии фотона составляет энергия, которая пошла на совершение работы выхода электронов из фотокатода, если красная граница для материала фотокатода равна 0,54 мкм, кинетическая энергия фотоэлектронов 0,5 эВ?

6. Облучение литиевого фотокатода производится фиолетовыми лучами, длина волны которых равна 0,4 мкм. Определить скорость фотоэлектронов, если длина волны красной границы фотоэффекта для лития равна 0,52 мкм.

7. Гамма-фотон с длиной волны 1,2 пм в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол  $60^\circ$ . Определить кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

8. Фотон с импульсом  $5,44 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с был рассеян на свободном электроне на угол  $30^\circ$  в результате эффекта Комптона. Определить импульс рассеянного фотона.

9. Первоначально покоившийся электрон приобрел кинетическую энергию 0,6 МэВ в результате комптоновского рассеяния на нем  $\gamma$ -фотона с энергией 0,51 МэВ. Чему равен угол рассеяния фотона?

## **ЗАНЯТИЕ 9**

### ***Вопросы для самоподготовки к семинарскому занятию по теме «Квантовая физика»***

#### ***Гипотеза де Бройля.***

#### ***Корпускулярно-волновой дуализм***

1. В чем заключается суть гипотезы де Бройля?
2. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?
3. Напишите выражение для расчета длины волны движущейся частицы. Назовите входящие в него величины.

4. Напишите выражение, связывающее полную энергию частицы с ее частотой. Назовите входящие в него величины.
5. В каких явлениях проявляются волновые свойства вещества?
6. Что такое волновая функция?
7. В чем, по современным представлениям, заключается физический (статистический) смысл волновой функции?
8. Напишите выражение для расчета вероятности нахождения частицы в элементарном объеме  $dV$ . Назовите входящие в него величины.
9. Напишите выражение для расчета фазовой скорости частицы. Назовите входящие в него величины.
10. Как соотносятся между собой скорость движения материальной частицы и ее фазовая скорость?
11. Напишите выражение для расчета групповой скорости частицы. Назовите входящие в него величины.
12. Как соотносятся между собой скорость движения материальной частицы и ее групповая скорость?

### ***Соотношение неопределенностей***

13. Напишите выражение соотношения неопределенностей для координаты и импульса материальной частицы. Назовите входящие в него величины.
14. В чем заключается физический смысл соотношения неопределенностей для координаты и импульса материальной частицы?
15. Можно ли абсолютно точно измерить координату или импульс частицы? Как это повлияет на неопределенность второй сопряженной величины?
16. Напишите выражение соотношения неопределенностей для энергии материальной частицы и времени. Назовите входящие в него величины.
17. В чем заключается физический смысл соотношения неопределенностей для энергии материальной частицы и времени?

### ***Атомы и молекулы***

18. Как определить состав атома, пользуясь периодической таблицей элементов?
19. Как выглядит стационарное уравнение Шрёдингера для электрона в атоме водорода?

20. Какие квантовые числа определяют состояние электрона в атоме водорода?
21. Какую физическую величину определяет главное квантовое число в атоме водорода?
22. Какие значения может принимать главное квантовое число?
23. Как выглядит выражение для полной энергии электрона в атоме водорода?
24. Почему полная энергия электрона в атоме водорода – величина отрицательная?
25. Что такое энергия ионизации атома водорода?
26. Чему равна энергия ионизации атома водорода?
27. Как энергию электрона, выраженную в электронвольтах, перевести в джоули?
28. Какую физическую величину определяет орбитальное квантовое число в атоме водорода?
29. Какие значения может принимать орбитальное квантовое число?
30. Каким максимальным значением и почему ограничена величина орбитального квантового числа в атоме водорода?
31. Как орбитальный механический момент электрона в атоме водорода связан с орбитальным квантовым числом?
32. Какую физическую величину определяет магнитное орбитальное квантовое число в атоме водорода?
33. Какие значения может принимать магнитное орбитальное квантовое число?
34. Каким максимальным значением и почему ограничена величина магнитного орбитального квантового числа в атоме водорода?
35. Как проекция орбитального механического момента электрона в атоме водорода связана с магнитным орбитальным квантовым числом?
36. Какую физическую величину определяет спиновое квантовое число электрона?
37. Как собственный механический момент электрона связан со спиновым квантовым числом?
38. Какую физическую величину определяет магнитное спиновое квантовое число электрона в атоме водорода?
39. Какие значения может принимать магнитное спиновое квантовое число электрона?

