

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Институт АПИ НГТУ, Арзамасский политехнический институт (филиал)  
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева  
*сокращенное и полное наименование института*

Кафедра Прикладная математика  
*сокращенное и полное наименование кафедры*

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

по дисциплине

ФИЗИКА

Направление подготовки

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Форма обучения очная

Разработчик: Грушина Л.П.

Утверждены на заседании  
кафедры «Прикладная математика»  
АПИ НГТУ

«29» апреля 2021 г.  
протокол № 4

## Содержание

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                                                                                     | 3  |
| 1. Цели и задачи практических занятий                                                                                                        | 4  |
| 2. Методические указания к практическим занятиям                                                                                             | 5  |
| 2.1 Практическая работа №1 «Кинематика поступательного и вращательного движения. Динамика поступательного движения»                          | 5  |
| 2.2 Практическая работа №2 «Работа и энергия. Законы сохранения. Динамика вращательного движения»                                            | 6  |
| 2.3 Практическая работа №3 «Работа и энергия при вращательном движении. Законы сохранения»                                                   | 7  |
| 2.4 Практическая работа №4 «Механические колебания»                                                                                          |    |
| 2.5 Практическая работа №5 «Волны в упругой среде»                                                                                           |    |
| 2.6 Практическая работа №6 «Молекулярно-кинетическая теория»                                                                                 |    |
| 2.7 Практическая работа №7 «1-ое и 2-ое начала термодинамики. Явления переноса»                                                              |    |
| 2.8 Практическая работа №8 «Электростатика»                                                                                                  |    |
| 2.9 Практическая работа №9 «Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов. Связь потенциала с напряженностью электрического поля» |    |
| 2.10 Практическая работа №10 «Емкость. Конденсаторы. Электрическое поле в диэлектрике. Энергия электрического поля»                          |    |
| 2.11 Практическая работа №11 «Сила тока, плотность тока. Законы Ома. Сопротивление проводников (последовательное и параллельное)»            |    |
| 2.12 Практическая работа №12 «Законы Кирхгофа и Джоуля-Ленца»                                                                                |    |
| 2.13 Практическая работа №13 «Законы Био-Савара-Лапласа и Ампера»                                                                            |    |
| 2.14 Практическая работа №14 «Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле»                                              |    |
| 2.15 Практическая работа №15 «Закон Фарадея. Явления самоиндукции и взаимной индукции»                                                       |    |
| 2.16 Практическая работа №16 «Магнитное поле в веществе. Электромагнитные колебания»                                                         |    |
| 3. Рекомендуемая учебная литература и иные материалы                                                                                         | 11 |

## Введение

Одной из основных форм и методов формирования компетенций являются практические работы. В рамках данного курса осваиваются компетенции УК-1. Формирование данных компетенций позволит подготовить студента к изучению основных положений и законов физики. Выполнение заданий является необходимым условием допуска студента к зачету/и/экзамену.

В таблице 1 представлены названия работ и объем часов их выполнения.

Таблица 1. Темы практических занятий

| №<br>лр | Темы практических занятий                                                                                       | Трудоемкость (час.) |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1       | Кинематика поступательного и вращательного движения. Динамика поступательного движения                          | 4                   |
| 2       | Работа и энергия. Законы сохранения. Динамика вращательного движения                                            | 4                   |
| 3       | Работа и энергия при вращательном движении. Законы сохранения                                                   | 2                   |
| 4       | Механические колебания.                                                                                         | 1                   |
|         | Волны в упругой среде                                                                                           | 1                   |
| 5       | Молекулярно-кинетическая теория.                                                                                | 3                   |
|         | 1-ое и 2-ое начала термодинамики. Явления переноса                                                              | 3                   |
| 6       | Электростатика                                                                                                  | 2                   |
| 7       | Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов. Связь потенциала с напряженностью электрического поля | 2                   |
| 8       | Емкость. Конденсаторы. Электрическое поле в диэлектрике. Энергия электрического поля                            | 2                   |
| 9       | Сила тока, плотность тока. Законы Ома. Сопротивление проводников (последовательное и параллельное)              | 2                   |
| 10      | Законы Кирхгофа и Джоуля-Ленца                                                                                  | 2                   |
| 11      | Законы Био-Савара-Лапласа и Ампера                                                                              | 2                   |
| 12      | Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле                                                | 2                   |
| 13      | Закон Фарадея. Явления самоиндукции и взаимной индукции                                                         | 2                   |
| 14      | Магнитное поле в веществе. Электромагнитные колебания                                                           | 2                   |

Каждый студент выполняет общие или индивидуальные задания, что способствует эффективному формированию практических умений, навыков и компетенций.

Практические работы проводятся согласно утвержденному расписанию учебных занятий. Оработка пропущенных студентами практических работ осуществляется самостоятельно в течение семестра. Замена пропущенных студентами практических работ другими видами самостоятельной работы не допускается.

### **1. Цели и задачи практических занятий**

- Повысить интерес к изучению физики, развивать интеллектуальные и творческие способности в процессе решения физических задач и самостоятельного приобретения новых знаний;
- - лучше понять и запомнить основные законы физики, учить умению применять знания по физике для объяснения явлений природы, анализировать изучаемые явления, выделять главные факторы, обуславливающие то или иное явление, оценивать новую информацию физического содержания;
- - обеспечить формирование профессиональных компетенций студентов и готовности к командной работе в процессе профессиональной деятельности;
- - выработать приемы и навыки решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих в дальнейшем решать практические, инженерные задачи.

### **1. Методические указания к практическим занятиям**

При изучении дисциплины «Физика» большое значение имеет практическое применение теоретических знаний, главное из которых – умение решать задачи. Прежде, чем приступить к решению задач, необходимо тщательно изучить теоретический материал по данной теме.

#### **Правила оформления решения задач:**

1. Условия всех задач студенты переписывают полностью без сокращений.
2. Все значения величин, заданных в условии и привлекаемых из справочных таблиц, записывают для наглядности сокращенно (столбиком) в тех же единицах, которые заданы, а затем рядом осуществляют перевод в единицы СИ.
3. В большей части задач необходимо выполнять чертежи или графики с обозначением всех величин. Рисунки надо выполнять аккуратно, используя чертежные инструменты; объяснение решения должно быть согласовано с обозначениями на рисунках.
4. Необходимо указать физические законы, которые должны быть использованы, и аргументировать возможность их применения для решения данной задачи.
5. С помощью этих законов, учитывая условие задачи, получить необходимые расчетные формулы.
6. Вывод формул и решение задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.
7. Получив расчетную формулу, необходимо проверить ее размерность.
8. Основные физические законы, которыми следует пользоваться при решении задач (вывод расчетных формул), приведены в каждом из разделов. Там же приведены некоторые формулы, которыми можно пользоваться без вывода.
9. Каждая последующая задача должна начинаться с новой страницы.
10. Студент должен быть готов дать во время зачета пояснения по решению всех выполненных задач.

## 2.1.-2.5 Практическая работа №1-5

[5] Грушина Л.П. Грушин И.Т. Механика. Решение задач. Учебное пособие. Рекомендовано Ученым советом НГТУ - Н.Новгород: НГТУ, 2015 - 136 с.

## 2.6 Практическая работа № 6

### «Молекулярно-кинетическая теория»

#### Задание:

1. В сосуде объемом 3,75 л находится 0,525 моль идеального газа. Найти концентрацию молекул в сосуде.
2. При изотермическом сжатии идеального газа его плотность возросла в 2,25 раза. Во сколько раз давление газа в конечном состоянии больше, чем в начальном?
3. Найти среднее значение кинетической энергии поступательного движения всех молекул некоторого идеального газа, который занимает объем 4,46 л, под давлением 202 кПа.
4. В сосуде объемом 0,473 л находится идеальный одноатомный газ при давлении 101 кПа и температуре 250 К, а в сосуде объемом 0,946 л - такой же газ, но при давлении 202 кПа и температуре 350 К. Какая температура и какое давление окажутся в этих сосудах после их соединения? Сосуды теплоизолированы от окружающей среды.
5. Газ при температуре 364 К и давлении 785 кПа имеет плотность 5,25 кг/м<sup>3</sup>. Найти массу одной молекулы

#### Пример решения и оформления заданий

**Задача 1** Какую часть объема одного моля газа при нормальных условиях занимает собственный объем его молекул и каково среднее расстояние  $\langle L \rangle$  между ними? Диаметр молекул газа принять равным  $d = 3 \cdot 10^{-10}$  м.

Решение

Собственный объем молекул одного моля ( $V = 1$  моль) газа равен

$$V = \frac{\pi d^3}{6} N_A = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{6} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Объем одного моля газа при нормальных условиях, т.е. при давлении  $P_0 = 10^5$  Па и температуре  $T_0 = 273$  К определим из уравнения Менделеева – Клапейрона (1.11):

$$V_0 = \frac{RT_0}{P_0} = \frac{8,31 \cdot 273}{10^5} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Следовательно,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{8,1 \cdot 10^{-6}}{22,4 \cdot 10^{-3}} = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Вследствие малости относительного объема при описании модели идеального газа собственным объемом молекул газа можно пренебречь.

Оценим величину среднего расстояния между молекулами. Объем, приходящийся на одну молекулу, равен

$$v_1 = \frac{V_0}{N_A} = \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,72 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3.$$

А среднее расстояние между молекулами равно:

$$\langle L \rangle = \sqrt[3]{v_1} = \sqrt[3]{3,72 \cdot 10^{-26}} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м},$$

т.е. расстояние между молекулами на порядок больше их размеров.

