Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.В. ЧИЧЕРИНА, М.Г. РУБАНОВИЧ

# ФИЗИКА

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2020

УДК 537.6/.8(075.8)
Ч-722

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *Л.А. Борыняк*
канд. техн. наук, доцент *Н.И. Филимонова*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

**Чичерина Н.В.**
Ч-722 Физика. Электричество и магнетизм: учебное пособие / Н.В. Чичерина, М.Г. Рубанович. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 144 с.

ISBN 978-5-7782-4105-3

Учебное пособие «Физика. Электричество и магнетизм» предназначено для студентов факультета автоматики и вычислительной техники, обучающихся по образовательной программе 09.03.03 «Прикладная информатика» (профиль: «Прикладная информатика в экономике»), однако оно может быть полезно и для студентов других направлений подготовки, учебные планы которых предполагают изучение данных разделов физики.

**УДК 537.6/.8(075.8)**

**ISBN 978-5-7782-4105-3**

# ВВЕДЕНИЕ

Физика – наука о Природе: о строении, свойствах и взаимодействии составляющих ее тел и полей. Она занимает центральное место среди других естественных наук, являясь их базисом. Физика – основа для развития техники, оказывающая ключевое влияние на формирование научного мировоззрения.

Учебное пособие «Электричество и магнетизм» предназначено для студентов факультета автоматики и вычислительной техники, обучающихся по образовательной программе 09.03.03 «Прикладная информатика» (профиль: «Прикладная информатика в экономике»), однако оно может быть полезно и для студентов других направлений подготовки, учебные планы которых предполагают изучение данных разделов физики.

В соответствии с учебным планом образовательной программы 09.03.03 изучение физики предусмотрено во втором учебном семестре. Согласно рабочей программе для изучения физики в данном курсе выбраны электрические и магнитные явления.

Ниже приводится выдержка из рабочей программы с указанием видов учебной деятельности, предусмотренных при изучении данного курса.

| № | Вид деятельности | |
|---|---|---|
| 1 | Всего зачетных единиц (кредитов) | 3 |
| 2 | Всего часов | 108 |
| 3 | Всего занятий в контактной форме, ч | 61 |
| 4 | Лекции, ч | 36 |
| 5 | Практические занятия, ч | 18 |
| 6 | Лабораторные занятия, ч | 0 |
| 7 | Из них в активной и интерактивной форме, ч | 20 |
| 8 | Аттестация, ч | 2 |

Окончание таблицы

| № | Вид деятельности | |
|---|---|---|
| 9 | Консультации, ч | 5 |
| 10 | Самостоятельная работа, ч | 47 |
| 11 | Вид самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе) | РГЗ |
| 12 | Вид аттестации | З |

Основная цель, которую ставили авторы при написании данного учебного пособия, – совместить в одной работе весь учебный материал, необходимый студентам при изучении курса физики.

*Пособие содержит*:

– краткий теоретический материал с изложением основ теории и примеров решения задач;

– материал для семинарских занятий, включающий вопросы для подготовки к занятию, задачи, выносимые для решения на занятии, и вопросы для тестового самоконтроля знаний;

– материал к расчетно-графическому заданию по физике с указанием требований к оформлению и решению задач;

– образец зачетного теста для итогового контроля знаний по предмету.

В заключение хотелось бы сделать небольшое замечание для студентов, изучающих данный курс. Для полноценного усвоения курса «Физика» невозможно ограничиться только этим пособием. От вас потребуется самостоятельная работа с лекционным материалом по предмету, а также с другими источниками, список которых приведен в разделе «Рекомендуемая литература».

# 1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ С ПРИМЕРАМИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

## 1.1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

*Электростатика* – учение о свойствах и взаимодействии электрических зарядов, неподвижных относительно избранной для их изучения инерциальной системы отсчета.

*Электрический заряд* – свойство тел или частиц, являющееся количественной мерой их способности к электромагнитным взаимодействиям.

В системе СИ электрический заряд измеряется в *кулонах*: 1 Кл = = 1 А· 1 с (кулон является производной единицей системы СИ, так как определяется через единицу силы тока).

*Фундаментальные свойства электрических зарядов*

1. В природе существует два вида электрических зарядов – условно называемые *положительными и отрицательными*.

2. Электрический заряд *аддитивен*, т. е. заряд системы тел равен алгебраической (скалярной) сумме зарядов тел, входящих в систему.

3. В замкнутой (изолированной) системе тел (системе, не обменивающейся зарядами с внешними телами) выполняется *закон сохранения электрического заряда* (1843 г., М. Фарадей): *алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы тел остается неизменной при любых процессах и явлениях, протекающих внутри данной системы*: $\Sigma q_i = \text{const}$ .

4. Электрический заряд дискретен (иными словами, электрический заряд квантуется), т. е. заряд любого тела кратен целому числу *элементарных электрических зарядов е*: $q = Z|e|$ или $q = \pm N|e|$; $|e|$ – минимальная порция электричества, свободно существующая в природе (квант электричества). Элементарными электрическими зарядами,

равными по величине и противоположными по знаку, обладают электрон (–) и протон (+). $|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

5. Электрический заряд *релятивистски инвариантен* (его величина не зависит от выбора системы отсчета, т. е. не зависит от скорости движения заряда, от того движется он или покоится).

6. Электрические заряды *взаимодействуют* следующим образом (рис. 1): одноименные заряды отталкиваются, разноименные заряды притягиваются. Взаимодействие зависит от величин зарядов и расстояний между ними.

*Рис. 1*

Электрические заряды всегда есть в любом теле. В веществе они могут находиться в свободном и связанном состоянии. *Свободными зарядами* называются такие заряды, которые могут перемещаться на макроскопические расстояния (в пределах всего вещества) под действием сколь угодно малой силы. *Связанные заряды* – это такие заряды, которые могут перемещаться только на микроскопические расстояния (в пределах атомов и молекул). В зависимости от концентрации свободных зарядов все вещества делятся на проводники, диэлектрики (изоляторы) и полупроводники.

*Проводниками* называется класс веществ, в которых высока концентрация свободных носителей заряда. Используя проводники, можно отвести заряды с поверхности заряженного тела. Проводники делятся на два класса: 1) *проводники первого рода* (металлы) – перемещение зарядов в них не сопровождается переносом вещества (химическими превращениями); 2) *проводники второго рода* (например, электролиты) – перемещение зарядов в них сопровождается переносом вещества и ведет к химическим превращениям.

*Диэлектриками или изоляторами* (например, стекло, пластмассы, бумага, резина и т. д., все непременно сухое) называется класс веществ, в которых практически отсутствуют свободные заряды, заряды диэлектрика преимущественно находятся в связанном состоянии. С помощью изоляторов отвести заряды с поверхности заряженного тела невозможно.

*Полупроводниками* (например, германий, кремний) называется класс веществ, занимающих промежуточное положение между проводниками и диэлектриками по своим электропроводящим свойствам. Важной отличительной особенностью полупроводников является то, что концентрация свободных носителей заряда зависит от внешних воздействий (например, нагревания, освещения).

Указанное деление на проводники, диэлектрики и полупроводники является весьма условным, однако большое различие в концентрации свободных зарядов приводит к существенным качественным различиям в их поведении, о которых мы еще будем говорить в дальнейшем.

*Электризация* – процесс, в результате которого тело приобретает электрический заряд. Все вещества в обычном состоянии *электрически нейтральны*, т. е. содержат равные количества положительных и отрицательных зарядов. Как правило, при электризации тело получает электрический заряд, приобретая или теряя электроны. Когда нейтральное тело получает электроны от какого-либо внешнего источника, оно приобретает отрицательный заряд. Таким образом, тело является *заряженным отрицательно*, если обладает избыточным, по сравнению с нормальным, числом электронов. Когда нейтральное тело теряет электроны, оно приобретает положительный заряд. Следовательно, тело является *заряженным положительно*, если оно имеет недостаток электронов.

**Точечный заряд** – это заряженное тело, размером которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других заряженных тел.

*Закон Кулона* (*1785 г.*)

Французский инженер Шарль Огюст Кулон (1736–1806) при помощи крутильных весов установил, что сила взаимодействия точечных зарядов пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Математическая запись закона Кулона в скалярном виде имеет вид

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{R^2},$$

где $k$ – коэффициент, зависящий от свойств среды, в которой осуществляется взаимодействие.

Для вакуума

$$k_0 = 9\cdot 10^9 \ \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}, \ k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$ – электрическая постоянная, относящаяся к числу фундаментальных физических констант.

В любой другой среде

$$k = \frac{k_0}{\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая, во сколько раз электрические взаимодействия в данной среде слабее, чем в вакууме.

**Замечание**: при решении задач, в которых не указана диэлектрическая проницаемость среды, а также для воздуха следует принимать $\varepsilon = 1$.

С учетом сказанного выше закон Кулона приобретает вид

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{|q_1||q_2|}{r^2}.$$

В векторной форме закон Кулона записывается в виде (рис. 2)

$$\boldsymbol{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^{\ 3}}\boldsymbol{r}_{12},$$

где $\boldsymbol{F}_{12}$ – сила, действующая на заряд $q_2$ со стороны заряда $q_1$; $\boldsymbol{r}_{12}$ – радиус-вектор, определяющий положение заряда $q_2$ в системе отсчета заряда $q_1$:

$$\boldsymbol{F}_{12} = -\boldsymbol{F}_{21}$$

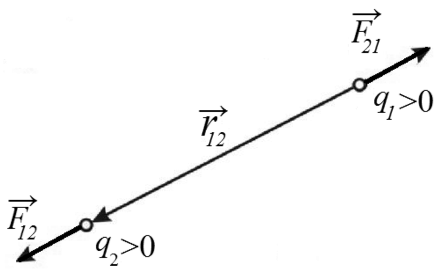



*Рис. 2*

**Принцип суперпозиции сил в электростатике**

Если на точечный заряд действует система зарядов (рис. 3), то результирующая сила равна их векторной сумме:

$$\boldsymbol{F} = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{F}_i \; .$$

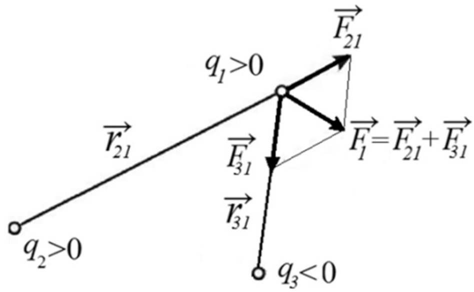



*Рис. 3*

Если рассматривается взаимодействие неточечных зарядов, то их разбивают на элементарно малые элементы, каждый из которых уже можно считать точечным зарядом. А затем применяют к полученной системе точечных зарядов закон Кулона и принцип суперпозиции.

Для непрерывного распределения зарядов в пространстве вводят понятия линейной, поверхностной и объемной плотности зарядов:

а) если заряды расположены на некоторой линии, то заряд, находящийся на единице длины $\lambda = \dfrac{dq}{dl}$, называется **линейной плотностью заряда**, $[\lambda]$ = Кл/м.

При однородной плотности заряда, заряд на отрезке $l$ определяется выражением $q = \lambda l$;

б) если заряды распределены на некоторой поверхности, то заряд, приходящийся на единицу площади $\sigma = \dfrac{dq}{dS}$, называется **поверхностной плотностью заряда**, $[\sigma] = \text{Кл/м}^2$.

При однородной плотности заряда, заряд на площади $S$ определяется выражением $q = \sigma S$;

в) если заряды распределены в объеме, то заряд, приходящийся на единицу объема $\rho = \dfrac{dq}{dV}$, называется **объемной плотностью заряда**, $[\rho] = \text{Кл/м}^3$.

При однородной плотности заряда заряд, распределенный в объеме *V*, определяется выражением $q = \rho V$.

**Электрическое поле**. Взаимодействие электрических зарядов на расстоянии объясняется тем, что электрический заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле. Любой другой заряд, помещенный в электрическое поле, испытывает на себе его действие. Понятие поля ввел Майкл Фарадей (1791–1867) примерно в 1830 г.

*Электрическое поле* – силовое поле, посредством которого осуществляется взаимодействие между электрическими зарядами. Электрическое поле создается электрическими зарядами и обнаруживается по действию на них. Электрическое поле неподвижных зарядов называется *электростатическим.*

Силовой векторной характеристикой электрического поля служит величина, называемая **напряженностью поля *E***.

**Вектор напряженности поля *E*** в точке равен отношению силы ***F***, действующей на точечный пробный (малый по величине) заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q}, \text{ единицы измерения } [E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Направление вектора ***E*** совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Величина вектора напряженности не зависит от величины пробного заряда, так как с ростом заряда пропорционально увеличивается и сила.

Зная напряженность поля в некоторой точке, можно рассчитать силу, которая будет действовать на заряд, помещенный в эту точку: $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$.

Напряженность поля $\boldsymbol{E}$, созданного точечным зарядом *q* в точке, положение которой задается радиус-вектором $\boldsymbol{r}$, определяется выражениями:

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^3}\boldsymbol{r}; \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}.$$

Напряженность в некоторой точке электрического поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженности полей, которые создавал бы каждый заряд системы в отдельности в данной точке (**принцип суперпозиции полей**) (рис. 4):

$$\boldsymbol{E} = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{E}_i \ .$$

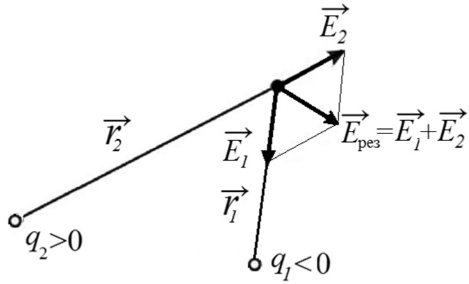
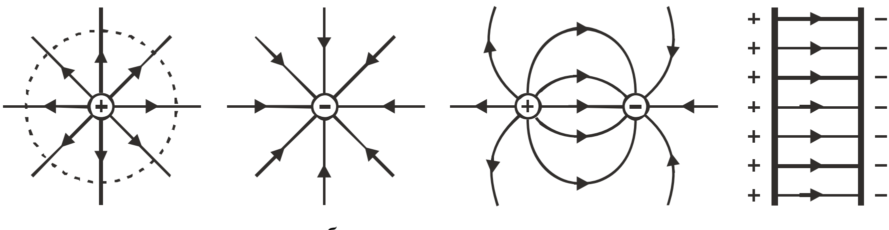



*Рис. 4*

Для наглядного изображения поля используются силовые линии (рис. 5).



*а* *б* *в* *г*

*Рис. 5*

**Свойства силовых линий**

- Касательная к силовой линии совпадает с вектором напряженности в данной точке. Направление линии совпадает с направлением $\boldsymbol{E}$.
- Линии начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном или уходят в бесконечность.
- Линии непрерывны. Если бы была точка разрыва, то в ней напряженность не определена.
- Линии не пересекаются. В противном случае напряженность не однозначна.

- Густота линий пропорциональна модулю напряженности.

На рис. 5, *а* и *б* показаны силовые линии уединенных зарядов, на рис. 5, *в* – силовые для поля диполя (системы равных по величине и противоположных по знаку зарядов), на рис. 5, *г* – силовые линии однородного поля.

**Основная задача электростатики** заключается в нахождении значения напряженности поля $\boldsymbol{E}$ в любой точке пространства по величине и местоположению зарядов, создающих поле. Эта задача может быть решена либо с помощью принципа суперпозиции, либо с помощью **теоремы Гаусса**.

Принципом суперпозиции удобно пользоваться, когда рассматривается система небольшого числа дискретных зарядов. В случае непрерывного распределения зарядов и симметричной картины поля удобнее пользоваться теоремой Гаусса.