40. Как проекция собственного механического момента электрона связана со спиновым квантовым числом?
41. Что означают выражения «спин вверх» и «спин вниз»?
42. Какое состояние электрона в атоме водорода называется основным и почему?
43. Какие состояния электрона в атоме водорода называются возбужденными и почему?
44. Как в сферических координатах может быть представлена координатная волновая функция электрона в атоме водорода?
45. Какое значение принимает орбитальное квантовое число для  $s$  состояний электрона в атоме водорода?
46. Что характерно для волновых функций  $s$  состояний электрона в атоме водорода?
47. Какие характерные изменения происходят с волновыми функциями  $s$  состояний электрона в атоме водорода при увеличении значения главного квантового числа?
48. Какие характерные изменения происходят с волновыми функциями состояний электрона в атоме водорода при увеличении значения орбитального квантового числа?
49. Что такое энергетический уровень электрона в атоме?
50. Какие энергетические уровни называются вырожденными?
51. Что такое кратность вырождения энергетического уровня?
52. Как определяется кратность вырождения энергетических уровней электрона в атоме водорода (в электростатическом приближении)?
53. За счет каких процессов электрон может изменять свое состояние (переходить из одного состояния в другое) в атоме водорода?
54. Что такое излучательный переход электрона из одного состояния в другое?
55. Как записывается закон сохранения энергии для излучательного перехода электрона в атоме?
56. Какой закон сохранения кроме закона сохранения энергии выполняется для излучательного перехода электрона и определяет разрешенные переходы между состояниями?
57. Как записывается закон сохранения момента импульса для излучательного перехода электрона?
58. Почему в атоме водорода запрещены излучательные переходы электрона без изменения орбитального квантового числа?

59. Что такое спектральная серия для излучательных переходов электрона?
60. Как определяются частоты излучения для спектральных серий атома водорода?
61. Что такое постоянная Ридберга?
62. С чем связана тонкая структура спектров атома водорода?
63. Что такое водородоподобная система?
64. Как определяются частоты излучения для спектральных серий водородоподобных систем?
65. В чем заключается принцип запрета Паули?
66. Каким принципам подчиняется последовательность заполнения электронами энергетических состояний в многоэлектронных атомах?
67. Чем объясняется периодическое повторение значения валентности у разных химических элементов таблицы Менделеева?
68. Каков механизм образования ковалентной связи при образовании молекул?
69. Каков механизм образования ионной связи при образовании молекул?
70. Чем с энергетической точки зрения характеризуется появление связывающего состояния при образовании молекул?
71. Как выглядит закон квантования энергии колебательных состояний молекулы?
72. Как выглядит закон квантования энергии вращательных состояний молекулы?
73. Какие различают типы молекулярных спектров?
74. Как определяются частоты излучения для вращательных переходов молекулы?
75. Как выглядит правило отбора для излучательных вращательных переходов молекулы?
76. Чему равна разность частот для соседних линий вращательных переходов молекулы?
77. Как определяются частоты излучения для колебательно-вращательных переходов молекулы?
78. Как определяются частоты излучения для электронно-колебательных переходов молекулы?

- *Электронные оболочки атома*
  - *Теория Бора*
- *Элементы квантовой механики*

1. Определить первый боровский радиус орбиты в атоме водорода и скорость движения электрона по этой орбите.

2. Определить наибольшие и наименьшие длины волн фотонов, излучаемых при переходе электронов в сериях Лаймана, Бальмера и Пашена.

3. Определить кинетическую энергию протона и электрона, для которых длина волны де Бройля равна 0,06 нм.

4. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов  $U$ . Найти длину волны де Бройля для случаев:  $U = 51$  В;  $U = 51$  кВ.

5. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии равно 12 нс. Вычислить минимальную неопределенность длины волны  $\lambda = 12$  мкм излучения при переходе атома в основное состояние.

6. Атом испустил фотон с длиной волны 0,55 мкм. Продолжительность излучения 10 нс. Определить наименьшую погрешность, с которой может быть измерена длина волны излучения.

7. Электрон находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы  $l = 1$  нм. Определить наименьшую разность энергетических уровней электрона.

8. Определить, при какой ширине одномерной потенциальной ямы наименьшая дискретность энергии электрона становится сравнимой с энергией теплового движения молекул гелия при температуре 300 К.

9. Частица в потенциальной яме шириной  $l$  находится в возбужденном состоянии. Определить вероятность нахождения частицы в интервале  $0 < x < \frac{l}{4}$  на втором энергетическом уровне.

## РЕЙТИНГ-ЛИСТ

### ФБ (2 часть)

| Название модуля                   | Вид контроля                            | Сроки контроля | Максимальное число баллов       | Минимальное число баллов       | Экзамен                                                                      |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Электро-магнетизм                 | РГЗ «2–8»                               | 5–6-я неделя   | $8 \cdot 8 = 64$                | $8 \cdot 2 = 16$               | Первый вопрос – 10 баллов<br>Второй вопрос – 10 баллов<br>Задача – 20 баллов |
|                                   | Лабораторные работы «100–200»           | семестр        | $1 \cdot 200 = 200$             | $1 \cdot 100 = 100$            |                                                                              |
|                                   | Физический диктант на практиках «0–100» | семестр        | $3 \cdot 100 = 300$             | 0                              |                                                                              |
| Колебания и волны                 | Тест                                    | 9–10-я неделя  | 33                              | 0                              |                                                                              |
|                                   | Лабораторные работы «100–200»           | семестр        | $1 \cdot 200 = 200$             | $1 \cdot 100 = 100$            |                                                                              |
|                                   | Физический диктант на практиках «0–100» | семестр        | $2 \cdot 100 = 200$             | 0                              |                                                                              |
| Волновая оптика. Квантовая оптика | РГЗ «2–8»                               | 12–13-я неделя | $7 \cdot 8 = 56$                | $7 \cdot 2 = 14$               |                                                                              |
|                                   | Лабораторные работы «100–200»           | семестр        | $2 \cdot 200 = 400$             | $2 \cdot 100 = 200$            |                                                                              |
|                                   | Физический диктант на практиках «0–100» | семестр        | $4 \cdot 100 = 400$             | 0                              |                                                                              |
|                                   |                                         |                | $1853 \cdot 0,0324 = 60$ баллов | $430 \cdot 0,0324 = 14$ баллов | 40 баллов                                                                    |

**Расчетно-графическое задание:** 8 баллов – с защитой, 2 балла – без защиты.

Посещение: 100 % лекций с наличием конспекта плюс 5 баллов, 100 % практических занятий с решением всех задач плюс 5 баллов (баллы без коэффициента).

Опоздание на занятие (лекция, практика, лабораторная работа) минус 0,5 балла за одно занятие (баллы без коэффициента).

## ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ ЗАДАЧ К РГЗ «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»