**Задача 2** Сосуд объемом  $V$  необходимо откачать от давления  $P_0$  до давления  $P$  с помощью поршневого насоса, имеющего объем рабочей камеры  $V_0$ . За сколько циклов работы насоса это можно сделать? Температуру считать постоянной.

Решение

Перед засасыванием объем воздуха равен объему сосуда, а давление его  $P_0$ . В конце первого цикла засасывания объем воздуха складывается из объема сосуда и объема засасывающей камеры насоса:

$$V_1 = V + V_0,$$

а его давление становится равным  $P_1$ . Согласно уравнению изотермического процесса  $P_0 V = P_1 (V + V_0)$ , откуда

$$P_1 = P_0 \frac{V}{V + V_0}.$$

При втором цикле откачивания роль начального давления будет играть  $P_1$ , поэтому

$$P_2 = P_1 \frac{V}{V + V_0} = P_0 \left( \frac{V}{V + V_0} \right)^2.$$

При третьем цикле начальное давление будет  $P_2$ . Следовательно,

$$P_3 = P_2 \frac{V}{V + V_0} = P_0 \left( \frac{V}{V + V_0} \right)^3,$$

и т.д. После  $n$  циклов давление будет равно :

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V + V_0} \right)^n; \text{ отсюда } \frac{P}{P_0} = \left( \frac{V}{V + V_0} \right)^n.$$

Логарифмируя, найдем

$$\ln \left( \frac{P}{P_0} \right) = n \ln \left( \frac{V}{V + V_0} \right).$$

Окончательно для числа циклов  $n$  получим:

$$n = \frac{\ln P / P_0}{\ln \left( \frac{V}{V + V_0} \right)}.$$

## 2.7 Практическая работа № 7

### «1-ое и 2-ое начала термодинамики. Явления переноса»

#### Задание:

1. С идеальным одноатомным газом совершают процесс при постоянном объеме так, что его температура уменьшается в  $n=2,5$  раза. Начальное давление газа равно  $P_0=105$  Па, объем  $V=10$  л. Определить изменение внутренней энергии газа.
2. Один киломоль идеального одноатомного газа сжимается так, что его объем уменьшается вдвое. Сжатие происходит по закону  $PV^2 = \text{const}$ . Начальная температура газа  $T_1=200$  К. Найти изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$ .
3. Определить работу  $\nu$  молей идеального одноатомного газа при расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$  в процессе, при котором температура изменяется по закону  $T = \alpha V^2$ , где  $\alpha$  - положительная постоянная.
4. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу  $A=73,5$  кДж. Температура нагревателя  $t_1=100^\circ\text{C}$ , температура холодильника  $t_2=0^\circ\text{C}$ . Найти КПД цикла, количество теплоты  $Q_1$ , получаемое за один цикл от нагревателя, и количество теплоты  $Q_2$ , отдаваемое за один цикл холодильнику.
5. Средняя длина свободного пробега молекул водорода при нормальных условиях составляет  $\lambda=0,1$  мкм. Определить среднюю длину  $\lambda$  их свободного пробега при давлении  $P=0,1$  мПа, если температура газа останется постоянной.

#### Пример решения и оформления заданий

**Задача 1.** Определить внутреннюю энергию азота массой  $m=0,56$  кг, который вначале находится при температуре  $T_1=300$  К. Найти, какая часть внутренней энергии при этой температуре приходится на долю поступательного движения и какая часть на долю вращательного. Затем азот изобарно нагрели до  $T_2=500$  К. Определить изменение внутренней энергии газа. Молярная масса азота равна  $\mu=0,028$  кг/моль.

#### Решение

Внутренняя энергия азота при начальной температуре по (2.1)

$$U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT_1,$$

где  $i$  – число степеней свободы. Для азота (жесткая двухатомная молекула)  $i=5$ , тогда

$$U_1 = \frac{5}{2} \frac{m}{\mu} RT_1 = \frac{5 \cdot 0,56 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 0,028} = 125 \text{ кДж.}$$

Из пяти степеней свободы молекулы газа 3 степени свободы приходятся на поступательное движение молекулы, а 2 степени свободы - на вращательное движение.

С учетом этого часть внутренней энергии, приходящаяся на долю поступательного движения, равна

$$\alpha_1 = \frac{3}{5} = 0,6;$$

а часть внутренней энергии, приходящаяся на долю вращательного движения, равна

$$\alpha_2 = \frac{2}{5} = 0,4.$$

Изменение внутренней энергии при изобарическом нагреве равно

$$\Delta U = \frac{5}{2} \frac{m}{\mu} R T_2 - T_1 = \frac{5 \cdot 0,56}{2 \cdot 0,028} \cdot 8,31 \cdot 200 = 83,1 \text{ кДж}.$$

**Задача 2** Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) массой  $m=2,2$  кг, занимающий объем  $V_1=4$  м<sup>3</sup> при температуре  $T_1=300$  К, сжали адиабатически так, что конечное давление увеличилось в  $k=2$  раза. Определить конечный объем  $V_2$ , температуру  $T_2$ , давление  $P_2$  и изменение внутренней энергии  $\Delta U$ . Молярная масса углекислого газа равна  $\mu=0,044$  кг/моль.

Решение

Учитывая, что углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) трехатомный, число степеней свободы  $i=6$ . Показатель адиабаты для углекислого газа равен

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{8}{6} = 1,33.$$

Конечный объем газа найдем из уравнения Пуассона  $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ . Учитывая, что  $P_2 = k P_1$ , получим:

$$V_2 = \frac{V_1}{k^{1/\gamma}} = \frac{4}{2^{1/1,33}} = 2,38 \text{ м}^3.$$

Для нахождения температуры  $T_2$  воспользуемся уравнением

$$\text{адиабаты в переменных } (T - P) - T_1 P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma-1}} = T_2 P_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma-1}} :$$

$$T_2 = T_1 k^{\frac{1-\gamma}{\gamma-1}} = 300 \cdot 2^{1,33} = 356 \text{ К}.$$

Изменение внутренней энергии для адиабатического процесса равно

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R T_2 - T_1 = 3 \cdot \frac{2,2}{0,044} \cdot 8,31 \cdot (356 - 300) = 70 \text{ кДж}.$$

**Задача 3** Тепловая машина работает по некоторому обратимому прямому циклу, КПД которого  $\eta=25\%$ . Каков будет холодильный коэффициент этой машины, если она будет совершать тот же цикл в обратном направлении?

Решение

В обратном цикле рабочее тело будет отбирать у холодильника количество тепла  $Q_2$  и затем отдавать нагревателю количество теплоты  $Q_1$ . Работа  $A$ , совершённая рабочим телом в обратном цикле, будет отрицательна. Холодильный коэффициент (3.3) запишется

$$k = \frac{Q_2}{|A|}.$$

Коэффициент полезного действия прямого цикла (3.1)

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

где количество подводимого в этом цикле тепла можно выразить через холодильный коэффициент

$$Q_1 = |Q_2| + A = A(k + 1).$$

Следовательно

$$\eta = \frac{A}{A(k + 1)} = \frac{1}{k + 1}.$$

Окончательно получаем

$$k = 1 - \frac{1}{\eta} = \frac{1}{0,25} - 1 = 3 = 300\%.$$

**Задача 4** Какую часть объема одного моля газа при нормальных условиях занимает собственный объем его молекул и каково среднее расстояние  $\langle L \rangle$  между ними? Диаметр молекул газа принять равным  $d = 3 \cdot 10^{-10}$  м.

Решение

Собственный объем молекул одного моля ( $\nu = 1$  моль) газа равен

$$V = \frac{\pi d^3}{6} N_A = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-10}^3}{6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Объем одного моля газа при нормальных условиях, т.е. при давлении  $P_0 = 10^5$  Па и температуре  $T_0 = 273$  К определим из уравнения Менделеева – Клапейрона (1.11):

$$V_0 = \frac{RT_0}{P_0} = \frac{8,31 \cdot 273}{10^5} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Следовательно,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{8,1 \cdot 10^{-6}}{22,4 \cdot 10^{-3}} = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Вследствие малости относительного объема при описании модели идеального газа собственным объемом молекул газа можно пренебречь.

Оценим величину среднего расстояния между молекулами. Объем, приходящийся на одну молекулу, равен

$$\nu_1 = \frac{V_0}{N_A} = \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,72 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3.$$

А среднее расстояние между молекулами равно:

$$\langle L \rangle = \sqrt[3]{\nu_1} = \sqrt[3]{3,72 \cdot 10^{-26}} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м},$$

т.е. расстояние между молекулами на порядок больше их размеров.

## 2.8 Практическая работа № 8 «Электростатика»

### Задания:

1. Два разноименно заряженных шарика находятся в масле на расстоянии  $r_1 = 5$  см. Определить диэлектрическую проницаемость масла  $\epsilon$ , если эти шарики взаимодействуют с такой же силой в воздухе на расстоянии  $r_2 = 11,2$  см.
2. В поле бесконечной равномерно заряженной нити, на которой распределен заряд  $q = 3 \cdot 10^{-8}$  Кл на каждые  $L = 150$  см длины, помещена пылинка, несущая на себе два электрона. На каком расстоянии  $r$  от нити находится пылинка, если на нее действует сила  $F = 4 \cdot 10^{-15}$  Н?
3. В центре правильного треугольника, в вершинах которого находится по заряду  $q = 3,43 \cdot 10^{-8}$  Кл, помещен отрицательный заряд. Найдите величину этого заряда  $Q$ , если данная система находится в равновесии.
4. Считая Землю шаром радиусом  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м, определить заряд  $Q$ , который несет Земля, если напряженность электрического поля у ее поверхности в среднем равна  $E = 130$  В/м. Определить потенциал поля Земли на расстоянии  $h = 600$  км от ее поверхности.
5. Бесконечная равномерно заряженная нить с линейной плотностью заряда  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  Кл/см расположена горизонтально. Под ней на расстоянии  $r = 2$  см находится в равновесии шарик массой  $m = 0,01$  г. Определить заряд шарика.