**Теорема Гаусса** формулируется следующим образом: поток вектора напряженности через любую произвольно выбранную замкнутую поверхность $S$ равен отношению алгебраической суммы зарядов $\sum q_i$, заключенных внутри этой поверхности, к произведению электрической постоянной и диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon$:

$$\Phi = \int \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{dS} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \sum_i q_i = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

**Алгоритм применения теоремы Гаусса:**

- нарисовать картину силовых линий, исходя из симметрии в расположении зарядов;
- выбрать замкнутую поверхность так, чтобы она проходила через изучаемую точку, охватывала заряды, и ее элементы были либо параллельны, либо перпендикулярны силовым линиям;
- из соображений симметрии выразить поток Ф через напряженность;
- найти суммарный заряд внутри поверхности $\Sigma q_i$;
- подставить полученные выражения в уравнение для теоремы Гаусса $\Phi = f(E) = \dfrac{\sum q_i}{\varepsilon_0 \varepsilon}$;
- выразить из полученного уравнения напряженность.

**Работа электрического поля** по перемещению электрического заряда $q$ не зависит от формы траектории и определяется только начальным и конечным положением заряда (электростатическое поле является потенциальным):

$$A_{12} = \int_1^2 \boldsymbol{F}d\boldsymbol{l} = q\int_1^2 \boldsymbol{E}d\boldsymbol{l} = U(\boldsymbol{r}_1) - U(\boldsymbol{r}_2),$$

где $U(\boldsymbol{r})$ – потенциальная энергия заряда $q$, $U(\boldsymbol{r}) = q\varphi(\boldsymbol{r})$, а функция $\varphi(\boldsymbol{r})$ называется потенциалом поля $\left(\text{измеряется в вольтах, В} = \dfrac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\right)$.

$$\varphi(\boldsymbol{r}) = \frac{U(\boldsymbol{r})}{q}.$$

**Потенциал электростатического поля** – это скалярная, энергетическая характеристика поля, показывающая, какой потенциальной энергией обладает единичный положительный заряд $q$, помещенный в данную точку поля. Значение потенциала в данной точке зависит от выбора точки нулевого потенциала, т. е. определяется с точностью до константы. В то же время разность потенциалов между двумя точками поля от выбора точки отсчета не зависит.

Используя потенциал, можно найти работу электростатического поля по перемещению заряда $q$ из точки с потенциалом $\varphi_1$ в точку с потенциалом $\varphi_2$:

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

Потенциал точечного заряда $q$ на расстоянии $r$ от него равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r}$$

при условии, что $\varphi_\infty = 0$.

Потенциал электрического поля, создаваемый системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из зарядов системы в отдельности (**принцип суперпозиции для потенциала**):

$$\varphi(\boldsymbol{r}) = \sum_{i=1}^{N} \varphi(\boldsymbol{r}_i).$$

**Связь напряженности и потенциала**. Напряженность – силовая характеристика поля, а потенциал – энергетическая. Эти две характеристики электростатического поля связаны друг с другом:

$$\boldsymbol{E} = -\mathrm{grad}\,\varphi = -\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x}\boldsymbol{e}_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\boldsymbol{e}_y + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\boldsymbol{e}_z \right);$$

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x},\ E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y},\ E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Вектор напряженности направлен в сторону наибольшего уменьшения потенциала, модуль напряженности равен быстроте изменения потенциала вдоль этого направления:

$$\varphi = -\int (\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{dl}), \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \boldsymbol{Edl}.$$

Для наглядного изображения электрического поля наряду с **силовыми линиями** используют **эквипотенциальные поверхности**.

**Эквипотенциальные поверхности** являются поверхностями равного потенциала и имеют следующие свойства.

- В каждой точке эквипотенциальной поверхности потенциал одинаков.
- Поверхность непрерывна, замкнута сама на себя и не имеет начала.
- Разные поверхности с отличающимися потенциалами друг с другом не пересекаются.
- Силовые линии перпендикулярны (ортогональны) эквипотенциальным поверхностям. Перемещение вдоль эквипотенциальной поверхности соответствует $d\varphi = 0$, тогда и проекция **E** на это направление перемещения равна нулю, значит, вектор **E** перпендикулярен поверхности.

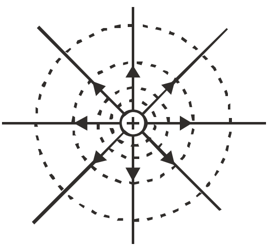


*Рис. 6*

На рис. 6 показана картина силовых линий и эквипотенциальных поверхностей точечного положительного заряда.

## Энергия заряда во внешнем поле

Электрический заряд $q$ в точке с потенциалом $\varphi$ обладает потенциальной энергией

$$W_p = q\varphi.$$

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов $q_1$ и $q_2$ равна

$$W_p = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} + \text{const}.$$

Потенциальная энергия взаимодействия системы точечных зарядов будет определяться выражением

$$W_p = \frac{1}{2}\sum q_i\varphi_i,$$

где $\varphi_i$ – потенциал всех зарядов (кроме $q_i$) в точке расположения заряда $q_i$.

Из последнего выражения вытекает, что заряженный проводник с зарядом $q$ и потенциалом $\varphi$, одинаковым во всех точках проводника, обладает потенциальной энергией

$$W_p = \frac{1}{2}q\varphi.$$

Для любого заряженного проводника потенциал проводника пропорционален его заряду. **Электроемкостью проводника** называется скалярная физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу и характеризующая его способность накапливать электрические заряды.

Уединенный проводник обладает электроемкостью, равной

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad [C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф}.$$

Энергия заряженного проводника определяется выражением

$$W_p = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2}.$$

Емкость проводников зависит от их взаимного расположения по отношению к другим зарядам и проводникам. Поскольку электрическое поле таких проводников открыто (его силовые линии распространяются на бесконечность), это является определенным недостатком. Данного недостатка лишены конденсаторы. Поле заряженного конденсатора в основном локализовано в пространстве между его обкладками.

**Конденсатор** (от лат. ***condensare*** – сгущать, собирать) **–** система из двух проводников (обкладок, на которых могут накапливаться заряды противоположных знаков), разделенных слоем диэлектрика.

Емкость конденсатора равна

$$C = \frac{q}{U},$$

где $q$ – заряд обкладок конденсатора; $U$ – разность потенциалов между ними. Емкости параллельно и последовательно соединенных конденсаторов показаны на рис. 7.

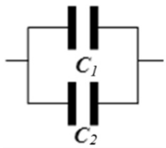
| | | |
|---|---|---|
| Емкость параллельно соединенных конденсаторов | $C = \sum C_i$ |  |
| Емкость последовательно соединенных конденсаторов | $\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}$ |  |

*Рис. 7*

Энергия электрического поля, запасенная конденсатором, равна

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

Энергия заряженных тел – это энергия их электрического поля. Ее можно записать через характеристики поля:

$$W = \int_V \omega dV,$$

где $V$ – объем поля; $\omega$ – объемная плотность энергии, которая выражается через векторы напряженности $\vec{E}$ электрического поля и электрическое смещение $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$;

$$\omega = \frac{\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{D}}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

## Емкость конденсаторов различной формы

Емкость **плоского конденсатора** (рис. 8) равна

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где $S$ – площадь пластин конденсатора; $d$ – расстояние между пластинами; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды между пластинами конденсатора.

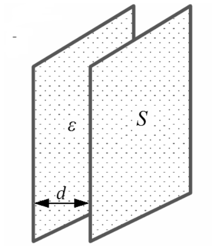


*Рис. 8*

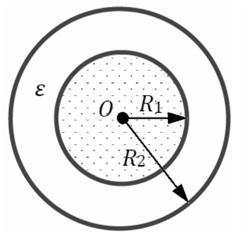


*Рис. 9*

Емкость **сферического конденсатора** (рис. 9) равна

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где $R_1, R_2$ – радиусы обкладок конденсатора; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками.

Емкость **цилиндрического конденсатора** (рис. 10) равна

$$C = 2\pi\varepsilon_0 \varepsilon \frac{l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

где $R_1, R_2$ – радиусы обкладок конденсатора; $l$ – их длина; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками.

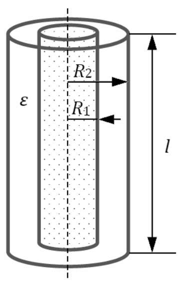


*Рис. 10*

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.1.1.** Два точечных заряда в вакууме взаимодействуют на расстоянии 11 см с такой же силой, как в скипидаре на расстоянии 7,4 см. Определите диэлектрическую проницаемость скипидара.

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $r_1 = 11\,\text{см}$ | $r_1 = 11\cdot10^{-2}\,\text{м}$ |
| $r_2 = 7{,}4\,\text{см}$ | $r_2 = 7{,}4\cdot10^{-2}\,\text{м}$ |
| $F_1 = F_2$ | |
| $\varepsilon_1 = 1$ | |
| $\varepsilon_2 = ?$ | |

*Решение*

Для решения задачи запишем закон Кулона для двух случаев взаимодействия точечных зарядов:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}\frac{|q_1||q_2|}{r_1^2};$$

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2}\frac{|q_1||q_2|}{r_2^2}.$$

По условию $F_1 = F_2$, следовательно, $\varepsilon_1 r_1^2 = \varepsilon_2 r_2^2$.

Тогда для диэлектрической проницаемости скипидара получим

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2.$$

Проверка по размерности очевидна – диэлектрическая проницаемость величина безразмерная.

Выполним вычисления:

$$\varepsilon_2 = 1\left(\frac{11\cdot10^{-2}}{7{,}4\cdot10^{-2}}\right)^2 \approx 2{,}2.$$

**Ответ:** $\varepsilon_2 \approx 2{,}2$.

**Пример 1.1.2.** Во сколько раз сила кулоновского отталкивания между двумя протонами больше силы их гравитационного притяжения?

| **Дано:** | *Решение* |
|---|---|
| $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл<br>$m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг | Сила кулоновского отталкивания между двумя протонами может быть найдена по закону Кулона: |
| $\dfrac{F_{эл}}{F_{гр}} = ?$ | |

$$F_{эл} = k\frac{|q|^2}{r^2}.$$

Сила гравитационного притяжения между ними определяется законом всемирного тяготения:

$$F_{гр} = G\frac{m^2}{r^2},$$

где $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \ \dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравитационная постоянная.

Разделив одно уравнение на другое, получим

$$\frac{F_{эл}}{F_{гр}} = \frac{kq^2}{Gm^2}.$$

Проведем проверку по размерности, искомая величина должна быть величиной безразмерной:

$$\left[\frac{F_{эл}}{F_{гр}}\right] = \frac{\dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \text{Кл}^2}{\dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot \text{кг}^2} = 1.$$

Выполним вычисления^

$$\frac{F_{эл}}{F_{гр}} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1{,}6^2 \cdot 10^{-38}}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 1{,}67^2 \cdot 10^{-54}} \approx 1{,}29 \cdot 10^{36}.$$

**Ответ:** $\dfrac{F_{эл}}{F_{гр}} \approx 1{,}29 \cdot 10^{36}$.

**Пример 1.1.3.** В вершинах квадрата находятся равные положительные заряды $q$, а в центре – отрицательный заряд $q_0 = -2{,}5 \cdot 10^{-9}$ Кл. Какой должна быть величина положительных зарядов, чтобы вся система находилась в равновесии?

**Дано:**

$q_0 = -2{,}5 \cdot 10^{-9}$ Кл

$\Sigma \vec{F} = 0$

---

$q = ?$

*Решение*

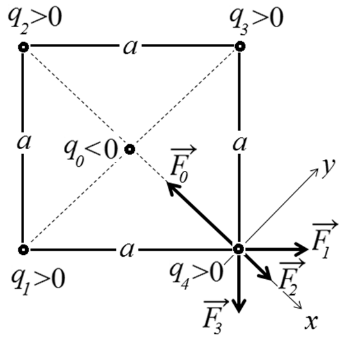



*Рис. 11*

Из соображений симметрии очевидно, что заряд $q_0$ в центре квадрата будет находиться в равновесии при любом значении равных зарядов $q$, расположенных в вершинах квадрата (рис. 11). Поэтому для ответа на вопрос задачи необходимо исследовать условия равновесия зарядов, находящихся в вершинах квадрата. Эти заряды находятся в одинаковых условиях. Поэтому ответ на искомый вопрос можно получить исходя из равновесия любого из них, например $q_4$.

На заряд $q_4$ действуют четыре силы: 1) $\vec{F}_1$ – со стороны заряда $q_1$; 2) $\vec{F}_2$ – со стороны заряда $q_2$; 3) $\vec{F}_3$ – со стороны заряда $q_3$; 4) $\vec{F}_0$ – со стороны заряда $q_0$. В соответствии с принципом суперпозиции результирующая сила, действующая на $q_4$, будет равна их векторной сумме. Равновесие заряда $q_4$ означает, что эта векторная сумма сил равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_0 = 0. \quad (1.1)$$

Пусть сторона квадрата равна $a$, тогда (по закону Кулона) модули сил, действующих на заряд $q_4$, будут определяться выражениями:

$$F_1 = F_3 = k\frac{|q|^2}{a^2},\ F_2 = k\frac{|q|^2}{2a^2} \text{ и } F_0 = k\frac{2|q||q_0|}{a^2}. \qquad (1.2)$$

Выберем ось $OX$ вдоль диагонали квадрата, запишем условие равновесия (1.1) с учетом (1.2) в проекции на эту ось:

$$k\frac{|q|^2}{a^2}\cos 45^\circ + k\frac{|q|^2}{2a^2} + k\frac{|q|^2}{a^2}\cos 45^\circ - k\frac{2|q||q_0|}{a^2} = 0.$$

Проведя серию математических преобразований, получим

$$k\frac{|q|^2}{a^2}\frac{\sqrt{2}}{2} + k\frac{|q|^2}{2a^2} + k\frac{|q|^2}{a^2}\frac{\sqrt{2}}{2} - k\frac{2|q||q_0|}{a^2} = 0;$$

$$|q|\sqrt{2} + \frac{|q|}{2} = 2|q_0|;$$

$$q = \frac{4|q_0|}{2\sqrt{2}+1}.$$

Проверка по размерности очевидна: $[q] = \text{Кл}$.

Выполним вычисления:

$$q = \frac{4\cdot 2{,}5\cdot 10^{-9}}{2\sqrt{2}+1} \approx 2{,}6\cdot 10^{-9} \quad \text{Кл}.$$

**Ответ:** $q \approx 2{,}6\cdot 10^{-9}$ Кл.

**Пример 1.1.4.** Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены в общей точке на нитях одинаковой длины так, что их поверхности соприкасаются. Какой общий заряд необходимо сообщить шарикам, чтобы сила натяжения нитей стала равной $T = 98$ мН? Расстояние от центра шариков до точки подвеса $L = 10$ см, масса каждого шарика $m = 5$ г.

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $T = 98$ мН | $T = 98 \cdot 10^{-3}$ Н |
| $L = 10$ см | $L = 0{,}10$ м |
| $m = 5$ г | $m = 5 \cdot 10^{-3}$ кг |
| $Q - ?$ | |

*Решение*

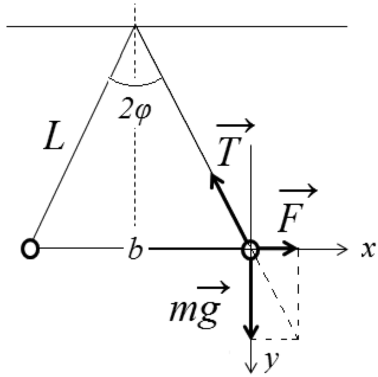



*Рис. 12*

После сообщения шарикам общего заряда $Q$ заряд поделился между ними поровну, следовательно, заряд каждого шарика равен $q = \frac{1}{2}Q$. В силу электростатического отталкивания шарики отклоняются от вертикали на некоторый угол $2\varphi$, так что сумма действующих сил (на каждый из шариков) станет равной нулю. На каждый из шариков действуют три силы: $m\vec{g}$ – сила тяжести, $\vec{T}$ – сила натяжения нити; $\vec{F}$ – сила электростатического (кулоновского) отталкивания.