| Вариант | Магнитное поле                                                    | Волновая оптика                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1       | 7.1.2; 7.1.3; 7.1.4; 7.1.5; 8.1.2; 8.1.3;<br>8.1.4; 8.1.5         | 12.1.2; 12.1.5; 13.1.2; 13.1.3;<br>13.1.4; 14.1.2; 14.1.4 |
| 2       | 7.2.2; 7.2.3; 7.2.4; 7.2.5; 8.2.2; 8.2.3;<br>8.2.4; 8.2.5         | 12.2.2; 12.2.5; 13.2.2; 13.2.3;<br>13.2.4; 14.2.2; 14.2.4 |
| 3       | 7.3.2; 7.3.3; 7.3.4; 7.3.5; 8.3.2; 8.3.3;<br>8.3.4; 8.3.5         | 12.3.2; 12.3.5; 13.3.2; 13.3.3;<br>13.3.4; 14.3.2; 14.3.4 |
| 4       | 7.4.2; 7.4.3; 7.4.4; 7.4.5; 8.4.2; 8.4.3;<br>8.4.4; 8.4.5         | 12.4.2; 12.4.5; 13.4.2; 13.4.3;<br>13.4.4; 14.4.2; 14.4.4 |
| 5       | 7.5.2; 7.5.3; 7.5.4; 7.5.5; 8.5.2; 8.5.3;<br>8.5.4; 8.5.5         | 12.5.2; 12.5.5; 13.5.2; 13.5.3;<br>13.5.4; 14.5.2; 14.5.4 |
| 6       | 7.6.2; 7.6.3; 7.6.4; 7.6.5; 8.6.2; 8.6.3;<br>8.6.4; 8.6.5         | 12.6.2; 12.6.5; 13.6.2; 13.6.3;<br>13.6.4; 14.6.2; 14.6.4 |
| 7       | 7.7.2; 7.7.3; 7.7.4; 7.7.5; 8.8.2; 8.8.3;<br>8.8.4; 8.8.5         | 12.7.2; 12.7.5; 13.7.2; 13.7.3;<br>13.7.4; 14.7.2; 14.7.4 |
| 8       | 7.18.2; 7.18.3; 7.18.4; 7.18.5; 8.18.2;<br>8.18.3; 8.18.4; 8.18.5 | 12.8.2; 12.8.5; 13.8.2; 13.8.3;<br>13.8.4; 14.8.2; 14.8.4 |
| 9       | 7.1.2; 7.1.3; 7.1.4; 7.1.5; 8.1.2; 8.1.3;<br>8.1.4; 8.1.5         | 12.9.2; 12.9.5; 13.9.2; 13.9.3;<br>13.9.4; 14.9.2; 14.9.4 |
| 10      | 7.2.2; 7.2.3; 7.2.4; 7.2.5; 8.2.2; 8.2.3;<br>8.2.4; 8.2.5         | 12.1.2; 12.1.5; 13.1.2; 13.1.3;<br>13.1.4; 14.1.2; 14.1.4 |
| 11      | 7.3.2; 7.3.3; 7.3.4; 7.3.5; 8.3.2; 8.3.3;<br>8.3.4; 8.3.5         | 12.2.2; 12.2.5; 13.2.2; 13.2.3;<br>13.2.4; 14.2.2; 14.2.4 |
| 12      | 7.4.2; 7.4.3; 7.4.4; 7.4.5; 8.4.2; 8.4.3;<br>8.4.4; 8.4.5         | 12.3.2; 12.3.5; 13.3.2; 13.3.3;<br>13.3.4; 14.3.2; 14.3.4 |
| 13      | 7.5.2; 7.5.3; 7.5.4; 7.5.5; 8.5.2; 8.5.3;<br>8.5.4; 8.5.5         | 12.4.2; 12.4.5; 13.4.2; 13.4.3;<br>13.4.4; 14.4.2; 14.4.4 |