### Пример решения и оформления заданий

Задача 1. Два заряда находятся в керосине ( $\epsilon = 2$ ) на расстоянии 1 см друг от друга и взаимодействуют с силой 2,7 Н. Величина одного заряда в 3 раза больше другого. Определить величину каждого заряда.

| Дано                                                                                          | Решение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F = 2,7 \text{ Н},$<br>$r = 0,01 \text{ м},$<br>$\epsilon = 2,$<br>$q_1 = 3q,$<br>$q_2 = q.$ | <p>Сила взаимодействия точечных зарядов определяется по закону Кулона</p> $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2},$ <p>где <math>q_1</math> и <math>q_2</math> – заряды, <math>\epsilon</math> – диэлектрическая проницаемость среды (в данной задаче – керосина), <math>\epsilon_0</math> – электрическая</p> |
| $q_1 - ?$<br>$q_2 - ?$                                                                        | <p>постоянная <math>\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},</math><br/> <math>r</math> – расстояние между зарядами. По условию задачи <math>q_1 = 3q, q_2 = q.</math><br/> Тогда</p>                                                                                                                             |

$$q = \sqrt{\frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2 F}{3}};$$

Подставим числовые значения и получим

$$q = \sqrt{\frac{2,7 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-4}}{3}} = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ (Кл)}.$$

Следовательно,  $q_1 = 4,2 \cdot 10^{-7}$  Кл;  $q_2 = 1,4 \cdot 10^{-7}$  (Кл).

Ответ:  $q_1 = 4,2 \cdot 10^{-7}$  Кл;  $q_2 = 1,4 \cdot 10^{-7}$  Кл.

**Задача 2.** Два положительно заряженных тела с зарядами 1,67 и 3,33 нКл находятся на расстоянии 20 см друг от друга. В какой точке на линии, соединяющей эти тела, надо поместить третье тело с зарядом  $-0,67$  нКл, чтобы оно оказалось в равновесии? Массами тел пренебречь.

Дано

$$q_1 = 1,67 \text{ нКл} = 1,67 \cdot 10^{-9} \text{ Кл},$$

$$q_2 = 3,33 \text{ нКл} = 3,33 \cdot 10^{-9} \text{ Кл},$$

$$r = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м},$$

$$|q_3| = 0,67 \text{ нКл} = 0,67 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}.$$

$x = ?$

Решение

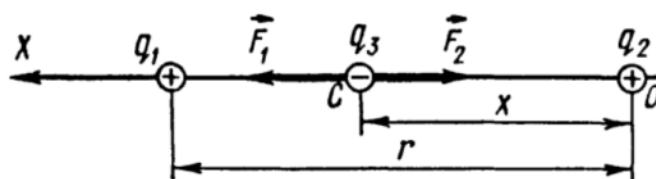


Рис.3

На тело  $C$  с зарядом  $q_3$  действуют:  $F_1$  и  $F_2$  – электрические силы взаимодействия с зарядами  $q_1$  и  $q_2$  соответственно (рис.3). Запишем условие равновесия тела  $C$  в скалярной форме относительно оси  $X$ :

$$F_1 - F_2 = 0,$$

откуда  $F_1 = F_2$ . Учитывая, что

$$F_1 = \frac{q_1 |q_3|}{4\pi\epsilon_0\epsilon(r-x)^2}, \quad F_2 = \frac{q_2 |q_3|}{4\pi\epsilon_0\epsilon x^2},$$

где  $x$  – расстояние между телами с зарядами  $q_2$  и  $q_3$ , получаем

$$\frac{q_1 |q_3|}{4\pi\epsilon_0\epsilon(r-x)^2} = \frac{q_2 |q_3|}{4\pi\epsilon_0\epsilon x^2},$$

Отсюда выражаем  $x$

$$x = \frac{\sqrt{q_2}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}} r = \frac{\sqrt{3,33 \cdot 10^{-9}}}{\sqrt{1,67 \cdot 10^{-9}} + \sqrt{3,33 \cdot 10^{-9}}} 0,2 \approx 0,12 \text{ (м)}.$$

Ответ:  $x \approx 0,12$  м.

**Задача 3.** Тонкий стержень длиной  $l = 15$  см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью  $\tau = 6 \text{ мкКл/м}$ . Найдите напряженность  $E$ , создаваемую этим зарядом в точке, расположенной на оси стержня и удаленной от ближайшего конца стержня на расстояние  $r = 10$  см.

**Дано**

$$l = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м},$$

$$\tau = 6 \text{ мКл/м} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м},$$

$$r = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}.$$

$E - ?$

**Решение**

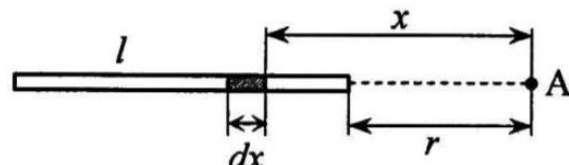


Рис.7

Заряд, равномерно распределенный по тонкому стержню, не является точечным, поэтому поступаем следующим образом: выделим на стержне бесконечно малый элемент длины  $dx$  (рис.7). Заряд  $dq = \tau dx$ , находящийся на выделенном элементе, можно считать точечным, и тогда напряженность в точке А, создаваемая зарядом  $dq$  будет равна:

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{\tau dx}{4\pi\epsilon_0 x^2},$$

где  $x$  – расстояние от  $dx$  до точки А.

Применяя принцип суперпозиции, определим напряженность поля в точке А, создаваемую заряженным стержнем:

$$E = \int_l dE = \int_r^{r+l} \frac{\tau dx}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{1}{x} \right) \Big|_r^{r+l} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right).$$

Итак, учитывая что  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ,

$$E = 9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1}{0,1} - \frac{1}{0,25} \right) = 324 \text{ кВ/м}.$$

Ответ:  $E = 324 \text{ кВ/м}$ .

## 2.9. Практическая работа № 9

### «Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов. Связь потенциала с напряженностью электрического поля»

**Задание.**

1. Электрон, летящий из бесконечности со скоростью  $v = 106 \text{ м/с}$ , остановился на расстоянии  $L = 0,8 \text{ м}$  от поверхности отрицательно заряженного шара металлического шара радиусом  $R = 4,0 \text{ см}$ . Определить потенциал шара. Заряд и масса электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .
2. Между пластинами плоского конденсатора при напряжении  $U = 3000 \text{ В}$  находится в равновесии пылинка массой  $m = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ . На сколько необходимо уменьшить напряжение, чтобы пылинка осталась в равновесии, если ее заряд изменился на  $n = 100$  электронов. Расстояние между пластинами  $d = 5,0 \text{ см}$ . Выталкивающей силой воздуха пренебречь, заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .
3. Шарик, заряженный до потенциала  $\phi = 792 \text{ В}$  имеет поверхностную плотность заряда  $\sigma = 300 \text{ нКл/м}^2$ . Найти радиус  $R$  шарика.
4. Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы перенести заряд  $q = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии  $L = 0,9 \text{ м}$  от поверхности шара радиусом  $R = 0,3 \text{ м}$ , если поверхностная плотность заряда сферы  $\sigma = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$ .
5.  $N$  одинаковых капелек ртути имеют один и тот же потенциал  $\phi_0$ . Определить потенциал  $\phi$  большой шарообразной капли, получившейся в результате слияния этих капель.

**Задача 1.** Полый шар несет на себе равномерно распределенный заряд. Определите радиус шара, если потенциал в центре шара равен  $\varphi_1 = 200$  В, а в точке, лежащей от его центра на расстоянии  $r = 50$  см,  $\varphi_2 = 40$  В.

**Дано**

$$\varphi_1 = 200 \text{ В,}$$

$$\varphi_2 = 40 \text{ В,}$$

$$r = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м.}$$

$R - ?$

**Решение**

Потенциал, создаваемый заряженным шаром радиусом  $R$  в центре шара и в точке, лежащей от его центра на расстоянии  $r$  определяются соответственно по формулам:

$$\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}, \quad \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Таким образом, их отношение

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{r}{R},$$

из которого определяем радиус шара

$$R = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \cdot r = \frac{40}{200} \cdot 0,5 = 0,1(\text{м}) = 10 \text{ (см)}.$$

*Ответ:*  $R = 10$  см.

**Задача 2.** Определить потенциал точки поля, созданного металлическим шаром с поверхностной плотностью заряда  $10^{-11}$  Кл/см<sup>2</sup> и радиусом 1 см, если расстояние от этой точки до поверхности шара 9 см.

**Дано**

$$\sigma = 10^{-11} \text{ Кл/см}^2,$$

$$R = 9 \text{ см} = 0,09 \text{ м,}$$

$$r = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м.}$$

$\varphi - ?$

**Решение**

Потенциал, создаваемый заряженным шаром радиусом  $R$  в точке на расстоянии  $r$  от его поверхности, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0(R+r)},$$

где  $q_0 = \sigma 4\pi R^2$  – заряд шара ( $q_0 = \sigma S$ ,  $S = 4\pi R^2$  – площадь поверхности шара).