Уравнение равновесия шарика под действием приложенных сил:

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F} = 0. \qquad (1.3)$$

Выберем оси: горизонтальную *OX* и вертикальную *OY*. Запишем условие равновесия (1.3) в проекциях на выбранные оси:

$$\begin{cases} x: \quad -T\sin\varphi + F = 0; \\ y: \quad -T\cos\varphi + mg = 0; \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T\sin\varphi = F; \\ T\cos\varphi = mg. \end{cases} \qquad (1.4)$$

Применяя основное тригонометрическое тождество, из (1.4) получим

$$F^2 + (mg)^2 = T^2. \qquad (1.5)$$

Силу электростатического отталкивания можно найти по закону Кулона:

$$F = k\frac{q^2}{b^2} = k\frac{Q^2}{4b^2}. \qquad (1.6)$$

Расстояние между шариками $b$ найдем из геометрических соображений:

$$\frac{b}{2L} = \frac{F}{T} \quad \Rightarrow \quad b = \frac{2LF}{T}. \qquad (1.7)$$

Решая совместно уравнения (1.5), (1.6) и (1.7), получим

$$Q = \frac{4L}{T}\sqrt{\frac{\left(T^2 - (mg)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{k}}.$$

Проведем проверку по размерности:

$$[Q] = \frac{\text{м}}{\text{Н}}\sqrt{\frac{(\text{Н}^2)^{\frac{3}{2}} \cdot \text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{Н}}\sqrt{\frac{\text{Н}^3 \cdot \text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{Н}} \cdot \frac{\text{Н} \cdot \text{Кл}}{\text{м}} = \text{Кл}.$$

Выполним вычисления:

$$Q = \frac{4 \cdot 0,1}{98 \cdot 10^{-3}}\sqrt{\frac{\left(\left(98^2 - (5 \cdot 9,8)^2\right)10^{-6}\right)^{\frac{3}{2}}}{9 \cdot 10^9}} \approx 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

**Ответ:** $Q \approx 1,06 \cdot 10^{-6}$ Кл.

**Пример 1.1.5.** Тонкий стержень длиной $l = 15$ см заряжен с линейной плотностью $\lambda = 1$ мкКл/м. На расстоянии $b = 10$ см от стержня находится заряд $q_1 = 5$ нКл. Заряд $q_1$ равноудален от концов стержня. Определите силу взаимодействия точечного заряда и заряженного стержня.

| Дано: | СИ |
|---|---|
| $l = 15$ см | $l = 0{,}15$ м |
| $\lambda = 1$ мкКл/м | $\lambda = 10^{-6}$ Кл/м |
| $b = 10$ см | $b = 0{,}10$ м |
| $q_1 = 5$ нКл | $q_1 = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл |
| $F = ?$ | |

*Решение*

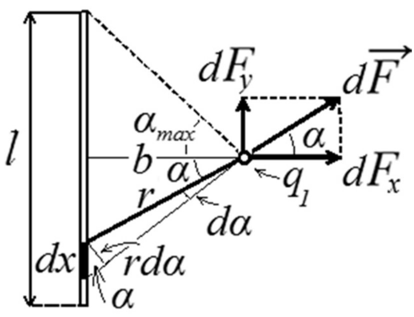



*Рис. 13*

В данной задаче идет речь о взаимодействии точечного и протяженного зарядов, поэтому применять непосредственно закон Кулона нельзя. Для решения задачи разделим стержень на бесконечно малые элементы длиной $dx$ (рис. 13). Заряд, приходящийся на этот элемент, $dq = \lambda dx$ можно считать точечным зарядом. Тогда модуль силы взаимодействия зарядов $q_1$ и $dq$ может быть найден по закону Кулона:

$$dF = k\frac{q_1 \cdot dq}{r^2} = k\frac{q_1 \cdot \lambda dx}{r^2}, \tag{1.8}$$

где $r$ – расстояние от заряда $dq$ до $q_1$.

Сила взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда может быть найдена исходя из принципа суперпозиции:

$$\vec{F} = \int d\vec{F}\ . \tag{1.9}$$

Для различных элементов $dx$ направление и величина силы $d\vec{F}$ меняются, поэтому для нахождения векторной суммы (1.9) удобно разложить $d\vec{F}$ на две проекции: горизонтальную $dF_x$ и вертикальную $dF_y$. Тогда выражение (1.9) запишется в виде

$$\vec{F} = \int dF_x \cdot \vec{e}_x + \int dF_y \cdot \vec{e}_y\,. \tag{1.10}$$

При движении вдоль стержня второе слагаемое $\int dF_y \cdot \vec{e}_y$ в данной сумме обращается в ноль. Следовательно, результирующая сила будет направлена вдоль горизонтальной оси, и ее модуль будет определяться выражением

$$F = \int dF_x \, . \tag{1.11}$$

Из геометрических соображений (см. рис. 13 к задаче) найдем $dF_x$:

$$\frac{dF_x}{dF} = \frac{b}{r} \quad \Rightarrow \quad dF_x = dF\frac{b}{r} \, .$$

Используя (1.8), получим

$$dF_x = k\frac{q_1 \lambda dx}{r^2}\frac{b}{r} \, . \tag{1.12}$$

По рисунку

$$r = \frac{b}{\cos\alpha}; \quad dx = \frac{rd\alpha}{\cos\alpha} \quad \Rightarrow \quad dx = \frac{bd\alpha}{\cos^2\alpha} .$$

Подставляя полученные выражения в формулу (1.12), а затем в (1.11), имеем

$$F = \int k\frac{q_1\lambda}{b}\cos\alpha d\alpha \, .$$

Положение заряда $dq$ на стержне определяется углом α, который меняется в пределах от ($-\alpha_{\max}$) до ($+\alpha_{\max}$). Следовательно,

$$F = \int\limits_{-\alpha_{\max}}^{+\alpha_{\max}} k\frac{q_1\lambda}{b}\cos\alpha d\alpha = 2\int\limits_{0}^{+\alpha_{\max}} k\frac{q_1\lambda}{b}\cos\alpha d\alpha = 2k\frac{q_1\lambda}{b}\sin\alpha_{\max} \, . \tag{1.13}$$

Из рисунка видно, что

$$\sin\alpha_{\max} = \frac{l/2}{\sqrt{\frac{l^2}{4} + b^2}} = \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4b^2}} \, .$$

Таким образом, для силы взаимодействия точечного заряда $q_1$ и заряженного стержня получим

$$F = 2k\frac{q_1\lambda}{b}\frac{l}{\sqrt{l^2+4b^2}}.$$

Проведем проверку по размерности:

$$[F] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{\text{Кл}\cdot\text{Кл}}{\text{м}\cdot\text{м}}\cdot\frac{\text{м}}{\text{м}} = \text{Н}.$$

Выполним вычисления:

$$F = 2\cdot 9\cdot 10^9\,\frac{5\cdot 10^{-9}10^{-6}}{0,1}\cdot\frac{0,15}{\sqrt{0,15^2+4\cdot 0,1^2}} = 0,54\cdot 10^{-3}\ \text{Н}.$$

**Ответ:** $F = 0,54\cdot 10^{-3}$ Н.

**Пример 1.1.6.** Найти напряженность $E$ электрического поля в точке, лежащей посередине между точечными зарядами $q_1 = 8$ нКл и $q_2 = -6$ нКл. Расстояние между зарядами $r = 10$ см; $\varepsilon = 1$.

| Дано: | СИ |
|---|---|
| $q_1 = 8$ нКл | $q_1 = 8\cdot 10^{-9}$ Кл |
| $q_2 = -6$ нКл | $q_1 = -6\cdot 10^{-9}$ Кл |
| $r = 10$ см | $r = 0,10$ м |
| $\varepsilon = 1$ | |
| $E - ?$ | |

*Решение*

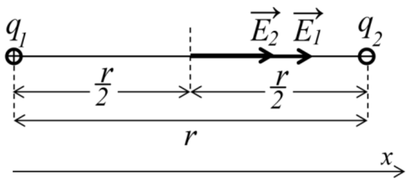



*Рис. 14*

Для ответа на вопрос задачи применим принцип суперпозиции: напряженность электрического поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым зарядом по отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

где $\vec{E}_1$ – напряженность поля, созданного зарядом $q_1$ в рассматриваемой точке (рис. 14); $\vec{E}_2$ – напряженность поля, созданного зарядом $q_2$ в рассматриваемой точке.

От векторного уравнения перейдем к скалярному, записав данное выражение в проекции на ось $x$:

$$E = E_1 + E_2\,. \tag{1.14}$$

Учитывая, что заряды $q_1$ и $q_2$ точечные, для $E_1$ и $E_2$ имеем

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\cdot\frac{|q_1|}{\left(\frac{r}{2}\right)^2}\,,\quad E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\cdot\frac{|q_2|}{\left(\frac{r}{2}\right)^2}\,. \tag{1.15}$$

Подставляя (1.15) в (1.14), найдем результирующую напряженность в рассматриваемой точке поля:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\cdot\frac{4\left(|q_1|+|q_1|\right)}{r^2} = \frac{\left(|q_1|+|q_1|\right)}{\pi\varepsilon_0\varepsilon\cdot r^2}\,.$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$[E] = \frac{\text{Кл}}{\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}\cdot\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Выполним вычисления: $E = \dfrac{(8+6)\cdot 10^{-9}}{3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 0{,}1^2} \approx 50{,}4\cdot 10^3\ \dfrac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$

**Ответ:** $E \approx 50{,}4\cdot 10^3\ \dfrac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$

**Пример 1.1.7.** Два точечных заряда $q_1 = 7{,}5$ нКл и $q_2 = -14{,}7$ нКл расположены на расстоянии $r = 5{,}0$ см. Найти напряженность $E$ электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $a = 3{,}0$ см от положительного заряда и $b = 4{,}0$ см от отрицательного заряда.

**Дано:**

$q_1 = 7{,}5$ нКл

$q_2 = -14{,}7$ нКл

$r = 5{,}0$ см

$a = 3{,}0$ см

$b = 4{,}0$ см

$E - ?$

**СИ**

$q_1 = 7{,}5 \cdot 10^{-9}$ Кл

$q_2 = -14{,}7 \cdot 10^{-9}$ Кл

$r = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

$a = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

$b = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ м

*Решение*

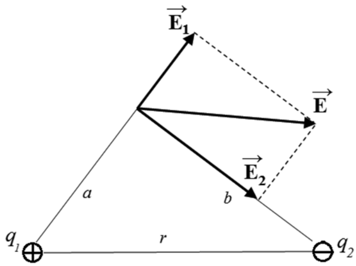



*Рис. 15*

Для решения поставленной задачи применим принцип суперпозиции: напряженность электрического поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым зарядом по отдельности:

$$\vec{E} = \sum \vec{E}i .$$

В данной задаче источниками поля являются два точечных заряда, следовательно,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 ,$$

где $\vec{E}_1$ – напряженность поля, созданного зарядом $q_1$ в рассматриваемой точке; $\vec{E}_2$ – напряженность поля, созданного зарядом $q_2$ в рассматриваемой точке (рис. 15).

Из условия задачи можно видеть, что угол между векторами $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ прямой $(r^2 = a^2 + b^2)$, поэтому для нахождения модуля $E$ результирующей напряженности может быть использована теорема Пифагора:

$$E = \sqrt{E_1^{\,2} + E_2^{\,2}} . \qquad (1.16)$$

Учитывая, что заряды $q_1$ и $q_2$ точечные, для $E_1$ и $E_2$ имеем

$$E_1 = k \cdot \frac{q_1}{a^2}, E_2 = k \cdot \frac{q_2}{b^2}, \qquad (1.17)$$

где $k = 9 \cdot 10^9\ \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$.

Подставляя выражения (1.17) в (1.16) и преобразуя его, найдем искомую величину $E$ :

$$E=\sqrt{\left(k\cdot\frac{q_1}{a^2}\right)^2+\left(k\cdot\frac{q_2}{b^2}\right)^2}\ ;$$

$$E=k\sqrt{\left(\frac{q_1}{a^2}\right)^2+\left(\frac{q_2}{b^2}\right)^2}\ . \tag{1.18}$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$[E]=\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\sqrt{\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^4}}=\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Кл}}{\text{Кл}^2\cdot\text{м}^2}=\text{Н/Кл}.$$

Проведем вычисления:

$$E=9\cdot10^9\sqrt{\left(\frac{7,5\cdot10^{-9}}{\left(3\cdot10^{-2}\right)^2}\right)^2+\left(\frac{14,7\cdot10^{-9}}{\left(4\cdot10^{-2}\right)^2}\right)^2}\approx$$

$$\approx\frac{9\cdot10^9\cdot10^{-9}}{10^{-4}}\sqrt{0,694+0,844}\approx110\ \text{кН/Кл}.$$

**Ответ:** $E\approx110$ кН/Кл.

**Пример 1.1.8.** По тонкой нити, изогнутой по дуге окружности радиусом $R=10,0$ см, равномерно распределен заряд $q=20$ нКл. Используя принцип суперпозиции, определите напряженность электростатического поля, создаваемого заряженной нитью в центре кривизны дуги, если длина нити равна четверти длины окружности (рис. 16).

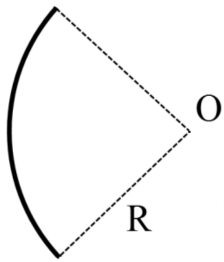



*Рис. 16*

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $R = 10{,}0$ см | $R = 10^{-2}$ м |
| $q = 20$ нКл | $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл |
| $E - ?$ | |

*Решение*

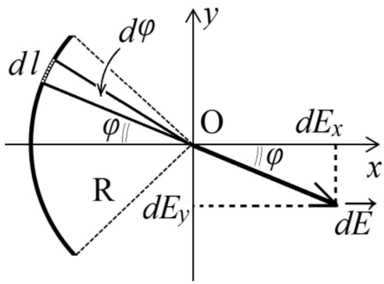



*Рис. 17*

Выделим на нити бесконечно малый элемент $dl = Rd\varphi$ так, чтобы заряд $dq = \lambda dl = \lambda R d\varphi$, приходящийся на данный элемент, можно было считать точечным; $\lambda = \dfrac{2q}{\pi R}$ – линейная плотность заряда нити (по условию заряд $q$ распределен на нити, длина которой равна четверти окружности) (рис. 17).