## Окончание таблицы

| Вариант | Магнитное поле                                                    | Волновая оптика                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 14      | 7.6.2; 7.6.3; 7.6.4; 7.6.5; 8.6.2; 8.6.3;<br>8.6.4; 8.6.5         | 12.5.2; 12.5.5; 13.5.2; 13.5.3;<br>13.5.4; 14.5.2; 14.5.4 |
| 15      | 7.7.2; 7.7.3; 7.7.4; 7.7.5; 8.8.2; 8.8.3;<br>8.8.4; 8.8.5         | 12.6.2; 12.6.5; 13.6.2; 13.6.3;<br>13.6.4; 14.6.2; 14.6.4 |
| 16      | 7.18.2; 7.18.3; 7.18.4; 7.18.5; 8.18.2;<br>8.18.3; 8.18.4; 8.18.5 | 12.7.2; 12.7.5; 13.7.2; 13.7.3;<br>13.7.4; 14.7.2; 14.7.4 |
| 17      | 7.1.2; 7.1.3; 7.1.4; 7.1.5; 8.1.2; 8.1.3;<br>8.1.4; 8.1.5         | 12.8.2; 12.8.5; 13.8.2; 13.8.3;<br>13.8.4; 14.8.2; 14.8.4 |
| 18      | 7.2.2; 7.2.3; 7.2.4; 7.2.5; 8.2.2; 8.2.3;<br>8.2.4; 8.2.5         | 12.9.2; 12.9.5; 13.9.2; 13.9.3;<br>13.9.4; 14.9.2; 14.9.4 |
| 19      | 7.3.2; 7.3.3; 7.3.4; 7.3.5; 8.3.2; 8.3.3;<br>8.3.4; 8.3.5         | 12.2.2; 12.2.5; 13.2.2; 13.2.3;<br>13.2.4; 14.2.2; 14.2.4 |
| 20      | 7.5.2; 7.5.3; 7.5.4; 7.5.5; 8.5.2; 8.5.3;<br>8.5.4; 8.5.5         | 12.4.2; 12.4.5; 13.4.2; 13.4.3;<br>13.4.4; 14.4.2; 14.4.4 |

**Рекомендуемая литература к решению задач**

1. Сборник задач по общей физике. Ч. 2 . Электричество и электромагнетизм : учебное пособие для 1 и 2 курсов АВТФ, ФЛА, ФАМ, ФАЭМС, ФПМ дневной и вечерней формы обучения / Э.Б. Селиванова, С.И. Вашуков, Л.М. Родникова, Н.Я. Усольцева, Б.И. Юдин / под ред. Э.Б. Селивановой; Новосиб. гос. техн. ун-т , Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 97 с.: ил.

2. Сборник задач по общей физике. Ч. 3 . Колебания и волны. Волновая оптика: учебное пособие для 1 и 2 курсов АВТФ, ФЛА, ФАМ, ФАЭМС, ФПМ дневной и вечерней формы обучения / Э.Б. Селиванова, С.И. Вашуков, Н.Я. Усольцева, Н.В. Клягина, М.А. Шорохова / под ред. Э.Б. Селивановой; Новосиб. гос. техн. ун-т , Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 106 с.: ил.

[illegible]

## ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### ФБ 1 курс (ТОПШ)

| <i>Первое<br/>занятие</i>                                                | <i>Второе<br/>занятие</i>                  | <i>Третье<br/>занятие</i>           | <i>Четвертое<br/>занятие</i>                                |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Л.р. № 14                                                                | Л.р. № 23                                  | Л.р. № 32                           | ТК                                                          |
| Определение<br>удельного<br>заряда<br>электрона<br>методом<br>магнетрона | Свободные<br>электромагнитные<br>колебания | Дифракция<br>лазерного<br>излучения | Дифракция<br>микрочастиц<br>(компьютерное<br>моделирование) |

### Литература

- Лабораторная работа № 14. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона. Компьютерное моделирование



- Электричество и магнетизм, Новосибирск, 2012, № 4215 шифр 53 Э 454 (вопросы для защиты лабораторных работ. Л.р. № 14)



- Колебания и волны, Новосибирск, 2011, № 4070 шифр 53 К 602 (Л.р. № 23)



- Колебания и волны, Новосибирск, 2014, № 4342 шифр 53 К 602 (вопросы для защиты лабораторных работ. Л.р. № 23)



- Оптика, Новосибирск, 2014, № 4341 шифр 53 О 627 (Л.р. № 32)



- Оптика, Новосибирск, 2009, № 3739 шифр 53 О 627 (вопросы для защиты лабораторных работ. Л.р. № 32)