Итак,

$$\varphi = \frac{\sigma 4\pi R^2}{\epsilon\epsilon_0(R+r)} = \frac{10^{-11} \cdot 4 \cdot 3,14}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1} = 142 \text{ (В)}.$$

*Ответ:*  $\varphi = 142$  В.

## 2.8. Практическая работа № 8

### «Ёлектроёмкость. Конденсаторы. Ёлектрическое поле в диэлектрике»

**Задание:**

1. Два плоских воздушных конденсатора ёмкостью  $C_1 = 2,0$  мкФ и  $C_2 = 1,0$  мкФ соединены параллельно, заряжены до разности потенциалов  $\Delta\varphi_0 = 600$  В и отключены от источника ЭДС. Затем расстояние между обкладками конденсатора  $C_1$  увеличили в  $n = 2$  раз. Определить установившееся напряжение  $U$ .
2. Определить ёмкость  $C$  уединенного шарового проводника радиуса  $R_1 = 0,20$  м, окруженного прилегающим к нему концентрическим слоем однородного изотропного диэлектрика с наружным радиусом  $R_2 = 0,40$  м. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2$ .
3. Два конденсатора ёмкостью  $C_1 = 1$  мкФ и  $C_2 = 2$  мкФ соединены последовательно, заряжены до разности потенциалов  $\Delta\varphi = 600$  В и отключены от источника напряжения. Конденсаторы, не разряжая, разъединяют и соединяют параллельно. Определить изменение энергии  $\Delta W$  батареи.

4. Найти емкость  $C$  слоистого плоского конденсатора, площадь обкладок которого  $S = 400 \text{ см}^2$ , толщина первого эбонитового слоя конденсатора  $d_1 = 0,02 \text{ см}$ , второго слоя из стекла  $d_2 = 0,07 \text{ см}$ . Диэлектрические проницаемости эбонита  $\epsilon_1 = 3$ , стекла  $\epsilon_2 = 7$ .
5. Найти емкость  $C$  слоистого сферического конденсатора с радиусами обкладок  $R_1 = 2,0 \text{ см}$  и  $R_2 = 2,6 \text{ см}$ , между сферическими обкладками которого находятся два concentрических слоя диэлектрика, толщины и диэлектрические проницаемости которых равны соответственно  $d_1 = 0,2 \text{ см}$ ,  $d_2 = 0,4 \text{ см}$ ,  $\epsilon_1 = 7$ ,  $\epsilon_2 = 2$ .

### Пример решения и оформления заданий

**Пример 1.** Площадь пластины плоского воздушного конденсатора  $60 \text{ см}^2$ , заряд конденсатора  $1 \text{ нКл}$ , разность потенциалов между его пластинами  $90 \text{ В}$ . Определить расстояние между пластинами конденсатора.

| Дано                                                                                                                                         | Решение                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S = 60 \text{ см}^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,<br>$q = 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$ ,<br>$U = 90 \text{ В}$ .<br><hr/> $d = ?$ | Емкость плоского конденсатора определяется по формуле<br>$C = \epsilon_0 \epsilon S / d. \quad (1)$<br>С другой стороны, емкость конденсатора<br>$C = q / U. \quad (2)$ |

Приравняв правые части выражений (1), (2), получаем  $\epsilon_0 \epsilon S / d = q / U$ , откуда

$$d = \frac{US\epsilon_0\epsilon}{q} = \frac{90 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{10^{-9}} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}.$$

Ответ:  $d = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

**Пример 2.** Заряд на каждом из двух последовательно заряженных конденсаторов емкостью  $18$  и  $10 \text{ пФ}$  равен  $0,09 \text{ нКл}$ . Определить напряжение на батарее конденсаторов; на каждом конденсаторе.

| Дано                                                                                                                                             | Решение                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_1 = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$ ,<br>$C_2 = 1 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$ ,<br>$q = 9 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$ .<br><hr/> $U_1, U_2, U - ?$ | При последовательном соединении конденсаторов напряжение $U$ на батарее равно $U = U_1 + U_2$ , а заряд равен заряду каждого конденсатора. Напряжение $U$ , заряд $q$ и емкость $C$ связаны соотношением<br>$U = \frac{q}{C}.$ |

Тогда

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{9 \cdot 10^{-11}}{1,8 \cdot 10^{-11}} = 5 \text{ (В)};$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{9 \cdot 10^{-11}}{10^{-11}} = 9 \text{ В}; U = 14 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $U_1 = 5 \text{ В}$ ,  $U_2 = 9 \text{ В}$ ,  $U = 14 \text{ В}$ .

### Пример 3

Два конденсатора емкостью по 3 мкФ заряжены один до напряжения 100 В, а другой до 200 В. Определить напряжение между обкладками конденсатора, если они соединены параллельно одноименно заряженными обкладками; разноименно заряженными обкладками.

| Дано                                      | Решение                                                                     |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $C_1 = C_2 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ Ф},$ | Напряжение $U$ , заряд $q$ и емкость $C$ конденсаторов связаны соотношением |
| $U_1 = 100 \text{ В},$                    | $q = CU$ ; тогда $q_1 = C_1 U_1$ ; $q_2 = C_2 U_2$ . При                    |
| $U_2 = 200 \text{ В}.$                    | соединении конденсаторов одноименно                                         |
| $U', U'' - ?$                             |                                                                             |

заряженными обкладками заряд батареи

$$q = q_1 + q_2,$$

емкость  $C = C_1 + C_2 = 2C_1,$

напряжение

$$U' = \frac{q}{2C_1} = \frac{U_1 C_1 + U_2 C_2}{2C_1} = \frac{C_1(U_1 + U_2)}{2C_1} = \frac{100 + 200}{2} = 150 \text{ (В)}.$$

При соединении конденсаторов разноименно заряженными обкладками заряд батареи

$$q = q_2 - q_1,$$

емкость  $C = C_1 + C_2 = 2C_1,$

напряжение

$$U'' = \frac{q_2 - q_1}{2C_1} = \frac{U_2 C_2 - U_1 C_1}{2C_1} = \frac{C_1(U_2 - U_1)}{2C_1} = \frac{200 - 100}{2} = 50 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $U' = 150 \text{ В}, U'' = 50 \text{ В}.$

## 2.9. Практическая работа № 9

### «Сила тока, плотность тока. Законы Ома. Сопротивление проводников (последовательное и параллельное)»

#### Задание:

1. Медный провод длиной  $l = 1 \text{ км}$  имеет сопротивление  $R = 2,9 \text{ Ом}$ . Найти массу  $m$  провода. Удельное сопротивление меди равно  $\rho = 0,017 \text{ мкОм}$ , плотность меди  $\rho_{\text{мед}} = 8,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .
2. По проводнику течет ток силой  $I = 3,2 \text{ А}$ . Определить сколько электронов  $N$  проходит через поперечное сечение проводника за  $t = 1 \text{ с}$ ? Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .
3. Параллельно амперметру, сопротивление которого  $R_a = 0,03 \text{ Ом}$  включен медный проводник длиной  $l = 1,5 \text{ мм}$ . Амперметр показывает ток  $I_a = 0,4 \text{ А}$ . Какова сила тока цепи? Удельное сопротивление меди равно  $\rho = 0,017 \text{ мкОм}$ .
4. Ток в цепи батареи, ЭДС которой  $\varepsilon = 30 \text{ В}$ , равен  $I = 3 \text{ А}$ . Напряжение на зажимах батареи  $U = 18 \text{ В}$ . Найти сопротивление внешней части цепи  $R$  и внутреннее сопротивление батареи  $r$ .
5. Три параллельно соединенных сопротивления  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3 \text{ Ом}$  и  $R_3 = 5 \text{ Ом}$  питаются от батареи с ЭДС  $\varepsilon = 10 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 1 \text{ Ом}$ . Определить напряжение во внешней цепи и ток в каждом из сопротивлений.

#### Пример решения и оформления заданий

**Задача 1.** Напряжение на концах проводника сопротивлением 5 Ом за 0,5 с равномерно возрастает от 0 до 20 В. Какой заряд проходит через проводник за это время?

|                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Дано</b><br>$R = 5 \text{ Ом},$<br>$t = 0,5 \text{ с},$<br>$U_1 = 0,$<br>$U_2 = 20 \text{ В}.$<br><hr/> $q - ?$ | <b>Решение</b><br>За время $dt$ по проводнику переносится заряд<br>$dq = Idt,$<br>где $I = \frac{U(t)}{R}$ – ток в проводнике, $R$ – сопротивление<br>проводника; $U(t)$ – напряжение |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

на концах проводника. Напряжение  $U$  линейно изменяется со временем, т. е. можно записать  $U(t) = kt$ , где  $k = \Delta U / \Delta t$  – коэффициент пропорциональности,

$$k = \frac{20 - 0}{0,5} = 40 \text{ (В/с)}.$$

Заряд  $q$ , перенесенный по проводнику за 0,5 с, будет

$$q = \int_0^{0,5} dq = \int_0^{0,5} \frac{U(t)}{R} dt = \int_0^{0,5} \frac{k}{R} t dt = \frac{k}{R} \frac{t^2}{2} \Big|_0^{0,5} = \frac{40 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 5} = 1 \text{ (Кл)}.$$

Ответ:  $q = 1 \text{ Кл}.$

### Пример 2

Определить плотность тока в нихромовом проводнике длиной 5 м, если на концах его поддерживается разность потенциалов 2 В.