Такой точечный заряд будет создавать в точке $O$ поле напряженностью

$$dE = k\frac{dq}{R^2} = k\frac{\lambda R d\varphi}{R^2} = k\frac{2q}{\pi R}\frac{Rd\varphi}{R^2} = k\frac{2qd\varphi}{\pi R^2}. \qquad (1.19)$$

Результирующая напряженность поля, создаваемого заряженной нитью, может быть найдена исходя из принципа суперпозиции:

$$\vec{E} = \int d\vec{E}. \qquad (1.20)$$

Для различных элементов $dl$ направление вектора напряженности $d\vec{E}$ задается углом $\varphi$, поэтому для нахождения векторной суммы (1.20) удобно разложить $d\vec{E}$ на две составляющие: горизонтальную $dE_x = dE\cos\varphi$ и вертикальную $dE_y = dE\sin\varphi$. Выбор направления осей определяется симметрией задачи. Тогда выражение (1.20) запишется в виде

$$\vec{E} = \int dE_x \cdot \vec{e}_x + \int dE_y \cdot \vec{e}_y. \qquad (1.21)$$

Очевидно, что при интегрировании вдоль нити второе слагаемое в данной сумме обращается в ноль. Следовательно, результирующая напряженность будет направлена вдоль горизонтальной оси, и ее модуль будет определяться выражением (пределы интегрирования определяются из условия задачи):

$$E = \int dE_x = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} dE \cos\varphi = 2\int_{0}^{+\frac{\pi}{4}} dE \cos\varphi . \qquad (1.22)$$

Подставляя (1.19) в (1.22), для напряженности поля нити получим

$$E = 2\int_{0}^{+\frac{\pi}{4}} k\frac{2q}{\pi R^2}\cos\varphi d\varphi = 2k\frac{2q}{\pi R^2}\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = k\frac{2\sqrt{2}q}{\pi R^2}. \qquad (1.23)$$

Проведем проверку по размерности:

$$[E] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Выполним вычисления:

$$E = 9\cdot10^9\,\frac{2\sqrt{2}\cdot2\cdot10^{-8}}{3{,}14\cdot10^{-4}} \approx 1{,}6\cdot10^6\,\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

**Ответ:** $E \approx 1{,}6\cdot10^6 \quad \dfrac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$

**Пример 1.1.9.** Электрическое поле создано бесконечной цилиндрической поверхностью радиуса $R = 10$ см, равномерно заряженной с линейной плотностью $\lambda = 2$ нКл/см. Какую линейную скорость получит электрон под действием сил поля, приблизившись к цилиндру с расстояния $a_1 = 50$ см до расстояния $a_2 = 20$ см?

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $R = 10$ см | $R = 0{,}10$ м |
| $\lambda = 2$ нКл/см | $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/м |
| $a_1 = 50$ см | $a_1 = 0{,}50$ м |
| $a_2 = 20$ см | $a_2 = 0{,}20$ м |
| $v_2 - ?$ | |

*Решение*

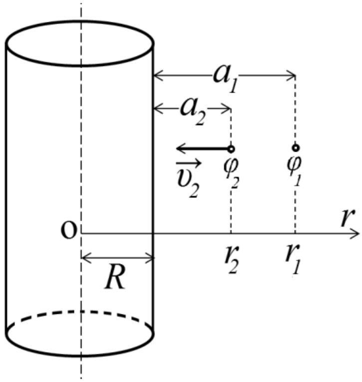



*Рис. 18*

Для решения задачи воспользуемся законом сохранения энергии:

$$W_{k_1} + W_{p_1} = W_{k_2} + W_{p_2}, \tag{1.24}$$

где $W_{k_1} = \dfrac{mv_1^2}{2}$ и $W_{k_2} = \dfrac{mv_2^2}{2}$ – кинетические энергии электрона в точках 1 и 2, $W_{p_1} = q\varphi_1$ и $W_{p_2} = q\varphi_2$ – потенциальные энергии электрона в тех же точках.

Учитывая, что электрон в начальный момент покоился, получим

$$q\varphi_1 = \frac{mv_2^2}{2} + q\varphi_2, \quad \frac{mv_2^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad v_2 = \sqrt{\frac{2q(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}. \tag{1.25}$$

Разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ может быть найдена исходя из уравнения связи напряженности электростатического поля и потенциала:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \int_1^2 E_r dr. \tag{1.26}$$

В данной задаче поле создается бесконечной заряженной цилиндрической поверхностью. Поле имеет радиальную симметрию. Вектор напряженности направлен вдоль оси $r$ (рис. 18). В соответствии с теоремой Гаусса–Остроградского снаружи цилиндрической заряженной поверхности напряженность поля равна

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}. \tag{1.27}$$

Подставляя (1.27) в (1.28), найдем разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \int_1^2 \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \ln\frac{r_2}{r_1} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \ln\frac{R + a_2}{R + a_1}.$$

Полученное выражение для разности потенциалов подставим в (1.26) и найдем скорость электрона в точке 2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2q\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\ln\dfrac{R+a_2}{R+a_1}}{m}} = \sqrt{\frac{q\lambda}{\pi\varepsilon_0\varepsilon m}\ln\frac{R+a_2}{R+a_1}}. \tag{1.28}$$

Выполним проверку по размерности:

$$v_2 = \sqrt{\frac{\text{Кл}\cdot\text{Кл}\cdot\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{м}\cdot\text{Кл}^2\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{м}}{\text{с}^2\cdot\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Проведем вычисления:

$$v_2 = \sqrt{\frac{\left(-1,6\cdot10^{-19}\right)\cdot 2\cdot 10^{-7}}{3,14\cdot 8,85\cdot 10^{-12}\cdot 9,11\cdot 10^{-31}}\ln\frac{0,3}{0,6}} \approx 2,96\cdot 10^7\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Ответ:** $v_2 \approx 2,96\cdot 10^7\ \dfrac{\text{м}}{\text{с}}$.

**Пример 1.1.10.** Два шарика малых размеров с зарядами $q_1 = 6,7$ нКл и $q_2 = 13,3$ нКл расположены на расстоянии $r_1 = 40$ см. Какую работу необходимо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $r_2 = 25$ см?

| Дано: | СИ | *Решение* |
|---|---|---|
| $q_1 = 6,7$ нКл | $q_1 = 6,7 \cdot 10^{-9}$ Кл | |
| $q_2 = 13,3$ нКл | $q_2 = 13,3 \cdot 10^{-9}$ Кл | |
| $r_1 = 40$ см | $r_1 = 0,40$ м | |
| $r_2 = 25$ см | $r_2 = 0,25$ м | |
| $A_{12} - ?$ | | |

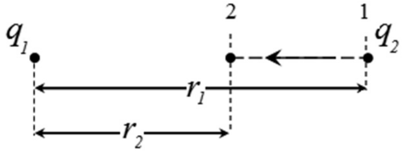



*Рис. 19*

**Способ 1.** Для удобства решения задачи будем полагать, что один из шариков (например, первый) является неподвижным, а второй перемещается под действием внешних сил из положения 1 в положение 2 (рис. 19). Тогда заряд $q_1$ можно рассматривать как источник электрического поля, в котором перемещается заряд $q_2$.

Работа внешних сил $A_{12}$ и работа сил поля $A_{\text{поля}}$ в соответствии с третьим законом Ньютона связаны соотношением

$$A_{12} = -A_{\text{поля}}. \tag{1.29}$$

Работа сил поля $A_{\text{поля}}$ по перемещению заряда $q_2$ в поле заряда $q_1$ определяется выражением

$$A_{\text{поля}} = q_2(\varphi_1 - \varphi_2), \tag{1.30}$$

где $\varphi_1$ и $\varphi_2$ – потенциалы начальной и конечной точки.

По условию заряд $q_1$ можно считать точечным, следовательно,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = kq_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right), \tag{1.31}$$

где $k = 9 \cdot 10^9 \quad \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$.

Решая совместно уравнения (1.31), (1.30) и (1.29), получим выражение для искомой величины $A_{12}$:

$$A_{12} = -q_2 kq_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right); \; A_{12} = kq_1 q_2\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) \; A_{12} = k\frac{q_1 q_2 (r_1 - r_2)}{r_1 r_2}. \tag{1.32}$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$\left[A_{12}\right] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\frac{\text{Кл}\cdot\text{Кл}\cdot\text{м}}{\text{м}\cdot\text{м}} = \text{Н}\cdot\text{м} = \text{Дж}.$$

Проведем вычисления:

$$A_{12} = 9\cdot 10^9 \cdot \frac{6,7\cdot 10^{-9}\cdot 13,3\cdot 10^{-9}\left(0,4-0,25\right)}{0,4\cdot 0,25} \approx 1,2\cdot 10^{-6}\ \text{Дж}.$$

**Способ 2.** До сближения потенциальная энергия взаимодействия зарядов $W_1 = k\dfrac{q_1 q_2}{r_1}$, после сближения $W_2 = k\dfrac{q_1 q_2}{r_2}$ при условии, что $W_\infty = 0$.

Работа внешних сил $A_{12}$ идет на изменение энергии:

$$A_{12} = W_2 - W_1 = kq_1q_2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = k\frac{q_1q_2(r_1 - r_2)}{r_1r_2}.$$

Полученное выражение совпадает с (1.32).

**Ответ:** $A_{12} \approx 1,2$ мкДж.

**Пример 1.1.11** Разность потенциалов между точками $A$ и $B$ равна $U = 6$ В. Емкость первого конденсатора $C_1 = 2$ мкФ, емкость второго $C_2 = 4$ мкФ. Найдите заряды $q_1$ и $q_2$ и разность потенциалов $U_1$ и $U_2$ на обкладках каждого конденсатора.

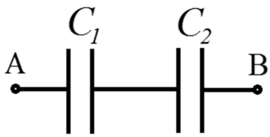



*Рис. 20*

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $C_1 = 2$ мкФ | $C_1 = 2\cdot 10^{-6}$ Ф |
| $C_2 = 4$ мкФ | $C_2 = 4\cdot 10^{-6}$ Ф |
| $U = 6$ В | |
| $q_1 - ?$ $q_2 - ?$ | |
| $U_1 - ?$ $U_2 - ?$ | |

*Решение*

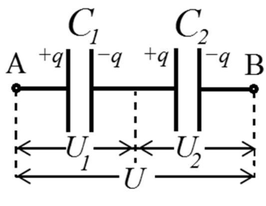



*Рис. 21*

На обкладках последовательно соединенных конденсаторов, после подключения к источнику постоянного напряжения *U*, появляются заряды, одинаковые по величине и противоположные по знаку (рис. 21). Следовательно, заряд на всех конденсаторах будет одинаковым:

$$q_1 = q_2 = q \,.$$

Напряжение *U*, приложенное между точками *A* и *B*, распределится между конденсаторами в соответствии с их емкостью:

$$U = U_1 + U_2 ,$$

где $U_1 = \dfrac{q}{C_1}$ и $U_2 = \dfrac{q}{C_2}$ .

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}, \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \tag{1.33}$$

По найденному значению эквивалентной емкости *C* (1.33) можно найти заряды конденсаторов:

$$q_1 = q_2 = q = CU. \tag{1.34}$$

Подставляя (1.33) в (1.34), для зарядов конденсаторов получим

$$q_1 = q_2 = q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U \,. \tag{1.35}$$

Проверка по размерности:

$$[q] = \frac{\text{Ф} \cdot \text{Ф}}{\text{Ф}} \text{В} = \text{Ф} \cdot \text{В} = \text{Кл}.$$

Проведем вычисления:

$$q_1 = q_2 = q = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{(2+4) \cdot 10^{-6}} \cdot 6 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

Зная заряд на обкладках конденсатора, найдем разность потенциалов на каждом из них:

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\frac{U}{C_1} = U\frac{C_2}{C_1+C_2};$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\frac{U}{C_2} = U\frac{C_1}{C_1+C_2}.$$

Проверка по размерности очевидна: $[U] = \text{В}$.

Выполним вычисления:

$$U_1 = 6\frac{4\cdot 10^{-6}}{(2+4)10^{-6}} = 4 \text{ В}; \ U_2 = 6\frac{2\cdot 10^{-6}}{(2+4)10^{-6}} = 2 \text{ В}.$$

**Ответ:** $q_1 = q_2 = q = 8\cdot 10^{-6}$ Кл; $U_1 = 4$ В; $U_2 = 2$ В;

**Пример 1.1.12** Расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора, присоединенного к источнику постоянного напряжения $U = 200$ В, равно $d_1 = 5{,}0$ мм. Площадь пластин конденсатора $S = 200$ см$^2$. Найдите работу по раздвижению пластин до расстояния $d_2 = 10$ мм в двух случаях: а) конденсатор в процессе раздвижения пластин все время соединен с источником; б) конденсатор перед раздвижением пластин отключили от источника.

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $U = 200$ В | |
| $d_1 = 5{,}0$ мм | $d_1 = 5{,}0\cdot 10^{-3}$ м |
| $d_2 = 10$ мм | $d_2 = 10\cdot 10^{-3}$ м |
| $S = 200$ см$^2$ | $S = 2\cdot 10^{-2}$ м$^2$ |
| а) $U = \text{const}$ | |
| б) $q = \text{const}$ | |
| $A_а - ?$ $\quad A_б - ?$ | |

*Решение*

а) Конденсатор в процессе раздвижения пластин все время соединен с источником, это означает, что напряжение на обкладках конденсатора не меняется: $U = \text{const}$ (рис. 22), а заряды меняются. $q_1 -$ заряд на обкладках конденсатора до раздвижения пластин, $q_2 -$ после.

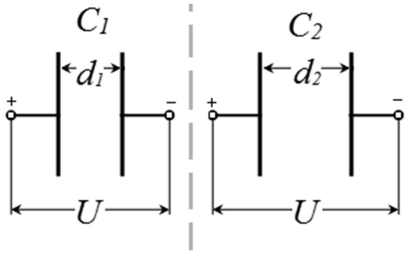



*Рис. 22*

Изменение энергии конденсатора происходит как за счет работы $A_а$ по раздвижению пластин конденсатора, так и работы источника $A_{ист}$ по перемещению зарядов, т. е.

$$W_2 - W_1 = A_а + A_{ист}, \quad (1.36)$$

где $W_1$ – энергия конденсатора до раздвижения пластин; $W_2$ – энергия конденсатора после раздвижения пластин.

В данном случае $(U = \text{const})$ для энергии конденсатора удобно использовать выражения

$$W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}, \quad W_2 = \frac{C_2 U^2}{2}, \quad (1.37)$$

где $C_1$ – емкость конденсатора до раздвижения пластин; $C_2$ – емкость конденсатора после раздвижения пластин.

Работа по перемещению зарядов, совершаемая источником, может быть найдена следующим образом:

$$A_{ист} = U(q_2 - q_1) = C_2 U^2 - C_1 U^2. \quad (1.38)$$

Подставив (1.38) и (1.37) в (1.36), с учетом выражения для емкости плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ получим выражение для искомой величины $A_а$:

$$A_а = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 (d_2 - d_1)}{2 d_1 d_2}.$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$\left[A_{\text{а}}\right] = \frac{\text{Ф}\cdot\text{м}^2\cdot\text{В}^2\cdot\text{м}}{\text{м}\cdot\text{м}\cdot\text{м}} = \text{Ф}\cdot\text{В}^2 = \frac{\text{Кл}}{\text{В}}\cdot\text{В}^2 = \text{Кл}\cdot\text{В} = \text{Дж}.$$

Выполним вычисления:

$$A_{\text{а}} = \frac{8{,}85\cdot10^{-12}\cdot1\cdot2\cdot10^{-2}\cdot200^2(10-5)\cdot10^{-3}}{2\cdot10\cdot10^{-3}\cdot5\cdot10^{-3}} \approx 350\cdot10^{-9}\quad \text{Дж.}$$

б) Конденсатор перед раздвижением пластин отключили от источника, это означает, что напряжение на обкладках конденсатора меняется $(U \neq \text{const})$, а заряд остается постоянным $(q = \text{const})$ (рис. 23).

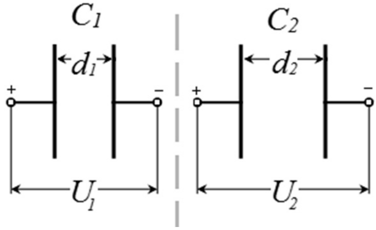



*Рис. 23*

Для решения этой задачи также будем использовать энергетический подход. Работа, совершаемая при раздвижении пластин, идет на изменение энергии конденсатора, т. е.

$$A_{\text{б}} = W_2 - W_1, \tag{1.39}$$

где $W_1$ – энергия конденсатора до раздвижения пластин; $W_2$ – энергия конденсатора после раздвижения пластин.