- Дифракция микрочастиц



- Дифракция микрочастиц. Вопросы для защиты



## ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

### Семестр 2

1. Магнитное поле. Инвариантность электрического заряда. Электрическое поле в различных системах отсчета.
2. Взаимодействие движущихся зарядов. Магнитное поле движущегося заряда.
3. Закон Био–Савара–Лапласа.
4. Расчет магнитных полей на основе закона Био–Савара–Лапласа.
5. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в магнитном поле.
6. Закон Ампера.
7. Контур с током в магнитном поле.
8. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме.
9. Применение теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .
10. Работа перемещения проводника с током в постоянном магнитном поле.
11. Магнитные моменты электронов и атомов.
12. Диа- и парамагнетизм.
13. Намагниченность. Магнитное поле в веществе.
14. Ферромагнетики.
15. Закон Фарадея. Правило Ленца.
16. Индуктивность контура. Самоиндукция.
17. Взаимная индукция.
18. Энергия магнитного поля.
19. Первое уравнение Максвелла.
20. Ток смещения. Второе уравнение Максвелла.
21. Теорема Гаусса для магнитного поля. Третье и четвертое уравнения Максвелла.
22. Когерентность и монохроматичность световых волн.

23. Интерференция света от двух источников.
24. Интерференция света от плоскопараллельной пластинки.
25. Интерференция света от пластинки переменной толщины. Кольца Ньютона.
26. Принцип Гюйгенса–Френеля. Метод зон Френеля.
27. Дифракция Френеля на круглом отверстии и на диске.
28. Дифракция Фраунгофера на одной щели.
29. Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке.
30. Дифракция рентгеновских лучей.
31. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет.
32. Поляризация света при отражении и преломлении.
33. Поляризация при двойном лучепреломлении.
34. Поляризационные призмы. Анализ поляризованного света.
35. Характеристики теплового излучения. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.
36. Законы Стефана–Больцмана, Вина. Формулы Рэлея–Джинса и Планка.
37. Виды фотоэффекта. Законы внешнего фотоэффекта.
38. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Фотоны.
39. Эффект Комптона. Корпускулярно-волновые свойства электромагнитного излучения.
40. Корпускулярно-волновой дуализм вещества. Свойства микро-частиц.
41. Соотношение неопределенностей.
42. Волновая функция и ее статистический смысл.
43. Общее уравнение Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.
44. Движение свободной квантовой частицы.
45. Частица в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками».
46. Прохождение частицы через «потенциальный барьер». Туннельный эффект.
47. Гармонический осциллятор.
48. Атом водорода по Бору.
49. Атом водорода в квантовой механике.
50. Волновые функции для электрона в атоме водорода. Спин электрона. Спиновое квантовое число.

- 51. Принцип неразличимости тождественных частиц. Симметричные и антисимметричные волновые функции.
- 52. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям.
- 53. Электронные состояния в многоэлектронных атомах.
- 54. Химические связи.
- 55. Энергия молекулы. Молекулярные спектры.
- 56. Лазеры.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие .....                                                                                                                 | 3  |
| Контроль самостоятельной работы студента .....                                                                                    | 4  |
| Обозначения физических величин, используемых в учебном пособии,<br>и единицы их измерения .....                                   | 10 |
| Формулы по разделу «Электромагнетизм. Колебания. Волны. Волновая<br>оптика. Квантовая физика» .....                               | 14 |
| Уравнение Шрёдингера. Одномерный бесконечно глубокий потенци-<br>альный ящик. Потенциальный барьер. Атом водорода. Молекулы ..... | 31 |
| Квантовые числа .....                                                                                                             | 35 |
| Порядок решения задач .....                                                                                                       | 39 |
| Рейтинг-лист .....                                                                                                                | 84 |
| Таблица вариантов задач к РГЗ «Магнитное поле, волновая оптика» .....                                                             | 85 |
| Выполнение лабораторных работ .....                                                                                               | 87 |
| График выполнения лабораторных работ .....                                                                                        | 88 |
| Вопросы к экзамену .....                                                                                                          | 90 |

**Березин Николай Юрьевич**

**ФИЗИКА**

**Часть 2**

**Учебное пособие**

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*

Корректор *И.Е. Семенова*

Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*

Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции

Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 19.05.2020. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.

Уч.-изд. л. 5,58. Печ. л. 6,0. Изд. № 47. Заказ № 596. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20