|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Дано</b><br>$l = 5 \text{ м},$<br>$U = 2 \text{ В},$<br>$\rho = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$<br><hr/> $j - ?$ | <b>Решение</b><br>По закону Ома в дифференциальной форме плотность тока $j$<br>$= \gamma E$ , где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость, $\rho$ – удельное<br>сопротивление |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

проводника,  $E = \frac{U}{l}$  – емкость электрического поля в проводнике.

$$\text{Тогда} \quad j = \gamma E = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l} = \frac{2}{1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 5} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ (А/м}^2\text{)}.$$

Ответ:  $j = 3,6 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2.$

Определить ЭДС аккумуляторной батареи, ток короткого замыкания в которой 10 А, если при подключении к ней резистора сопротивлением 9 Ом сила тока в цепи равна 1 А.

|                                                                                                                 |                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Дано</b><br>$I_{кз} = 10 \text{ А},$<br>$R = 9 \text{ Ом},$<br>$I = 1 \text{ А},$<br><hr/> $\mathcal{E} - ?$ | <b>Решение</b><br>По закону Ома для замкнутой цепи<br>$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$ $\mathcal{E} = I(R + r).$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Тогда при коротком замыкании цепи внешнее сопротивление  $R = 0$  и  $I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ , откуда

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I_{кз}}.$$

Таким образом

$$\mathcal{E} = I(R + \frac{\mathcal{E}}{I_{кз}})$$

Выражаем  $\mathcal{E}$  и получим

$$\mathcal{E} = \frac{IR}{1 - I/I_{кз}} = \frac{9 \cdot 1}{1 - 0,1} = 10 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ .

## 2.10. Практическая работа № 10 «Законы Кирхгофа и Джоуля-Ленца»

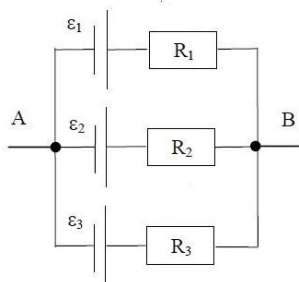
### Задание:

1. Какой объем воды  $V$  можно вскипятить, затратив электрическую энергию  $W = 3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ? Начальная температура воды  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ , плотность воды  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

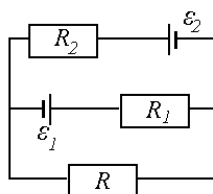
9. Какую мощность  $P$  потребляет нагреватель электрического чайника, если объем воды  $V = 1 \text{ л}$  закипает через время  $t = 5 \text{ мин}$ . Каково сопротивление нагревателя  $R$ , если напряжение в сети  $U = 120 \text{ В}$ ? Начальная температура воды  $t_0 = 13,5^\circ\text{C}$ . Теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ , плотность воды  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

10. Электропечь должна давать количество тепла  $Q = 100,6 \text{ кДж}$  за время  $t = 10 \text{ мин}$ . Какова должна быть длина нихромовой проволоки сечением  $S = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ , если печь предназначена для электросети с напряжением  $U = 36 \text{ В}$ ? Удельное сопротивление нихрома  $\rho = 100 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

Три источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = 11 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 4 \text{ В}$  и  $\mathcal{E}_3 = 6 \text{ В}$  и три реостата с сопротивлениями  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$  и  $R_3 = 2 \text{ Ом}$  соединены, как показано на рисунке. Определить с помощью правил Кирхгофа силу тока  $I_1$  через сопротивление  $R_1$ . Внутреннее сопротивление источников тока пренебрежимо мало.



17. Найти значение и направление тока через сопротивление  $R$  в схеме (рис.), если  $\mathcal{E}_1 = 1,5 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 3,7 \text{ В}$ ,  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$  и  $R = 5,0 \text{ Ом}$ . Внутренние сопротивления источников тока пренебрежимо малы.



### Пример решения и оформления заданий

**Пример 5.** К источнику тока подключают один раз резистор сопротивлением 1 Ом, другой раз – 4 Ом. В обоих случаях на резисторах за одно и то же время выделяется одинаковое количество теплоты. Определить внутреннее сопротивление источника тока.

| Дано                                                                               | Решение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_1 = 1 \text{ Ом},$<br>$R_2 = 4 \text{ Ом},$<br>$t_1 = t_2 = t,$<br>$Q_1 = Q_2.$ | <p>По закону Ома для полной цепи силы тока в первом и во втором случаях определяется выражениями</p> $I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}, \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$ <p>По закону Джоуля-Ленца количество теплоты <math>Q</math>, выделяемое в проводнике при прохождении тока за время <math>t</math>, равно: <math>Q = I^2 R t</math></p> |
| $r - ?$                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Так как

$$Q_1 = Q_2, \text{ то } I_1^2 R_1 t = I_2^2 R_2 t.$$

Используя закон Ома, получим

$$\frac{\mathcal{E}^2}{(R_1 + r)^2} R_1 t = \frac{\mathcal{E}^2}{(R_2 + r)^2} R_2 t \text{ или } \frac{R_1}{(R_1 + r)^2} = \frac{R_2}{(R_2 + r)^2}.$$

Тогда 
$$\frac{R_2 + r}{R_1 + r} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}.$$

Отсюда определяем внутреннее сопротивление

$$R_2 + r = R_1 + r \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \text{ и } r = \frac{R_2 - R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} - 1}.$$

Подставим числовые значения  $r = \frac{4 - 1 \cdot 2}{2 - 1} = 2 \text{ (Ом)}.$

Ответ:  $r = 2 \text{ Ом}.$

Два источника ( $\mathcal{E}_1 = 8\text{В}$ ,  $r_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 6\text{В}$ ,  $r_2 = 1,5 \text{ Ом}$ ) и резистор сопротивлением  $R = 10 \text{ Ом}$  соединены, как показано на рис. Вычислите силу тока  $I_1$ , текущую через источник с ЭДС  $\mathcal{E}_1$ .

Дано

$$\mathcal{E}_1 = 8\text{В},$$

$$\mathcal{E}_2 = 6\text{В},$$

$$r_1 = 2\text{ Ом},$$

$$r_2 = 1,5\text{ Ом},$$

$$R = 10\text{ Ом}.$$

$$I_1 - ?$$

Решение

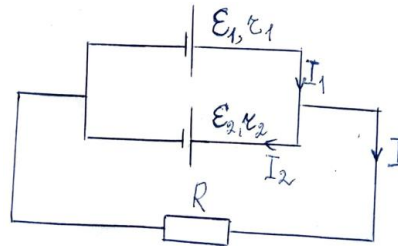


Рис.

Выберем направления токов на отдельных участках цепи (рис.) и запишем для узла А уравнение по первому правилу Кирхгофа:

$$I_1 - I_2 - I = 0. \quad (1)$$

Далее рассмотрим два замкнутых контура, которые будем обходить по часовой стрелке. По второму правилу Кирхгофа запишем для них уравнения:

$$I_1 r_1 + IR = \mathcal{E}_1, \quad (2)$$

$$-I_2 r_2 + IR = -\mathcal{E}_2, \quad (3)$$

Решая систему уравнений (1)-(3), получим выражение для силы тока, текущего через источник с ЭДС  $\mathcal{E}_1$ :

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1(R + r_2) + \mathcal{E}_2 R}{Rr_1 + Rr_2 + r_1 r_2} = 4\text{А},$$

Ответ:  $I_1 = 4\text{А}.$

## 2.11. Практическая работа № 11 «Законы Био-Савара-Лапласа и Ампера»

**Задание:**

1. Два прямолинейных длинных проводника расположены параллельно на расстоянии 10 см друг от друга. По проводникам текут токи  $I_1 = I_2 = 5\text{ А}$  в противоположных направлениях. Найти величину и направление напряженности магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от каждого проводника.
2. Ток в 20 А идет по длинному проводнику, согнутому под прямым углом. Найти напряженность магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии 10 см.
3. Найти напряженность магнитного поля на оси кругового контура на расстоянии 3 см от его плоскости. Радиус контура 4 см, сила тока в контуре 2 А.
4. Напряженность магнитного поля в центре кругового витка радиусом 11 см равна 0,8 э. Найти напряженность магнитного поля на оси витка на расстоянии 10 см от его плоскости.
5. Два круговых витка радиусом 4 см каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии 0,1 м друг от друга. По виткам текут токи  $I_1 = I_2 = 2\text{ А}$ . Найти напряженность магнитного поля на оси витков в точке, находящейся на равном расстоянии от них. Задачу решить для случаев: 1) токи в витках текут в одном направлении, 2) токи текут в противоположных направлениях.
6. Прямой провод длиной  $l = 10\text{ см}$ , по которому течет ток  $I = 20\text{ А}$ , находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,01\text{ Тл}$ . Найти угол  $\alpha$  между направлениями вектора  $B$  и тока, если на провод действует сила  $F = 10^{-2}\text{ Н}$ .
7. Двухпроводная линия состоит из длинных параллельных прямых проводов, находящихся на расстоянии  $d = 4\text{ мм}$  друг от друга. По проводам текут одинаковые токи  $I = 50\text{ А}$ . Определить силу взаимодействия токов, приходящуюся на единицу длины провода.

8. Шины генератора представляют собой две параллельные медные полосы длиной  $l = 2$  м каждая, отстоящие друг от друга на расстоянии  $d = 20$  см. Определить силу  $F$  взаимного отталкивания шин в случае короткого замыкания, когда по ним течет ток  $I = 10$  кА.