В данном случае $(q = \text{const})$ и для энергии конденсатора удобно использовать выражения

$$W_1 = \frac{q^2}{2C_1}, \qquad W_2 = \frac{q^2}{2C_2}, \tag{1.40}$$

где $C_1$ – емкость конденсатора до раздвижения пластин; $C_2$ – емкость конденсатора после раздвижения пластин:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d_1};\quad C_2 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d_2}. \tag{1.41}$$

В данной ситуации заряд, сообщенный обкладкам конденсатора до раздвижения пластин, сохраняется, и его величина определяется выражением

$$q = C_1 U \,. \qquad (1.42)$$

Из уравнений (1.39), (1.40), (1.41) и (1.42) найдем искомую величину $A_б$ :

$$A_б = \frac{(C_1 U)^2}{2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1}\right); \; A_б = \frac{(\varepsilon_0 \varepsilon S)^2 U^2}{2{d_1}^2}\left(\frac{d_2 - d_1}{\varepsilon_0 \varepsilon S}\right);$$

$$A_б = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2 (d_2 - d_1)}{2{d_1}^2}\,.$$

Проверка по размерности аналогична случаю а).

Выполним вычисления:

$$A_б = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 200^2 (10 - 5) 10^{-3}}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} \approx 710 \cdot 10^{-9} \text{ Дж.}$$

**Ответ:** $A_а \approx 350 \cdot 10^{-9}$ Дж ; $A_б \approx 710 \cdot 10^{-9}$ Дж .

## 1.2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

**Электрический ток** представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц. Исторически за направление тока принимается движение положительных носителей заряда.

Количественной мерой электрического тока служит сила тока:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad [I] = \text{А.}$$

Ток считается постоянным, если его величина и направление не меняются с течением времени.

Для характеристики распределения электрического тока через поперечное сечение проводника вводят векторную физическую величину – **плотность тока *j***:

$$\boldsymbol{j} = qn\boldsymbol{v},\ j = \frac{dI}{dS_\perp},\ [j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2},$$

где $n$ – концентрация носителей заряда $q$; $v$ – дрейфовая скорость их движения.

Тогда сила тока определяется потоком вектора плотности тока через произвольную поверхность $S$:

$$I = \int_S \boldsymbol{j}d\boldsymbol{S} = \int_S j_n dS = j_n S = \frac{dq}{dt}.$$

Плотность тока определяется напряженностью электрического поля в нем (закон Ома для однородного (нет источников тока) участка цепи в дифференциальной форме):

$$\boldsymbol{j} = \sigma\boldsymbol{E},$$

где $\boldsymbol{j}$ – плотность тока; $\boldsymbol{E}$ – напряженность электрического поля между концами проводника; $\sigma$ – удельная проводимость проводника.

Разность потенциалов на концах однородного проводника определяется как

$$U = \int_1^2 \boldsymbol{E}d\boldsymbol{l} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Электрическое **сопротивление** проводника равно

$$R = \rho\frac{l}{S},$$

где $l$ – длина проводника; $S$ – площадь поперечного сечения проводника; $\rho$ – удельное сопротивление проводника, $\rho = 1/\sigma$.

Сопротивление $R$ последовательно соединенных сопротивлений (резисторов) равно

$$R = R_1 + R_2.$$

Сопротивление $R$ параллельно соединенных сопротивлений (резисторов) равно

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},\quad \left(\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

Закон Ома для однородного участка цепи в интегральной форме:

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

Закон Ома для замкнутой цепи в интегральной форме:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где $\varepsilon$ – ЭДС (электродвижущая сила) источника тока; $r$ – внутреннее сопротивление источника тока; $R$ – внешнее сопротивление цепи.

Если внешнее сопротивление замкнутой цепи равно нулю (нагрузка не подключается), то в цепи протекает ток короткого замыкания

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Расчет разветвленных цепей существенно упрощается, если использовать **правила, сформулированные Кирхгофом**.

*I правило* (*правило узлов*). Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I_i = 0.$$

Узлом называется точка цепи, в которой сходится не менее трех проводников.

Ток, входящий в узел, принято считать положительным, исходящий из узла – отрицательным.

*II правило* (*правило контуров*). В любом произвольно выбранном замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжения равна сумме ЭДС:

$$\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i.$$

При составлении уравнений направление обхода контура выбирается произвольно. Произведение силы тока на сопротивление считается положительным, если направление силы тока совпадает с направлением обхода, в противном случае – считается отрицательным; ЭДС считается положительной, если она действует на положительные носители тока в направлении обхода, отрицательной – если наоборот.

**Закон Джоуля–Ленца в интегральной форме**

Количество теплоты, выделяющееся во всей замкнутой цепи, равно

$$Q_\varepsilon = \varepsilon It .$$

Количество теплоты, выделяющееся на участке цепи, равно

$$Q = UIt = \frac{U^2}{R}t .$$

Закон Ома для замкнутой цепи можно записать в виде

$$IR + Ir = \varepsilon,$$

где $IR$ – падение напряжения во внешней цепи; $Ir$ – падение напряжения внутри источника. Умножив левую и правую часть данного выражения на $I$, получим

$$I^2R + I^2r = \varepsilon I.$$

Данное выражение называется **уравнением баланса мощностей в цепи**, где $I^2R = P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, выделяющаяся на внешнем сопротивлении; $I^2r = P_{\text{пот}}$ – мощность потерь, выделяющаяся на внутреннем сопротивлении источника; $\varepsilon I = P$ – полная мощность, развиваемая источником.

Проанализируем зависимость полезной мощности цепи от сопротивления нагрузки. Для этого воспользуемся законом Ома для замкнутой цепи:

$$P_{\text{пол}} = I^2R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}.$$

Исследовав данную функцию на максимум (предлагается выполнить самостоятельно), можно убедиться, что *наибольшая полезная мощность выделяется на нагрузке при условии* $R = r$.

**Коэффициент полезного действия** цепи $\eta$ равен

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P} = \frac{I^2R}{I\varepsilon} = \frac{IR}{\varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R+r}.$$

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.2.1.** К элементу с ЭДС $\varepsilon = 10$ В присоединены последовательно два резистора $R_1 = 1$ Ом и $R_2 = 3$ Ом. Ток в цепи равен $I = 2$ А. Найдите внутреннее сопротивление источника и падение напряжения в нем.

**Дано:**
$\varepsilon = 10$ В

$R_1 = 1$ Ом
$R_2 = 3$ Ом
$I = 2$ А

$r - ?$ $U_r - ?$

*Решение*

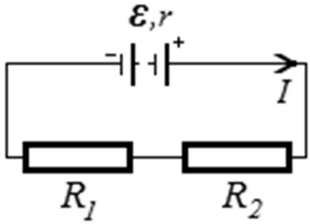



*Рис. 24*

Для решения задачи будем использовать закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Внешнее сопротивление $R$ представляет собой два последовательно соединенных резистора (рис. 24), следовательно, $R = R_1 + R_2$.

С учетом этого для сопротивления источника получим

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - (R_1 + R_2). \qquad (1.43)$$

Проверка по размерности очевидна: $[r] = \text{Ом}$.

Выполним вычисления:

$$r = \frac{10}{2} - (1 + 3) = 1 \quad \text{Ом}.$$

Падение напряжение на источнике $U_r = Ir$. С учетом (1.43) получим

$$U_r = \varepsilon - I(R_1 + R_2). \qquad (1.44)$$

Проверка по размерности очевидна:

$$[U_r] = \text{В}.$$

Выполним вычисления:

$$U_r = 10 - 2(1+3) = 2\ \text{В}.$$

**Ответ:** $r = 1$ Ом; $U_r = 2$ В.

**Пример 1.2.2.** К элементу с ЭДС $\varepsilon = 2$ В присоединены параллельно две проволоки длиной $l = 1$ м и площадью поперечного сечения $S = 1\ \text{мм}^2$ каждая. Определите ток элемента, если одна проволока медная, а другая алюминиевая. Сопротивлением источника пренебречь.

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $\varepsilon = 2$ В | $S = 10^{-6}\ \text{м}^2$ |
| $l = 1$ м | |
| $S = 1\ \text{мм}^2$ | |
| $r = 0$ | |
| $I - ?$ | |

*Решение*

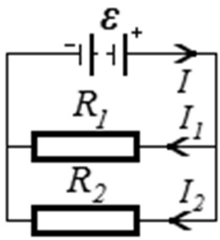



*Рис. 25*

Для решения поставленной задачи будем использовать закон Ома для замкнутой цепи: $I = \dfrac{\varepsilon}{R + r}$. Так как по условию сопротивлением источника можно пренебречь, то $I = \dfrac{\varepsilon}{R}$.

Внешнее сопротивление $R$ представляет собой две параллельно соединенные проволоки (рис. 25), следовательно, $R = \dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, где $R_1 = \rho_1 \dfrac{l}{S}$ – сопротивление первой проволоки; $\rho_1$ – удельное сопротивление меди, $\rho_1 = 17 \cdot 10^{-9}$ Ом$\cdot$м; $R_2 = \rho_2 \dfrac{l}{S}$ – сопротивление второй проволоки, $\rho_2$ – удельное сопротивление алюминия, $\rho_2 = 25 \cdot 10^{-9}$ Ом$\cdot$м.

Решая совместно записанные уравнения, для силы тока элемента получим

$$I = \frac{\varepsilon(\rho_1 + \rho_2)S}{\rho_1 \rho_2 l}.$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$[I] = \frac{\text{В} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \text{А}.$$

Выполним вычисления:

$$I = \frac{2(17+25)10^{-9} \cdot 10^{-6}}{17 \cdot 25 \cdot 10^{-18}} \approx 198 \text{ А}.$$

**Ответ:** $I \approx 198$ А.

**Пример 1.2.3.** Обмотка электрического кипятильника имеет две секции. Если включена только первая секция, то вода закипает через 15 мин, если только вторая, то через 30 мин. Через сколько минут закипит вода, если обе секции включить последовательно / параллельно?

| **Дано:** | **СИ** |
|---|---|
| $t_1 = 15$ мин | $t_1 = 900$ с |
| $t_2 = 30$ мин | $t_2 = 1800$ с |
| $t_3 - ?$ | |
| $t_4 - ?$ | |

*Решение*

Так как для всех четырех случаев, рассматриваемых в данной задаче, сетевое напряжение не изменяется, то удобно применять закон Джоуля–Ленца в форме

$$Q = \frac{U^2}{R} t,$$

где $Q$ – энергия, выделяющаяся на электрическом устройстве (кипятильнике), в нашем случае она идет на нагревание одинакового количества воды; $U$ – сетевое напряжение; $R$ – электрическое сопротивление кипятильника; $t$ – время, за которое выделяется количество теплоты $Q$.

Для первого случая (включена первая секция кипятильника) имеем

$$Q = \frac{U^2}{R_1} t_1 . \qquad (1.45)$$

Для второго случая (включена вторая секция кипятильника)

$$Q = \frac{U^2}{R_2} t_2 . \qquad (1.46)$$

Последовательное соединение секций кипятильника:

$$Q = \frac{U^2}{R_3} t_3 , \qquad (1.47)$$

где

$$R_3 = R_1 + R_2 . \qquad (1.48)$$

Параллельное соединение секций кипятильника:

$$Q = \frac{U^2}{R_4} t_4 , \qquad (1.49)$$

где

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} . \qquad (1.50)$$

Для нахождения $t_3$ выразим из уравнений (1.45) и (1.46) $R_1$ и $R_2$, подставим в (1.48), а затем в (1.47).

$$R_1 = \frac{U^2 t_1}{Q} ; \qquad R_2 = \frac{U^2 t_2}{Q} ;$$

$$R_3 = \frac{U^2}{Q}(t_1 + t_2) ; \qquad Q = \frac{U^2 t_3 Q}{U^2 (t_1 + t_2)} ;$$

$$t_3 = t_1 + t_2 . \qquad (1.51)$$

Для нахождения $t_4$ выразим из (1.49) $R_4$. Затем полученные выражения для $R_1$, $R_2$ и $R_4$ подставим в (1.50):

$$R_4 = \frac{U^2 t_4}{Q}, \quad R_1 = \frac{U^2 t_1}{Q}, \quad R_2 = \frac{U^2 t_2}{Q}.$$

$$\frac{Q}{Ut_4} = \frac{Q}{Ut_1} + \frac{Q}{Ut_2}; \quad \frac{1}{t_4} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2};$$

$$t_4 = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}. \tag{1.52}$$

Выполним вычисления:

$$t_3 = 900 + 1800 = 2700 \text{ с}; \quad t_4 = \frac{900 \cdot 1800}{900 + 1800} = 600 \text{ с}.$$

**Ответ:** $t_3 =$ 2700 с = 45 мин; $t_4$ = 600 с = 10 мин.

## 1.3. МАГНЕТИЗМ

### Закон Био–Савара–Лапласа

Индукция магнитного поля, создаваемого элементом проводника $\boldsymbol{dl}$ с током $I$, равна

$$d\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\boldsymbol{l}, \boldsymbol{r}]}{r^3},$$

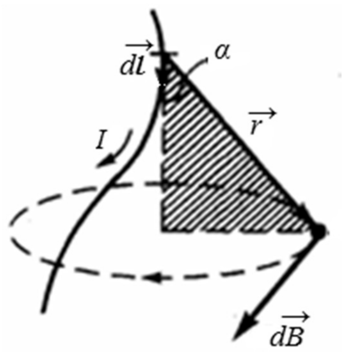


*Рис. 26*

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\boldsymbol{r}$ радиус-вектор, проведенный от элемента проводника в точку, в которой определяется индукция магнитного поля $d\boldsymbol{B}$ (рис. 26).

Вектор $d\boldsymbol{B}$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы $\boldsymbol{dl}$ и $\boldsymbol{r}$, направлен таким образом, чтобы из его конца кратчайшее вращение вектора $\boldsymbol{dl}$

до совмещения с вектором $\boldsymbol{r}$ казалось происходящим против часовой стрелки (правило буравчика или правило правого винта).

Модуль вектора $d\boldsymbol{B}$ определяется выражением

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{dl \sin\alpha}{r^2},$$

где $\alpha$ – угол между векторами $\boldsymbol{dl}$ и $\boldsymbol{r}$.

## Принцип суперпозиции

Вектор индукции $\boldsymbol{B}$ магнитного поля, порождаемого несколькими источниками (движущимися зарядами, токами), в любой точке поля равен геометрической (векторной) сумме индукций полей $\boldsymbol{B_i}$, создаваемых каждым отдельным источником в данной точке:

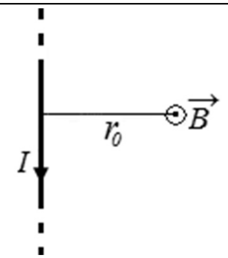
$$\boldsymbol{B} = \sum \boldsymbol{B_i}, \boldsymbol{B} = \int d\boldsymbol{B_i}.$$

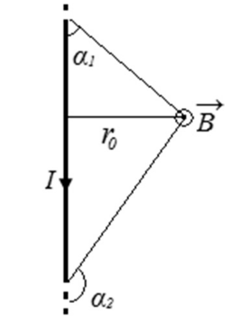
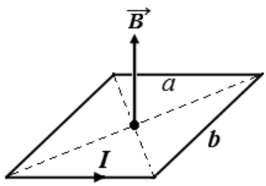
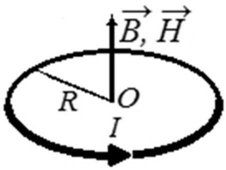
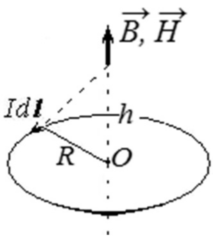
Для однородной изотропной среды магнитная индукция $\boldsymbol{B}$ связана с напряженностью магнитного поля $\boldsymbol{H}$ соотношением $\boldsymbol{B} = \mu_0 \mu \boldsymbol{H}$, где $\mu$ – относительная магнитная проницаемость среды.