### Пример решения и оформления заданий

Пример 1. По квадратной рамке со стороной 0,2 м течет ток 4 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре рамки.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Дано<br>$I = 2$ А,<br>$a = 0,2$ м. |  |
| $H, B$ - ?                         |  |

### Решение

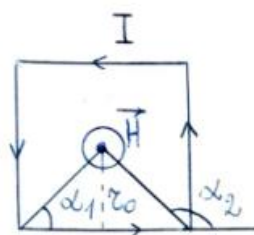


Рис.

Магнитное поле в центре рамки (рис.) создается каждой из его сторон и направлено в одну сторону нормально к плоскости рамки. Следовательно,

$$H = 4 \cdot H_1,$$

где  $H_1$  – напряженность поля, создаваемого отрезком проводника с током  $I$  длиной  $a$ , которая определяется по формуле

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где  $r = \frac{a}{2}$  – расстояние от проводника до точки поля. По условию данной задачи  $\alpha_1 = 45^\circ$ ;

$$\alpha_2 = 135^\circ.$$

Тогда,

$$H = 4 \cdot \frac{I \cdot 2}{4\pi a} (\cos 45^\circ - \cos 135^\circ); H = \frac{4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 2\sqrt{2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 2} \cong 18 \text{ (А/м)}.$$

Индукция поля  $B$  и напряженность  $H$  связаны соотношением  $B = \mu\mu_0 H$ :

$$B = 1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 18 \cong 2,26 \cdot 10^{-5} \text{ (Тл)}.$$

Ответ:  $B \cong 2,26 \cdot 10^{-5}$  Тл.

**Пример 2.** Два параллельных проводника с одинаковыми по силе токами находятся на расстоянии 8,7 см друг от друга и притягиваются с силой  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Н. Определить силу тока в проводниках, если длина каждого из них 320 см, а токи направлены в одну сторону.

|                                                                                                        |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Дано<br>$r = 8,7$ см = $8,7 \cdot 10^{-2}$ м,<br>$F = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Н,<br>$l = 320$ см = $3,2$ м. |  |
| $I$ - ?                                                                                                |  |

### Решение

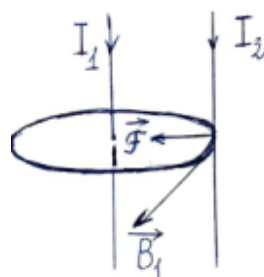


Рис.

Так как по условию задачи  $r \ll l$ , то провода можно считать бесконечно длинными. Поэтому индукцию  $B_1$  магнитного поля, созданного проводником с током силой  $I_1$  (рис.), найдем по формуле

$$B_1 = \mu\mu_0 I_1 / (2\pi r). \quad (1)$$

По закону Ампера, на проводник с током  $I_2$  действует сила Ампера  $F_2 = I_2 B_1 l$ , или с учетом выражения (1)

$$F_2 = I_2 \mu\mu_0 I_1 l / (2\pi r).$$

Так как  $I_1 = I_2 = I$ , то

$$F_2 = \mu\mu_0 I^2 l / (2\pi r),$$

откуда

$$I = \sqrt{\frac{2\pi r F_2}{\mu\mu_0 l}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 3,2}} = 58 \text{ (А)}.$$

Ответ:  $I = 58 \text{ А}$ .

## 2.12. Практическая работа № 12

«Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле»

### Задание:

1. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $U = 600 \text{ В}$ , влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,3 \text{ Тл}$  и начал двигаться по окружности. Вычислить ее радиус  $R$ .
2. Заряженная частица с энергией  $T = 1 \text{ кэВ}$  движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 1 \text{ мм}$ . Найти силу  $F$ , действующую на частицу со стороны поля.
3. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$  перпендикулярно линиям индукции. Определить силу  $F$ , действующую на электрон со стороны поля, если радиус  $R$  кривизны траектории равен  $0,5 \text{ см}$ .
4. Электрон движется в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 4 \text{ кА/м}$  со скоростью  $v = 10^7 \text{ м/с}$ . Вектор скорости направлен перпендикулярно линиям напряженности. Найти силу  $F$ , с которой поле действует на электрон, и радиус  $R$  окружности, по которой он движется.
5. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 10 \text{ кА/м}$ . Вычислить период  $T$  вращения электрона.

### Пример решения и оформления заданий

**Пример 1.** Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $88 \text{ кВ}$ , влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Индукция поля равна  $0,01 \text{ Тл}$ . Определить радиус траектории электрона.

**Дано**

$$U = 88 \text{ кВ},$$

$$B = 0,01 \text{ Тл},$$

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

$R - ?$

**Решение**

В магнитном поле с индукцией  $B$  на электрон, движущийся со скоростью  $v$  перпендикулярно  $B$ , действует сила Лоренца

$$F_L = qvB,$$

которая обуславливает центростремительное ускорение электрона при его движении по окружности:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}. \quad (1)$$

Пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U$ , электрон приобретает кинетическую энергию  $\frac{mv^2}{2}$ , равную работе сил электрического поля

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

Отсюда находим скорость электрона:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (2)$$

Из уравнения (1) с учетом (2) найдем радиус траектории:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{e}} = \frac{1}{10^{-2}} \sqrt{\frac{2 \cdot 88 \cdot 10^3 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 0,1 \text{ (м)}.$$

Ответ:  $R = 0,1 \text{ м}$ .

**Пример 2.** Электрон движется в магнитном поле, индукция которого  $2 \text{ мТл}$ , по винтовой линии радиусом  $2 \text{ см}$  и шагом винта  $5 \text{ см}$ . Определить скорость электрона.

**Дано**

$$R = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$h = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$B = 2 \text{ мТл} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

$v - ?$

**Решение**

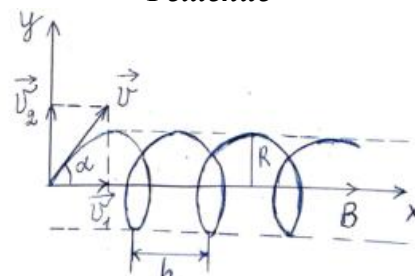


Рис.

Движение электрона по винтовой линии можно представить как движение по окружности со скоростью  $v_y$  под действием силы Лоренца в плоскости, перпендикулярной индукции поля, и равномерное движение вдоль поля со скоростью  $v_x$  (рис.). Тогда полную скорость электрона можно определить по формуле

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (1)$$

Найдем отдельно скорости  $v_y$  и  $v_x$ . Запишем для электрона уравнение второго закона Ньютона в скалярной форме относительно оси  $Y$ :

$$F = ma_y,$$

где  $F = eBv_y$  – сила Лоренца, которая сообщает электрону центростремительное ускорение  $a_y = v_y^2 / R$ .

Тогда  $eBv_y = mv_y^2 / R$ , откуда

$$v_y = eBR / m. \quad (2)$$

Скорость  $v_x$  может быть найдена из соотношения  $h = v_x T$ , откуда

$$v_x = h / T, \quad (3)$$

Где  $T$  – время, в течение которого электрон продвинется по горизонтальному направлению на один шаг винта. С другой стороны,  $T$  равно времени, в течение которого электрон пройдет со скоростью  $v_y$  расстояние, равное длине окружности, т.е.  $T = 2\pi R / v_y$ , или с учетом выражения (2)

$$T = 2\pi R m / (eBR) = 2\pi m / (eB). \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), получаем

$$v_x = \frac{h}{T} = \frac{heB}{2\pi m}. \quad (5)$$

Подставив выражения (2) и (5) в (1), найдем

$$v = \sqrt{\frac{h^2 e^2 B^2}{4\pi^2 m^2} + \frac{e^2 B^2 R^2}{m^2}} = \frac{eB}{2\pi m} \sqrt{h^2 + 4\pi^2 R^2};$$

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \sqrt{(5 \cdot 10^{-2})^2 + 4 \cdot 3,14^2 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2} \approx 7,6 \cdot 10^6 \text{ (м/с)}.$$

Ответ:  $v \approx 7,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ .

**Пример 3.** Момент импульса протона в однородном магнитном поле напряженностью 20 кА/м равен  $6,6 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ . Найти кинетическую энергию протона, если он движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля.

| Дано                                                           | Решение                                                 |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $H = 2 \cdot 10^4 \text{ А/м},$                                | Кинетическая энергия равна                              |
| $L = 6,6 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с},$ | $E = \frac{mv^2}{2}.$                                   |
| $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$                          | Протон движется по окружности радиуса $r$ под действием |
| $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$                           | силы Лоренца                                            |
| $W_k - ?$                                                      | $F_{\text{Л}} = qvB,$                                   |

которая численно равна центростремительной силе  $F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R}$ .

Итак, 
$$F_{\text{л}} = \frac{mv^2}{R} = qvB.$$

До множив левую и правую части на  $\frac{1}{2}$ , получим

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{qvBR}{2} = W_k.$$

Из уравнения для момента импульса

$$L = m\upsilon R$$

выразим  $\upsilon R$ :

$$\upsilon R = \frac{L}{m}.$$

Подставляя  $\upsilon R$  в уравнение для энергии, получим:

$$W_k = \frac{qBL}{2m} = \frac{q\mu\mu_0 H L}{2m}.$$

Таким образом,

$$W_k = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 6,6 \cdot 10^{-23}}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} \cong 8 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 500 \text{ эВ}.$$

Ответ:  $W_k = 500 \text{ эВ}.$

## 2.15. Практическая работа № 15

«Закон Фарадея. Явления самоиндукции и взаимной индукции»

### Задание:

1. Проволочный виток радиусом  $R = 5$  см находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 2$  кА/м. Плоскость витка образует угол  $\alpha = 60^\circ$  с направлением поля. По витку течет ток силой  $I = 4$  А. Найти механический момент, действующий на виток.
2. Соленоид длиной  $l = 1$  м и сечением  $S = 16$  см<sup>2</sup> содержит  $N = 2000$  витков. Вычислите потокоцепление при силе тока в обмотке  $I = 10$  А.
3. Поток магнитной индукции через площадь поперечного сечения соленоида (без сердечника) равен  $\Phi = 2$  мкВб. Длина соленоида  $l = 12,5$  см. Определить магнитный момент  $p_m$  этого соленоида.
4. Скорость самолета с реактивным двигателем  $V = 950$  км/ч. Найти ЭДС индукции  $\varepsilon$ , возникающую между концами крыльев, если вертикальная составляющая магнитного поля земли  $H_g = 39,8$  А/м и размах крыльев самолета равен  $l = 12,5$  м.
5. В магнитном поле, индукция которого  $B = 0,05$  Тл вращается стержень длиной  $l = 1$  с угловой скоростью  $\omega = 20$  рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Определить ЭДС индукции  $\varepsilon$ , возникающую на концах стержня.
6. Соленоид диаметром  $d = 4$  см, имеющий  $N = 500$  витков, помещен в магнитное поле, индукция которого изменяется со скоростью  $1$  мТл/с. Ось соленоида составляет с вектором магнитной индукции угол  $\alpha = 45^\circ$ . Определить ЭДС индукции  $\varepsilon$ , возникающей в соленоиде.
7. В магнитное поле, изменяющееся по закону  $B = B_0 \cos \alpha t$  ( $B_0 = 0,1$  Тл,  $\alpha = 4$  с<sup>-1</sup>), помещена квадратная рамка со стороной  $a = 50$  см, причем нормаль к рамке образует с направлением поля угол  $\alpha = 45^\circ$ . Определить ЭДС индукции  $\varepsilon$ , возникающую в рамке в момент времени  $t = 5$  с.

### Пример решения и оформления заданий

**Пример 1.** В однородном магнитном поле, индукция которого 0,25 Тл, находится плоская катушка радиусом 25 см, содержащая 75 витков. Плоскость катушки составляет угол  $60^\circ$  с направлением вектора индукции. Определить вращающий момент, действующий на катушку в магнитном поле, если по виткам течет ток силой 3 А. Какую работу надо совершить, чтобы удалить катушку из магнитного поля?

|                                                                                                                                                                 |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Дано</b><br>$B = 0,25$ Тл,<br>$R = 25$ см = 0,25 м,<br>$N = 75$ ,<br>$\varphi = 60^\circ = \pi/3$ рад,<br>$I = 3$ А.<br><hr/> $M = ?$<br>$A_{\text{вн}} = ?$ |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

#### Решение

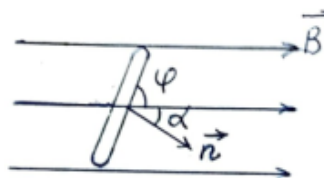


Рис.

На катушку, содержащую  $N$  витков, со стороны магнитного поля действует вращающий момент

$$M = Np_m B \sin \alpha \quad (1)$$

Учитывая, что  $p_m = IS$ ,  $S = \pi R^2$  и  $\alpha = \pi/2 - \varphi$  (рис.), преобразуем выражение (1):

$$M = NI\pi R^2 B \sin(\pi/2 - \varphi) = NI\pi R^2 B \cos \varphi;$$

$$M = 75 \cdot 3 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cos(\pi/3) = 5,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Работа магнитного поля при удалении из него катушки

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1).$$

Иначе, чтобы удалить катушку из поля, к ней надо приложить внешнюю, например механическую, силу, которая совершит при этом работу

$$A_{\text{вн}} = -A = I(\Phi_1 - \Phi_2). \quad (2)$$

Здесь  $\Phi_1 = NBS \cos \alpha$ ;  $\Phi_2 = 0$ , так как  $B_2 = 0$ .

Подставляя эти выражения в формулу (2) и учитывая, что  $S = \pi R^2$ , получаем

$$A_{\text{вн}} = INB\pi R^2 \sin(\pi/2 - \varphi) = INB\pi R^2 \sin \varphi;$$

$$A_{\text{вн}} = 3 \cdot 75 \cdot 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \sin(\pi/3) = 8,6 \text{ Дж}.$$

**Ответ:**  $M = 5,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $A_{\text{вн}} = 8,6 \text{ Дж}$ .

**Пример 2.** В однородном магнитном поле, индукция которого 1 Тл, движется равномерно прямой проводник длиной 20 см, по которому течет ток силой 2 А. Скорость проводника равна 15 см/с и направлена перпендикулярно вектору индукции. Найти работу перемещения проводника за 5 с.

|                                                                                                                              |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Дано</b><br>$B = 1$ Тл,<br>$l = 20$ см = 0,2 м,<br>$I = 2$ А,<br>$v = 15$ см/с = 0,15 м/с,<br>$t = 5$ с.<br><hr/> $A = ?$ |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

#### Решение

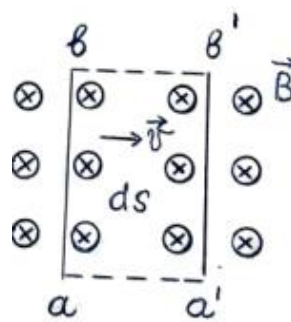


Рис.

По определению, полная работа по перемещению проводника в магнитном поле

$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} I d\Phi, \quad (1)$$

где  $d\Phi = B dS$  – магнитный поток сквозь площадку  $dS$ , который пересекает проводник при своем движении за промежуток времени  $dt$  (рис.).

Из рисунка видно, что  $dS$  – площадь параллелограмма  $abb'a'$  со сторонами  $ab = l$  и  $aa' = v dt$ . Следовательно,  $dS = l v dt$ , тогда

$$d\Phi = B l v dt. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в подынтегральное выражение (1) и производя операцию интегрирования, получаем

$$A = \int_0^t I B l v dt = I B l v \int_0^t dt = I B l v t;$$

Итак,  $A = 2 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 5 = 0,3 \text{ (Дж)}$ .

Ответ:  $A = 0,3 \text{ Дж}$ .

## 2.1. Практическая работа №1

### «Магнитное поле в веществе. Электромагнитные колебания»

#### Задание:

1. По обмотке электромагнита, сопротивление которого  $R = 10 \text{ Ом}$  и индуктивность  $L = 2 \text{ Гн}$ , течет постоянный электрический ток  $I = 2 \text{ А}$ . Определить энергию магнитного поля  $W$  электромагнита через  $t = 0,1 \text{ с}$  после отключения источника.
2. Соленоид индуктивностью  $L = 4 \text{ мГн}$  содержит  $N = 600$  витков. Определить магнитный поток  $\Phi$ , если сила тока, протекающего по обмотке, равна  $I = 12 \text{ А}$ .
3. В цепи шел ток силой  $I_0 = 50 \text{ А}$ . Источник тока можно отключить от цепи, не разрывая ее. Определить силу тока  $I$  в этой цепи через  $t = 0,01 \text{ с}$  после отключения ее от источника тока. Сопротивление цепи  $R = 20 \text{ Ом}$ , ее индуктивность  $L = 0,1 \text{ Гн}$ .
4. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением  $R = 10 \text{ Ом}$  и индуктивностью  $L = 1 \text{ Гн}$ . Через какое время  $t$  сила тока достигнет  $0,9$  предельного значения  $I = 0,9 I_0$ .
5. Цепь состоит из катушки индуктивностью  $L = 1 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $R = 10 \text{ Ом}$ . Источник тока можно отключать, не разрывая цепи. Определить время  $t$ , по истечении которого сила тока уменьшится до  $0,001$  первоначального значения.
6. Проволочный виток радиусом  $R = 4 \text{ см}$  и сопротивлением  $r = 0,01 \text{ Ом}$  находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,2 \text{ Тл}$ ). Плоскость витка составляет угол  $\beta = 30^\circ$  с линиями индукции. Какое количество электричества протечет по витку при выключении магнитного поля?

#### Пример решения и оформления заданий

**Пример 1.** Прямоугольная рамка площадью  $500 \text{ см}^2$ , состоящая из 200 витков провода, равномерно вращается в однородном магнитном поле вокруг оси, проходящей через ее центр параллельно одной из ее сторон (рис.), с частотой  $10 \text{ с}^{-1}$ . При этом в рамке индуцируется э.д.с., максимальное значение которой 150 В. Найти индукцию магнитного поля.

**Дано**

$$S = 500 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2,$$

$$N = 200,$$

$$\nu = 10 \text{ с}^{-1},$$

$$\mathcal{E}_{\text{макс}} = 150 \text{ В}.$$

$B - ?$

**Решение**

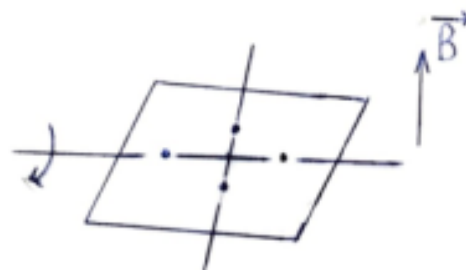


Рис.

По закону Фарадея, в рамке, состоящей из  $N$  витков, вращающейся в магнитном поле, возникает э.д.с. индукции

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где  $\Phi = BS \cos \omega t$  и  $\omega = 2\pi\nu$ .