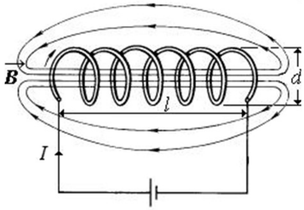
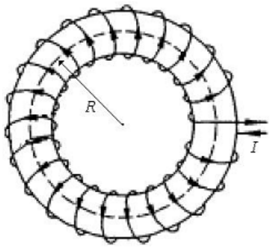
Совместное применение закона Био–Савара–Лапласа и принципа суперпозиции позволяет вычислить магнитную индукцию для любых систем токов.

## Индукция *B* и напряженность *H* магнитного поля

$$[B] = \text{Тл}, \ [H] = \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

| Система | Рисунок | $B$<br>$H$ |
|---|---|---|
| **Бесконечный прямолинейный проводник** с током $I$ |  | $B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r_0}$<br>$H = \frac{I}{2\pi \cdot r_0}$ |

| Система | Рисунок | $B$<br>$H$ |
|---|---|---|
| **Отрезок прямого провода** с током $I$ |  | $B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$<br>$H = \frac{I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$ |
| **Прямоугольный виток** с током $I$<br><br>магнитное поле в центре витка |  | $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{8I\sqrt{a^2 + b^2}}{ab}$<br>$H = \frac{1}{4\pi} \frac{8I\sqrt{a^2 + b^2}}{ab}$ |
| **Круговой виток** с током $I$<br><br>магнитное поле в центре витка |  | $B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}$<br>$H = \frac{I}{2R}$ |
| **Круговой виток** с током $I$<br><br>магнитное поле на оси витка, на расстоянии $h$ от его центра |  | $\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2\boldsymbol{p}_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$<br>$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2\pi I R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$<br>$\boldsymbol{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{2\boldsymbol{p}_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$<br>$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2\pi I R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$ |

| Система | Рисунок | $B$<br>$H$ |
|---|---|---|
| **Соленоид**<br><br>магнитное поле внутри соленоида: в точках на его оси, удаленных от концов |  | Если $l >> d$, $n = \dfrac{N}{l}$<br>$B = \mu_0 \mu n I$<br>$H = nI$ |
| **Тороид**<br><br>магнитное поле внутри тороида |  | $B = \dfrac{\mu_0 \mu}{4\pi} \dfrac{2NI}{R}$<br>$H = \dfrac{NI}{2\pi R}$ |

*Примечание.* **Соленоид** – цилиндрическая катушка длины $l$ и диаметра $d$, состоящая из большого числа витков проволоки, образующих винтовую линию. **Тороид** – кольцевая катушка, имеющая форму тора. Магнитное поле целиком локализовано внутри тороида.

Вектор магнитного момента $\boldsymbol{p}_m$ плоского контура с током $I$ определяется как $\boldsymbol{p}_m = I\boldsymbol{S}$, где вектор $\boldsymbol{S}$ численно равен площади, охватываемой контуром, и направлен по нормали к плоскости контура так, чтобы из конца вектора $\boldsymbol{p}_m$ ток казался протекающим против часовой стрелки.

## Сила Ампера

Сила Ампера – это сила, с которой магнитное поле $\boldsymbol{B}$ действует на элемент тока $Id\boldsymbol{l}$:

$$d\boldsymbol{F} = [Id\boldsymbol{l}, \boldsymbol{B}].$$

Модуль силы Ампера определяется выражением $dF = IBd\boldsymbol{l} \sin\alpha$, где $\alpha$ – угол между векторами $Id\boldsymbol{l}$ и $\boldsymbol{B}$.

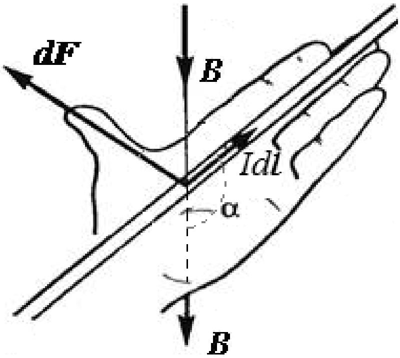



*Рис. 27*

Направление вектора силы Ампера $\boldsymbol{dF}$ задается векторным произведением векторов $I\boldsymbol{dl}$ и $\boldsymbol{B}$.

При практическом определении направления силы Ампера может быть также использовано *правило левой руки*. Если левую ладонь расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока в проводнике, то отогнутый под прямым углом большой палец покажет направление силы, действующей на элемент тока $I\boldsymbol{dl}$ (рис. 27).

*Закон Ампера* для магнитного взаимодействия в однородной изотропной среде двух элементов проводников $\boldsymbol{dl}_1$ и $\boldsymbol{dl}_2$ с токами $I_1$ и $I_2$:

$$d\boldsymbol{F}_{12} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{\left[I_2\boldsymbol{dl}_2, [I_1\boldsymbol{dl}_1, \boldsymbol{r}_{12}]\right]}{r_{12}^3},$$

где $\boldsymbol{dF}_{12}$ – сила, действующая на $I_2\boldsymbol{dl}_2$ со стороны $I_1\boldsymbol{dl}_1$.

Сила, действующая на элемент $\boldsymbol{dl}$ прямолинейного с током $I_1$ проводника со стороны длинного проводника с током $I_2$, расположенного параллельно первому на расстоянии $d$, равна

$$dF = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_1I_2}{d}dl.$$

На участок проводника $l_1$ с током $I_1$ со стороны длинного проводника с током $I_2$, расположенного параллельно первому на расстоянии $d$, действует сила, равная

$$F = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_1I_2}{d}l_1.$$

Проводники с токами $I_1$ и $I_2$, текущими в одном направлении притягиваются, а с токами $I_1$ и $I_2$, текущими в противоположном направлении – отталкиваются.

## Сила Лоренца

На электрический заряд $q$, движущийся со скоростью $\boldsymbol{v}$ в магнитном поле $\boldsymbol{B}$, действует сила Лоренца

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

Направление вектора силы Лоренца $\boldsymbol{F}$ задается векторным произведением векторов $v$ и $\boldsymbol{B}$. При практическом определении направления силы Лоренца также может быть использовано *правило левой руки*. Если левую ладонь расположить так, чтобы линии вектора магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению движения *положительного заряда*, то отогнутый под прямым углом большой палец покажет направление силы Лоренца.

В однородном магнитном поле заряд движется по винтовой линии радиуса $r$ и шагом винта $h$:

$$r = \frac{m}{|q|}\frac{v\sin\alpha}{B}, \quad h = \frac{2\pi}{B}\frac{m}{|q|}v\cos\alpha$$

где $\alpha$ – угол между вектором скорости заряда и вектором индукции магнитного поля (рис. 28).

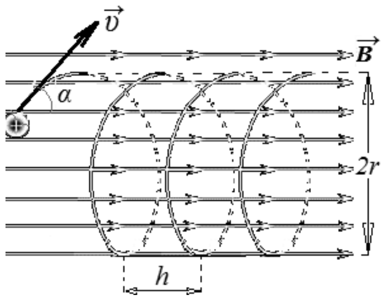


*Рис. 28*

Если скорость заряда перпендикулярна силовым линиям магнитного поля $(\alpha = \pi/2)$, то заряд движется по окружности радиуса:

$$r = \frac{m}{|q|}\frac{v}{B}.$$

Если заряд $q$ движется со скоростью $v$ в электрическом и магнитном поле, то сила, действующая на заряд, равна

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} + q[v, \boldsymbol{B}].$$

## Магнитный поток

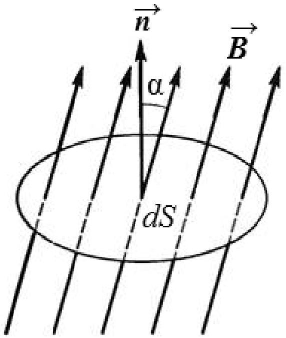



*Рис. 29*

**Элементарным магнитным потоком** $d\Phi$ через площадку $dS$ называется скалярная физическая величина, определяемая выражением

$$d\Phi = \boldsymbol{B}d\boldsymbol{S} = B\cos\alpha dS\ ,$$

где $\alpha$ – угол между единичной внешней нормалью $\boldsymbol{n}$ к площадке $dS$ и вектором индукции магнитного поля $\boldsymbol{B}$ (рис. 29).

Магнитный поток $\Phi$ через поверхность $S$ равен

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{B}d\boldsymbol{S} = \int_S B\cos\alpha dS.$$

Для однородного магнитного поля $B = \mathrm{const}$ магнитный поток равен

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

## Закон электромагнитной индукции

Электродвижущая сила (ЭДС) индукции $\varepsilon_i$ в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}\ .$$

Направления обхода контура и внешней нормали $\boldsymbol{n}$, принятые при расчете $\varepsilon_i$ и $\Phi$, взаимосвязаны: из конца вектора нормали обход контура должен быть виден происходящим против часовой стрелки.

Если замкнутый контур состоит из $N$ витков, то под магнитным потоком понимают полный магнитный поток (потокосцепление) $\Psi$ сквозь поверхности, ограниченные всеми $N$ витками:

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i.$$

**Правило Ленца**: индукционный ток в контуре всегда имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную данным контуром, уменьшает те изменения магнитного потока, которые вызвали появление индукционного тока.

Возникновение ЭДС индукции в цепи в результате изменения тока называется явлением самоиндукции,

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

где $\Phi_s = LI$, $L$ – индуктивность контура, $[L] = \text{Гн}$, генри.

Индуктивность соленоида ($l >> d$)

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

где $n$ – плотность (концентрация) витков $\left(n = \frac{N}{l}\right)$; $S$ – площадь витка; $V$ – объем соленоида $V = Sl$.

Плотность энергии магнитного поля равна

$$\omega = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}\ .$$

Энергия магнитного поля в общем случае определяется выражением

$$W = \int_V \omega dV\ .$$

В случае однородного поля энергия магнитного поля

$$W = \omega \cdot V\ .$$

Энергия магнитного поля в соленоиде равна

$$W = \frac{1}{2}LI^2.$$

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.3.1.** По двум бесконечно длинным прямым проводам, находящимся на расстоянии $d$ = 5 см друг от друга в воздухе, текут токи силой $I$ = 10 А каждый. Определите индукцию $B$ поля, создаваемого токами в точке $O$, лежащей посередине между проводами, для случаев (рис. 30): а) провода параллельны, токи текут в одном направлении; б) провода параллельны, токи текут в противоположных направлениях; в) провода перпендикулярны и лежат в параллельных плоскостях; направление токов указано на рисунке.

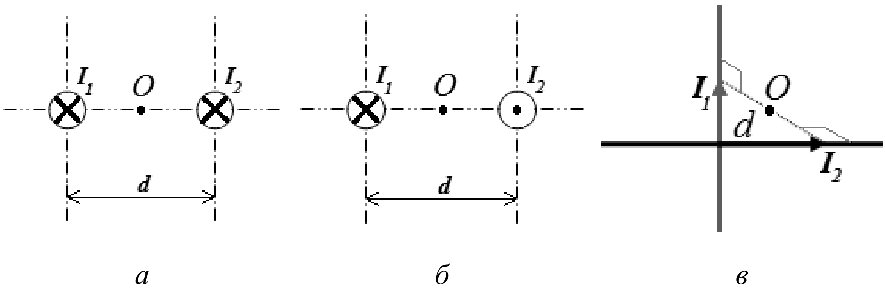



*Рис. 30*

**Дано:**
$I_1 = I_2$ = 10 А
$d$ = 5 см = 0,05 м
$\mu$ = 1 (воздух)

$B$ – ?

*Решение*

Для решения поставленной задачи применим принцип суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2, \tag{1.53}$$

где $\vec{B}_1$ – индукция магнитного поля, создаваемого током $I_1$; $\vec{B}_2$ – индукция магнитного поля, создаваемого током $I_2$.

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечным прямым проводником с током $I$, на расстоянии $r$ от оси проводника вычисляется по формуле

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r_0}.$$

В данной задаче во всех трех случаях абсолютные значения индукций $B_1$ и $B_2$ одинаковы, потому что точки выбраны на равных расстояниях от проводников, по которым текут равные токи, так как

$$r_0 = \frac{d}{2}, \text{ то } B_i = \frac{\mu_0 \mu I}{\pi d}. \qquad (1.54)$$

а) На рис. 31 покажем силовые линии магнитного поля токов $I_1$ и $I_2$ (окружности, проходящие через точку $O$). Направление силовых линий задается правилом правого винта. Векторы магнитной индукции направлены по касательной к силовым линиям.

В данном случае векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ противоположно направлены, следовательно,

$$\vec{B}_a = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 0.$$

б) Векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ сонаправлены (рис. 32), следовательно (рис. 32),

$$\vec{B}_б = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 2\vec{B}_1, \; B_б = 2B_1 = \frac{2\mu_0 \mu I}{\pi d}.$$

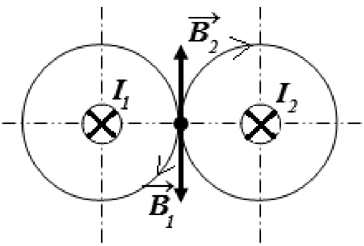



*Рис. 31*

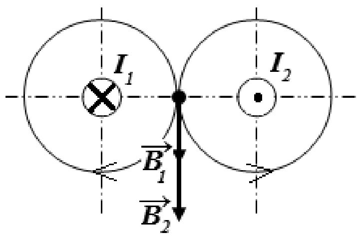



*Рис. 32*

Проверим полученную формулу по размерности:

$$[B_б] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Проведем вычисления:

$$B_б = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10}{\pi \cdot 0{,}05} = 0{,}16 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

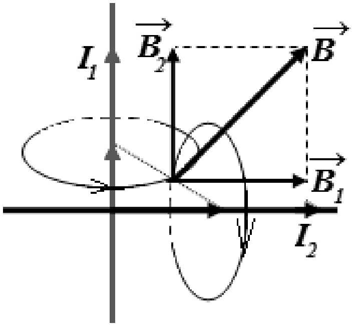



*Рис. 33*

в) Векторы индукций магнитных полей $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$, создаваемых токами в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра, взаимно перпендикулярны (рис. 33), следовательно, модуль результирующей индукции магнитного поля можно найти по теореме Пифагора:

$$B_в = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = B_1\sqrt{2} = \frac{\mu_0 \mu I \sqrt{2}}{\pi d}.$$

**Пример 2.3.2.** По двум параллельным бесконечно длинным проводникам текут одинаковые токи в противоположных направлениях, $I$ = 50 А. Проводники находятся на расстоянии $a$ = 9 см друг от друга. Определите индукцию магнитного поля в точке, отстоящей от одного проводника на расстоянии $r_1$ = 4 см и от другого – на расстоянии $r_2$ = = 12 см.

**Дано:**
$I$ = 50 А
$a$ = 9 см = $9 \cdot 10^{-2}$ м
$r_1$ = 4 см = $4 \cdot 10^{-2}$ м
$r_2$ = 12 см = $12 \cdot 10^{-2}$ м

$B$ – ?

*Решение*

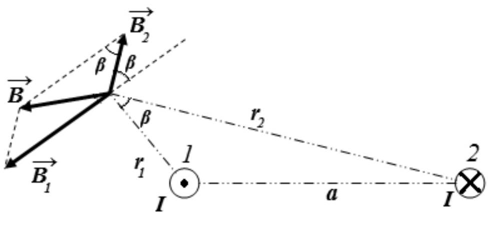



*Рис. 34*

Для решения поставленной задачи применим принцип суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Модуль результирующего вектора магнитной индукции $B$ (рис. 34) может быть найден с использованием теоремы косинусов:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1 B_2 \cos\beta}. \quad (1.55)$$

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечным прямым проводником с током $I$, на расстоянии $r_0$ от оси проводника вычисляется по формуле

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r_0}.$$

Для нашего случая $\mu = 1$, следовательно,

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1}, \ B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2}. \tag{1.56}$$

Так как $a^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\beta$, следовательно,

$$\cos\beta = \frac{r_1^2 + r_2^2 - a^2}{2r_1 r_2}. \tag{1.57}$$

Подставляя выражения (1.57) и (1.56) в (1.55), получим

$$B = \sqrt{\frac{\mu_0^2 I^2}{4\pi^2 r_1^2} + \frac{\mu_0^2 I^2}{4\pi^2 r_2^2} - 2\frac{\mu_0^2 I^2}{4\pi^2 r_1 r_2} \cdot \frac{(r_1^2 + r_2^2 - a^2)}{2r_1 r_2}};$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} - 2\frac{1}{r_1 r_2}\frac{(r_1^2 + r_2^2 - a^2)}{2r_1 r_2}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\sqrt{\frac{r_2^2 + r_1^2 - (r_1^2 + r_2^2 - a^2)}{r_1^2 r_2^2}} =$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi}\sqrt{\frac{a^2}{r_1^2 r_2^2}} = \frac{\mu_0 I a}{2\pi \cdot r_1 r_2}; \quad B = \frac{\mu_0 I a}{2\pi r_1 r_2}.$$

Проверка по размерности:

$$[B] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Проведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 12 \cdot 10^{-2}} = \frac{10^{-7} \cdot 50 \cdot 3}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 4} = 18{,}75 \cdot 10^{-5} = 0{,}19 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

**Ответ**: $B = 0{,}19 \cdot 10^{-3}$ Тл.

**Пример 1.3.3.** Проводник, изображенный на рис. 35, состоит из четырех участков: двух полубесконечных прямых *1* и *4*, участка прямого провода *2* длиной $R$ = 10 см и проводника в виде полуокружности *3* радиуса $R$ = 10 см. По проводнику течет ток $I$ = 1 А. Определите напряженность магнитного поля в центре полуокружности.

**Дано:**
$I = 1$ А
$R = 0{,}1$ м

$H - ?$

*Решение*

Для решения поставленной задачи применим принцип суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{H}_O = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3 + \vec{H}_4 .$$

В точке $O$ вектор $\vec{H}_1$ направлен перпендикулярно плоскости чертежа «к нам», векторы $\vec{H}_2$, $\vec{H}_3$ и $\vec{H}_4$ – перпендикулярно плоскости чертежа «от нас» (рис. 36).

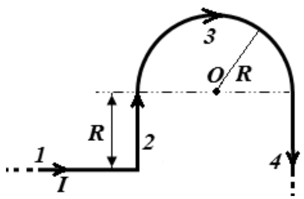



*Рис. 35*

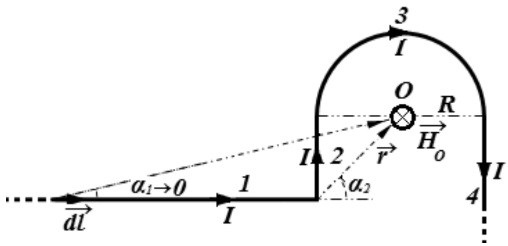



*Рис. 36*

Следовательно, модуль

$$H_O = H_2 + H_3 + H_4 - H_1 . \qquad (*)$$

Напряженность магнитного поля, созданного отрезком прямого провода, определяется выражением

$$H = \frac{I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) .$$

С учетом геометрических соотношений задачи получим

$$H_1 = \frac{I}{4\pi r_0}\left(\cos 0 - \cos\frac{\pi}{4}\right) = \frac{I}{4\pi R}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right); \qquad (1.58)$$

$$H_2 = \frac{I}{4\pi r_0}\left(\cos\frac{\pi}{4} - \cos\frac{\pi}{2}\right) = \frac{I}{4\pi R}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right); \tag{1.59}$$

$$H_4 = \frac{I}{4\pi r_0}\left(\cos\frac{\pi}{2} - \cos\pi\right) = \frac{I}{4\pi R}. \tag{1.60}$$

Третий участок проводника представляет собой половину кругового витка, следовательно,

$$H_3 = \frac{1}{2}H_{\text{витка}} = \frac{1}{2}\frac{I}{2R} = \frac{I}{4R}. \tag{1.61}$$

Подставляя выражения (1.58), (1.59), (1.60), (1.61) в (*), получим:

$$H_O = \frac{I}{4\pi R}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) + \frac{I}{4R} + \frac{I}{4\pi R} - \frac{I}{4\pi R}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right);$$

$$H_O = \frac{I}{4\pi R}\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \pi + 1 - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\right) = \frac{I}{4\pi R}\left(\sqrt{2} + \pi\right);$$

$$H_O = \frac{I}{4\pi R}\left(\sqrt{2} + \pi\right).$$

Проверка по размерности очевидна: $[H_O] = \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Проведем вычисления:

$$H_O = \frac{1}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1}\left(\sqrt{2} + \pi\right) = 3{,}625 = 3{,}7\ \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

**Ответ:** $H_O = 3{,}7\ \frac{\text{А}}{\text{м}}.$

**Пример 1.3.4.** Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U$ = 3000 В, попадает в однородное магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны скорости его движения, и начинает вращаться с частотой $\nu = 10^9$ Гц. Определите значение силы Лоренца, действующей на протон.

| **Дано:** | *Решение* |
|---|---|
| $U = 3\cdot 10^3$ В<br>$\vec{v} \perp \vec{B}$<br>$B = \mathrm{const}$<br>$\nu = 10^9$ Гц<br>$m_p = 1{,}67\cdot 10^{-27}$ кг<br>$q_p = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл | По условию задачи протон, прежде чем попасть в магнитное поле, проходит ускоряющую разность потенциалов. Для нахождения скорости протона воспользуемся законом сохранения энергии. Работа электрического поля равна изменению кинетической энергии протона: |
| $F_{\text{л}}$ – ? | $$A_{\text{эл}} = \Delta W_{\text{кин}}; \quad q_p U = \frac{m_p \cdot v^2}{2} - 0.$$ |

Следовательно,

$$v = \sqrt{\frac{2q_p U}{m_p}}. \qquad (1.62)$$

В магнитном поле на движущийся протон действует сила Лоренца. Величина силы Лоренца определяется выражением

$$F_{\text{л}} = qvB\sin\alpha.$$

В нашем случае $\vec{v} \perp \vec{B}$, $q = q_p$, следовательно,

$$F_{\text{л}} = q_p v B. \qquad (1.63)$$

Чтобы найти величину индукции магнитного поля, воспользуемся выражением для силы Лоренца

$$F_{\text{л}} = q_p v B,$$

вторым законом Ньютона

$$F_{\text{л}} = m_p a$$

и выражением для центростремительного ускорения, с которым протон движется по окружности,

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

Решая совместно эти уравнения, получим $q_p v B = m_p 2\pi\nu v$, следовательно,

$$B = \frac{2\pi\nu m_p}{q_p}. \tag{1.64}$$

Подставляя (1.62) и (1.64) в (1.63), получим выражение для силы Лоренца, действующей на протон:

$$F_{\text{л}} = q_p \sqrt{\frac{2q_p U}{m_p}} \frac{2\pi\nu m_p}{q_p} = 2\pi\nu\sqrt{2q_p m_p U}.$$

$$F_{\text{л}} = 2\pi\nu\sqrt{2q_p m_p U}.$$

Проведем проверку по размерности:

$$\left[F_{\text{л}}\right] = \text{Гц}\cdot\sqrt{\text{Кл}\cdot\text{кг}\cdot\text{В}} = \frac{1}{\text{с}}\sqrt{\text{Кл}\cdot\text{кг}\cdot\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}} = \frac{1}{\text{с}}\sqrt{\text{кг}\cdot\text{Дж}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}} = \sqrt{\text{Н}^2} = \text{Н}.$$

Выполним вычисления:

$$F_{\text{л}} = 6,28\cdot 10^9\sqrt{2\cdot 1,6\cdot 10^{-19}\cdot 1,67\cdot 10^{-27} 3\cdot 10^3} =$$

$$= 79,52\cdot 10^{-13} = 7,95\cdot 10^{-12} \text{ Н}.$$

**Ответ:** $F_{\text{л}} = 7,95\cdot 10^{-12}$ Н.

**Пример 1.3.5.** Циклотрон предназначен для ускорения протонов до энергии $E = 8\cdot 10^{-13}$ Дж. Определите наибольший радиус орбиты, по которой движется протон, если индукция магнитного поля равна 1 Тл.

**Дано:**

$E_{k\max} = 8 \cdot 10^{-13}$ Дж

$B = 1$ Тл

$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг

$q_p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$R_{\max}$ – ?

*Решение*

Циклотрон состоит из ускорительной камеры, помещенной в магнитное поле. В центре камеры помещается источник заряженных частиц (рис. 37).

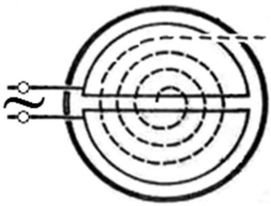


*Рис. 37*

Ускорительная камера разделена на две половинки (дуанты). Дуанты присоединены к источнику переменного напряжения. Частота напряжения подбирается таким образом, чтобы за время движения заряженных частиц по дуге окружности (за счет действия магнитного поля) направление электрического поля сменилось на противоположное. Тогда, проходя зазор между дуантами, частица каждый раз ускоряется. Процесс повторяется до тех пор, пока частица не наберет нужную скорость (энергию). Затем она выводится на мишень.

Таким образом, движение частицы в циклотроне можно рассматривать как чередование этапов разгона (в зазоре между дуантами) и движения по дуге окружности в магнитном поле с постоянной скоростью. Каждый следующий этап соответствует большей скорости (энергии) и большему радиусу орбиты.

Максимальная кинетическая энергия связана с максимальной скоростью соотношением

$$E_{k\max} = \frac{m v_{\max}^2}{2}.$$

Тогда скорость протона, соответствующая этой энергии,

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2E_{k\max}}{m}}, \qquad (1.65)$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-13}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}}} = \sqrt{9{,}58 \cdot 10^{14}} \approx 3{,}1 \cdot 10^{7} \text{ м/с.}$$

Так как $v_{max}$ на порядок меньше скорости света, релятивистскими эффектами пренебрегаем. Для вычисления наибольшего радиуса орбиты протона, движущегося в магнитном поле, воспользуемся формулой

$$r = \frac{m}{|q|} \frac{v}{\text{B}},$$

полученной с использованием II закона Ньютона и выражения для силы Лоренца. Тогда в нашем случае

$$r_{max} = \frac{m}{|q|} \frac{v_{max}}{B}. \qquad (1.66)$$

Подставляя (1.65) в (1.66), получим выражение для наибольшего радиуса орбиты протона в циклотроне:

$$r_{max} = \frac{m}{|q|} \frac{\sqrt{2E_{k\,max}}}{B\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{2E_{k\,max} m}{B^2 |q|^2}}.$$

Проверим полученную формулу по размерности:

$$[r_{max}] = \sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Тл}^2 \cdot \text{Кл}^2}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}}{\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}}\right)^2 \cdot \text{Кл}^2}} =$$

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

Выполним вычисления:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-13} \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}}{1^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^2}} = \sqrt{\frac{16 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-40}}{2{,}56 \cdot 10^{-38}}} \approx 0{,}32 \text{ м.}$$

**Ответ:** $r_{max} \approx 0{,}32$ м.

**Пример 1.3.6.** Найдите модуль и направление вектора силы, действующей на единицу длины тонкого проводника с током $I$ = 10 А в точке $O$, если проводник изогнут, как показано на рис. 38. Расстояние между длинными параллельными друг другу участками проводника $l$ = 35 см.

| Дано: | Решение |
|---|---|
| $I$ = 10 А<br>$l$ = 0,35 м | Сила, действующая на бесконечно малый элемент проводника $d\vec{l}$ с током $I$, в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ определяется выражением |
| $\dfrac{dF_0}{dl}$ – ? | $$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}].$$ |

Для нашего случая

$$d\vec{F}_0 = I \cdot [d\vec{l} \times \vec{B}], \qquad (1.67)$$

где $\vec{B}$ – вектор индукции результирующего поля, созданного в точке $O$ полубесконечными проводниками *1* и *2* с током (рис. 39).

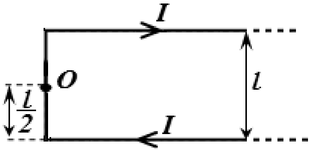



*Рис. 38*

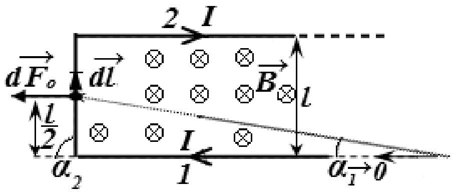



*Рис. 39*

Модуль силы $d\vec{F}_0$ определяется выражением

$$dF_0 = I \cdot dl \cdot B \cdot \sin\alpha, \qquad (1.68)$$

где $\alpha$ – угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{B}$.

Величину и направление вектора $\vec{B}$ можно найти с использованием принципа суперпозиции:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ в точке $O$ направлены перпендикулярно плоскости рисунка «от нас» – $\otimes$. Следовательно, и вектор результирующего поля имеет такое же направление ($\otimes$). С учетом этого угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{B}$ прямой, $\alpha = 90°$, следовательно,

$$\sin\alpha = 1. \qquad (1.69)$$

$$B = B_1 + B_2, \text{ так как } B_1 = B_2, \text{ то } B = 2B_1.$$

Для нахождения $B_1$ используем формулу для расчета индукции магнитного поля для отрезка прямого проводника с током:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

В нашем случае $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 90°$, $r_0 = \frac{l}{2}$, следовательно,

$$B = 2B_1 = 2\frac{\mu_0 \mu I 2}{4\pi l}(1-0) = \frac{\mu_0 \mu I}{\pi l}. \qquad (1.70)$$

Подставляя выражения (1.69) и (1.70) в (1.68), получим

$$dF_0 = Idl\frac{\mu_0 \mu I}{\pi l}1 = \frac{\mu_0 \mu I^2}{\pi l}dl.$$

Тогда сила, приходящаяся на единицу длины проводника:

$$\frac{dF_0}{dl} = \frac{\mu_0 \mu \cdot I^2}{\pi \cdot l}.$$

Осуществим проверку по размерности:

$$\left[\frac{dF_0}{dl}\right] = \frac{\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \text{А}^2}{\text{м}} = \frac{\frac{\text{Вб}}{\text{А}} \cdot \text{А}^2}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}}{\text{м}^2} = \text{Тл}\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}}\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Проведем вычисления:

$$\frac{dF_0}{dl} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^2}{\pi \cdot 0{,}35} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0{,}35} = 11{,}43 \cdot 10^{-5} = 0{,}11 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

**Ответ:** $\frac{dF_0}{dl} = 0{,}11 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

**Пример 1.3.7.** Три прямых проводника с токами расположены параллельно друг другу, как изображено на рис. 40. Проводники с токами $I_1$ = 10 А и $I_2$ = 30 А бесконечно длинные, а проводник с током $I_3$ = 40 А имеет длину $l$ = 2 м. Расстояние между проводниками $a_1$ = 30 см и $a_2$ = 40 см. Определите силу, действующую на проводник с током $I_3$.