Подставляя эти выражения в формулу (1) и производя операцию дифференцирования, получаем

$$\mathcal{E} = -N \frac{d}{dt} (BS \cos 2\pi\nu t) = NBS 2\pi\nu \sin 2\pi\nu t.$$

Э.д.с. индукции будет максимальна в моменты времени, когда  $2\pi\nu t = 1$ :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{макс}} = NBS 2\pi\nu,$$

откуда

$$B = \frac{\mathcal{E}_{\text{макс}}}{NS 2\pi\nu} = \frac{150}{200 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10} = 0,24 \text{ Тл}.$$

Ответ:  $B = 0,24 \text{ Тл}$ .

**Пример 2.** Алюминиевое кольцо расположено в магнитном поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. Диаметр кольца 25 см, толщина провода кольца 2 мм. Определить скорость изменения магнитной индукции поля со временем, если при этом в кольце возникает индукционный ток силой 12 А.

**Дано**

$$D = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м},$$

$$d = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$I = 12 \text{ А},$$

$$\rho = 0,26 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$\Delta B / \Delta t - ?$

**Решение**

По закону Фарадея ЭДС индукции, возникающая в кольце

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Здесь  $\Phi = BS$  – магнитный поток

сквозь поверхность, ограниченную кольцом. Поскольку площадь  $S$  поверхности постоянная, можно написать

$$\Delta\Phi = \Delta(BS) = S\Delta B \text{ и } \mathcal{E} = -S \frac{\Delta B}{\Delta t}, \quad (1)$$

откуда  $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{\mathcal{E}}{S}$ . Поскольку поверхность, ограниченная кольцом, – круг, ее площадь

$$S = \pi D^2 / 4. \quad (2)$$

По закону Ома для замкнутой цепи,

$$\mathcal{E} = IR,$$

где  $R = \rho l / S_{np}$  – сопротивление кольца,  $\rho$  – удельное сопротивление алюминия.

Так как длина кольца  $l = \pi D$ , а площадь сечения провода кольца  $S_{np} = \pi d^2 / 4$ , то выражение для сопротивления кольца можно записать в виде  $R = 4\rho D / d^2$ . Тогда ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = 4\rho DI / d^2. \quad (3)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в (1), получаем

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{16\rho I}{\pi D d^2};$$

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{16 \cdot 12 \cdot 0,26 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = 1,6 \text{ Тл/с}.$$

Ответ:  $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 1,6 \text{ Тл/с}.$

**Пример 3.** Перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией 0,3 Тл движется проводник длиной 15 см со скоростью 10 м/с. Направление нормали к проводнику и скорости совпадают. Определить ЭДС, индуцируемую в проводнике.

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Дано</b>           |  |
| $l = 0,15 \text{ м},$ |  |
| $B = 0,3 \text{ Тл},$ |  |
| $v = 10 \text{ м/с}.$ |  |
| $\mathcal{E}_i - ?$   |  |

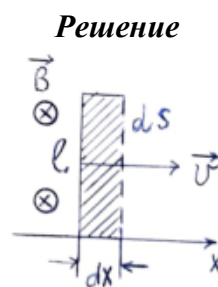


Рис.

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ :

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнитный поток  $\Phi = BS$ , где  $S$  – площадь, которую пронизывает магнитное поле с индукцией  $B$  (рис.). Элементарный магнитный поток  $d\Phi = BdS = Bldx$ . Тогда

$$\mathcal{E}_i = -Bl \frac{dx}{dt} = -Blv = -0,3 \cdot 0,15 \cdot 10 = -0,45 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $\mathcal{E}_i = -0,45 \text{ В}$ .

**Пример 4.** Стержень длиной 1 м вращается в однородном магнитном поле с постоянной угловой скоростью  $\omega = 30 \text{ рад/с}$ . Ось вращения стержня параллельна магнитным силовым линиям поля и проходит через его конец. Определите ЭДС индукции, возникшую на концах стержня, если индукция магнитного поля  $B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ .

Дано  
 $l = 1 \text{ м}$ ,  
 $\omega = 30 \text{ рад/с}$ ,  
 $B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ .  


---

 $\mathcal{E} = ?$

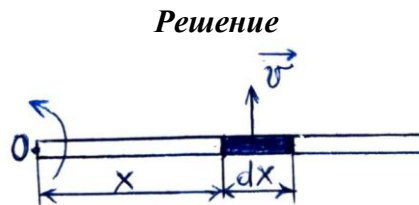


Рис.

При вращении стержня в любом его бесконечно малом участке  $dx$  (рис.), взятом на расстоянии  $x$  от оси вращения  $O$ , возникает элементарная ЭДС индукции:

$$d\mathcal{E} = -Bvdx,$$

где  $v$  – линейная скорость участка  $dx$ . Поскольку  $v = \omega x$ , то  $d\mathcal{E} = -B\omega x dx$ .

Интегрируя полученное выражение по длине стержня (от 0 до  $l$ ), найдем ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = -\int_0^l B\omega x dx = -\frac{1}{2} B\omega l^2 = -0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 1 = -0,3 \text{ (В)}.$$

Знак минус определяет направление ЭДС индукции.

Ответ:  $\mathcal{E} = -0,3 \text{ В}$ .

**Пример 5.** Соленоид с сердечником ( $\mu = 1000$ ) 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.

Дано  
 $l = 0,15 \text{ м}$ ,  
 $D = 0,04 \text{ м}$ ,  
 $n = 10^4 \text{ м}^{-1}$ ,  
 $\mu = 1000$ ,  
 $\Delta I = 10^{-2} \text{ А}$ ,  
 $\Delta t = 10^{-3} \text{ с}$ .  


---

 $\mathcal{E}_c = ?$

**Решение**

При изменении силы тока в цепи возникает ЭДС самоиндукции, равная:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt} \text{ или } \mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Индуктивность соленоида вычисляется по формуле:

$$L = \mu \mu_0 n^2 l S,$$

где  $n$  – число витков, приходящееся на единицу

длины,  $l$  – длина, а  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  – площадь сечения соленоида.

Проведем расчеты:

$$L = 10^3 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 10^8 \cdot 0,15 \cdot 3,14 \cdot 0,04^2 \cdot 0,25 \cong 24 \text{ (Гн)}.$$

$$\mathcal{E}_c = -24 \cdot \frac{10^{-2}}{10^{-3}} \cong -240 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $\mathcal{E}_c \cong -240 \text{ В}$ .

**Пример 6.** Соленоид диаметром 10 см и длиной 60 см имеет 1000 витков. Сила тока в нем равномерно возрастает на 0,2 А за 1 с. На соленоид надето кольцо из медной проволоки, имеющей площадь поперечного сечения  $2 \text{ мм}^2$ . Найти силу индукционного тока, возникающего в кольце.

**Дано**

$$D = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м},$$

$$l = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м},$$

$$N = 10^3,$$

$$\Delta I / \Delta t = 0,2 \text{ А/с},$$

$$S_{np} = 2 \text{ мм}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$$I_k - ?$$

**Решение**

При изменении силы тока в соленоиде возникает ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где  $L = \mu\mu_0 n^2 l S$  – индуктивность соленоида.

$$\text{Поскольку } n = N/l \text{ и } S = \frac{\pi D^2}{4},$$

выражение для индуктивности соленоида можно записать в виде

$$L = \mu\mu_0 \pi D^2 N^2 / (4l),$$

тогда

$$\mathcal{E}_c = - \frac{\mu\mu_0 \pi D^2 N^2}{4l} \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС индукции  $\mathcal{E}_k$ , возникающая в одном кольце, в  $N$  раз меньше, чем найденное выше значение ЭДС самоиндукции в соленоиде, состоящем из  $N$  витков, т.е.

$$\mathcal{E}_k = \frac{\mathcal{E}}{N} = - \frac{\mu\mu_0 \pi D^2 N^2}{4l} \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (1)$$

По закону Ома для замкнутой цепи, сила индукционного тока в кольце

$$I_k = \frac{|\mathcal{E}_k|}{R_k},$$

где  $R_k = \rho \cdot l_k / S_{np}$  – сопротивление кольца,  $\rho$  – удельное сопротивление меди,  $l_k$  – длина кольца,  $S_{np}$  – площадь поперечного сечения проволоки.

Так как  $l_k = \pi D$ , то выражение для  $R_k$  запишется в виде

$$R_k = \frac{\rho \pi D}{S_{np}}.$$

Тогда сила тока в кольце

$$I_k = \frac{|\mathcal{E}_k| S_{np}}{\rho \pi D},$$

или с учетом выражения (1)

$$I_k = \frac{\mu\mu_0 D N S_{np}}{4l \rho} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\text{Итак, } I_k = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,2 = 1,23_{(\text{мА})}.$$

Ответ:  $I_k = 1,23 \text{ мА}$ .

### 3. Рекомендуемая учебная литература и иные материалы

1. Фиргант Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. Учебное пособие. 4-е изд. Допущено НМС. СПб.: Лань, 2009, 352с..
2. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. Учебное пособие. Допущено НМС по физике Министерства образования и науки РФ - СПб. Лань, 2013 - 288 с.
3. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: Учеб. пособие для втузов. – 8-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2008. – 640 с.
4. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. Изд. доп. и перераб. – СПб.: СпецЛит, 2002. – 327 с.
5. Грушина Л.П. Грушин И.Т. Механика. Решение задач. Учебное пособие. Рекомендовано Ученым советом НГТУ - Н.Новгород: НГТУ, 2015 - 136 с.