| Дано: | *Решение* |
| --- | --- |
| $I_1$ = 10 А<br>$I_2$ = 30 А<br>$I_3$ = 40 А<br>$l$ = 2 м<br>$a_1$ = 0,3 м<br>$a_2$ = 0,4 м | Для решения поставленной задачи применим принцип суперпозиции сил: $$\vec{F}_3 = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32},$$ где $\vec{F}_{31}$ – сила Ампера, действующая на проводник с током $I_3$ со стороны тока $I_1$; $\vec{F}_{32}$ – сила Ампера, действующая на проводник с током $I_3$ со стороны тока $I_2$ (рис. 41). |
| $\vec{F}_3$ – ? | |

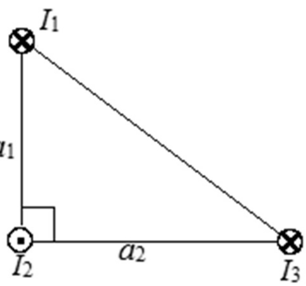


*Рис. 40*

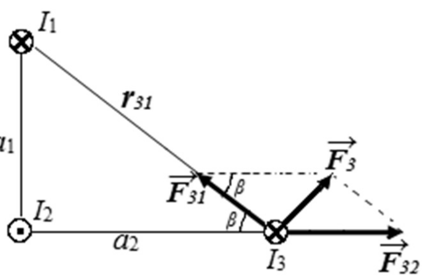


*Рис. 41*

Модуль силы $F_3$ может быть найден с использованием теоремы косинусов:

$$F_3 = \sqrt{F_{31}^2 + F_{32}^2 - 2F_{31}F_{32}\cos\beta}\,. \tag{1.71}$$

Сила, действующая на участок проводника длиной $l$ с током $I$ со стороны длинного проводника с током $I^*$, расположенного параллельно первому на расстоянии $d$ от него, определяется выражением

$$F = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2II^*}{d}l .$$

Следовательно, для модулей сил $F_{31}$ и $F_{32}$ имеем:

$$F_{31} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_3I_1}{r_{31}}l ,\ F_{32} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_3I_2}{a_2}l , \tag{1.72}$$

где

$$r_{31} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} . \tag{1.73}$$

Найти $\cos\beta$ можно из пространственного треугольника токов:

$$\cos\beta = \frac{a_2}{r_{31}} = \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}. \tag{1.74}$$

Подставляя выражения (1.72), (1.73) и (1.74) в (1.71), получим

$$F_3 = \sqrt{\begin{array}{l}\left(\frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_3I_1}{\sqrt{a_1^2+a_2^2}}l\right)^2 + \left(\frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_3I_2}{a_2}l\right)^2 - \\ -2\left(\frac{\mu_0\mu}{4\pi}2I_3l\right)^2\frac{I_1}{\sqrt{a_1^2+a_2^2}}\frac{I_2}{a_2}\frac{a_2}{\sqrt{a_1^2+a_2^2}}\end{array}} =$$

$$= \frac{\mu_0\mu I_3 l}{2\pi}\sqrt{\left(\frac{I_1}{\sqrt{a_1^2+a_2^2}}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{a_2}\right)^2 - 2\frac{I_1I_2}{\left(a_1^2+a_2^2\right)}1} =$$

$$= \frac{\mu_0\mu I_3 l}{2\pi a_2}\sqrt{\frac{(I_2a_2 - I_1a_2)^2 + (I_2a_1)^2}{a_1^2+a_2^2}} .$$

Выполним проверку по размерности:

$$\left[F_3\right]=\frac{\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\cdot\text{А}\cdot\text{м}}{\text{м}}\sqrt{\frac{\text{А}^2\cdot\text{м}^2}{\text{м}^2}}=\frac{\text{Гн}\cdot\text{А}^2}{\text{м}}=\frac{\frac{\text{Вб}}{\text{А}}\cdot\text{А}^2}{\text{м}}=\frac{\text{Вб}\cdot\text{А}}{\text{м}}=\frac{\text{Тл}\cdot\text{м}^2\cdot\text{А}}{\text{м}}=$$

$$=\text{Тл}\cdot\text{м}\cdot\text{А}=\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{Кл}\cdot\text{м}}\cdot\text{м}\cdot\frac{\text{Кл}}{\text{с}}=\text{Н}.$$

Проведем вычисления:

$$F_3=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot1\cdot40\cdot2}{2\pi\cdot0,4}\cdot\sqrt{\frac{\left(30\cdot0,4-10\cdot0,4\right)^2+\left(30\cdot0,3\right)^2}{0,09+0,16}}=$$

$$=9633,3\cdot10^{-7}=0,96\cdot10^{-3}\,\text{Н}.$$

**Ответ:** $F_3=0,96\cdot10^{-3}\,\text{Н}$.

**Пример 1.3.8.** Два параллельных прямых проводника с токами одного направления находятся на расстоянии $r_1$ = 1 см друг от друга. Первый проводник с током $I_1$ = 1 А имеет длину $l_1$ = 20 см, второй проводник с током $I_2$ = 3 А бесконечно длинный. Какую работу надо совершить, чтобы увеличить расстояние между ними до расстояния $r_2$ = 5 см?

**Дано:**
$r_1$ = 0,01 м
$r_2$ = 0,05 м
$l_1$ = 0,20 м
$I_1$ = 1 А
$I_2$ = 3 А

$A_{12}$ – ?

*Решение*

На проводник действуют внешняя сила и сила Ампера. В соответствии с третьим законом Ньютона работа внешней силы равна работе сил Ампера, взятой с противоположным знаком:

$$A_{12}=-A_\text{А}. \qquad (1.75)$$

Для нахождения работы силы Ампера воспользуемся известной из курса «Механики» формулой

$$A_\text{А}=\int_1^2\vec{F}_\text{А}\cdot d\vec{r}=\int_1^2F_r dr. \qquad (1.76)$$

Сила Ампера, действующая на проводник, определяется выражением

$$F_{\text{A}} = I_1 l_1 B_2 \sin\alpha \,, \qquad (1.77)$$

где $B_2$ – величина индукции магнитного поля, созданного проводником с током $I_2$; $l_1$ – длина проводника; $\alpha$ – угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}_2$ и элементом тока $I_1 d\vec{l}$ (рис. 42). Исходя из условия задачи, имеем, что $\alpha = 90°$, следовательно, $\sin\alpha = 1$.

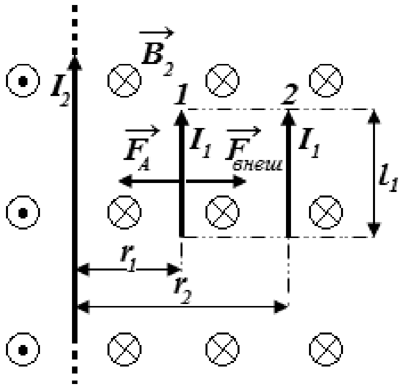



*Рис. 42*

Индукция прямого провода с током определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r_0} .$$

В нашем случае $I = I_2$, следовательно,

$$B_2 = \frac{\mu_0 \mu \cdot I_2}{2\pi \cdot r} . \qquad (1.78)$$

Подставляя (1.78) в уравнение (1.77), для силы Ампера получим

$$F_{\text{A}} = I_1 l_1 \frac{\mu_0 \mu I_2}{2\pi r} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi r} .$$

Проекция силы Ампера на направление перемещения отрицательна, следовательно,

$$F_r = -\frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi r}. \tag{1.79}$$

Подставляя (1.79) в (1.77), для работы сил Ампера получим

$$A_А = -\int_1^2 \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi r} dr = -\frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r} = -\frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Учитывая (1), для работы внешней силы имеем

$$A_{12} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l_1}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Выполним проверку по размерности:

$$A_{12} = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{Гн} \cdot \text{А}^2 = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} \cdot \text{А}^2 = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \text{Дж}.$$

Проведем вычисления:

$$A_{12} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 0,2}{2\pi} \ln \frac{0,05}{0,01} = 1,2 \cdot 10^{-7} \ln 5 =$$

$$= -1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 1,61 = 0,19 \cdot 10^{-6}\,\text{Дж}.$$

**Ответ:** $A_{12} = 0,19 \cdot 10^{-6}$ Дж.

**Пример 1.3.9.** Прямоугольная рамка со сторонами $a$ = 5 см, $b$ = = 8 см и током $I_2$ = 4 А находится на расстоянии $r_1$ = 2 см от бесконечного прямого проводника с током $I_1$ = 6 А, который расположен в одной плоскости с рамкой. Какая работа совершается при удалении рамки на расстояние $r_2$ = 10 см (между бесконечным проводом и ближайшей к нему стороной рамки)? Рамка и провод остаются в одной плоскости.

**Дано:**
$a = 0{,}05$ м
$b = 0{,}08$ м
$I_2 = 4$ А
$I_1 = 6$ А
$r_1 = 0{,}02$ м
$r_2 = 0{,}10$ м

---

$A_{12}$ – ?

*Решение*

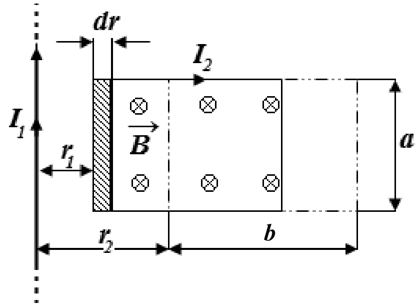



*Рис. 43*

Элементарная работа сил поля по перемещению рамки с током $I$ в магнитном поле

$$dA = Id\Phi ,$$

где $d\Phi$ – элементарное изменение магнитного потока сквозь рамку при ее перемещении.

Чтобы найти работу при конечном перемещении рамки, необходимо проинтегрировать данное выражение:

$$A_{\text{поля}} = \int_1^2 Id\Phi .$$

В нашем случае $I = I_2 = \text{const}$, следовательно,

$$A_{\text{поля}} = I_2 \int_1^2 d\Phi = \quad I_2(\Phi_2 - \Phi_1) , \qquad (1.80)$$

где $\Phi_1, \Phi_2$ – магнитные потоки сквозь рамку в положении 1 (ближайшая сторона рамки на расстоянии $r_1$ от бесконечного прямого провода) и в положении 2 (ближайшая сторона рамки на расстоянии $r_2$ от бесконечного прямого провода).

Индукция прямого провода с током равна

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r_0} .$$

В нашем случае $I = I_1$, следовательно,

$$B = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi r}. \qquad (1.81)$$

Магнитное поля проводника с током неоднородно, т. е. $B$ зависит от $r$, поэтому и поток вектора магнитной индукции будет переменным, зависящим от $r$.

На бесконечно малом расстоянии $dr$ индукцию можно считать постоянной.

Для нахождения элементарного потока $d\Phi$ выделим бесконечно малую площадку

$$dS = adr. \qquad (1.82)$$

Найдем поток вектора $\vec{B}$ сквозь нее:

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = BdS\cos\alpha, \quad \alpha = 0,\ \cos\alpha = 1. \quad d\Phi = BdS.$$

С учетом (1.81) и (1.82) для элементарного потока получим

$$d\Phi = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi r} adr. \qquad (1.83)$$

Интегрируя выражение (1.83), можно найти магнитные потоки ($\Phi_1$, $\Phi_2$) сквозь рамку в положении 1 и в положении 2:

$$\Phi_1 = \int_{r_1}^{r_1+b} \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi r} adr = \frac{\mu_0 \mu I_1 a}{2\pi} \int_{r_1}^{r_1+b} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \mu I_1 a}{2\pi} \ln\frac{r_1+b}{r_1}; \qquad (1.84)$$

$$\Phi_2 = \int_{r_2}^{r_2+b} \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi r} adr = \frac{\mu_0 \mu I_1 a}{2\pi} \int_{r_2}^{r_2+b} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \mu I_1 a}{2\pi} \ln\frac{r_2+b}{r_2}. \qquad (1.85)$$

Подставляя выражения (1.84) и (1.85) в (1.80), для работы $A_{\text{поля}}$ получим

$$A_{\text{поля}} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 a}{2\pi}\left(\ln\frac{r_2+b}{r_2} - \ln\frac{r_1+b}{r_1}\right) = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 a}{2\pi} \ln\left(\frac{r_1(r_2+b)}{r_2(r_1+b)}\right).$$

В соответствии с третьим законом Ньютона работа внешней силы равна работе сил поля, взятой с противоположным знаком:

$$A_{12} = -A_{\text{поля}}.$$

Тогда для работы внешней силы имеем

$$A_{12} = -\frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 a}{2\pi} \ln\left(\frac{r_1(r_2+b)}{r_2(r_1+b)}\right).$$

Выполним проверку по размерности:

$$A_{12} = \frac{\text{Гн}\cdot\text{А}^2\text{м}}{\text{м}} = \text{Гн}\cdot\text{А}^2 = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}\cdot\text{А}^2 = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с} = \text{Дж}.$$

Проведем вычисления:

$$A_{12} = -\frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 1\cdot 6\cdot 4\cdot 0{,}05}{2\pi}\ln\left(\frac{0{,}02(0{,}1+0{,}08)}{0{,}1(0{,}02+0{,}08)}\right) =$$

$$= -2{,}4\cdot 10^{-7}\ln\left(0{,}36\right) = -2{,}4\cdot 10^{-7}(-1{,}022) =$$

$$= 2{,}4504\cdot 10^{-7} = 0{,}245\cdot 10^{-6}\,\text{Дж}.$$

**Ответ:** $A_{12} = 0{,}245\cdot 10^{-6}$ Дж.

**Пример 1.3.10.** В магнитное поле, меняющееся по закону $B = B_0\cos\omega t$, где $B_0$ = 0,1 Тл, ω = 4 рад/с, помещена квадратная рамка со стороной $a$ = 50 см, причем нормаль к рамке образует с направлением поля угол 45°. Определите ЭДС индукции, возникающую в рамке через 5 с.

**Дано:**
$B = B_0\cos\omega t$
$B_0$ = 0,1 Тл
ω = 4 рад/с
$a$ = 0,50 м
α = 45°
$t_1$ = 5 с

$\varepsilon_1$ – ?

*Решение*

В замкнутом неподвижном контуре возникает электродвижущая сила при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур (рис. 44). Значение ЭДС определяется законом Фарадея:

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (1.86)$$

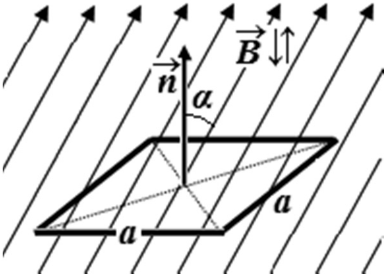



*Рис. 44*

Магнитный поток, пронизывающий рамку, определяется выражением

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

В нашем случае $S = a^2$, $\alpha = 45°$, $\cos\alpha = \dfrac{\sqrt{2}}{2}$, $B = B_0\cos\omega t$.

Следовательно, зависимость магнитного потока от времени будет задаваться выражением

$$\Phi(t) = (B_0\cos\omega t)a^2\frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{a^2B_0}{\sqrt{2}}\cos\omega t\,. \qquad (1.87)$$

Подставляя (1.87) в (1.86), получим

$$\varepsilon_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{a^2B_0\omega\sqrt{2}}{2}\sin\omega t\,.$$

Тогда для момента времени $t_1$ имеем

$$\varepsilon_1 = \frac{a^2B_0\omega\sqrt{2}}{2}\sin\omega t_1\,.$$

Выполним проверку по размерности:

$$[\varepsilon_1] = \frac{\text{м}^2\cdot\text{Тл}}{\text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}\cdot\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{м}^2} = \text{В}.$$

Проведем вычисления:

$$\varepsilon_1 = \frac{0,25 \cdot 0,1 \cdot 4 \cdot 1,414}{2} \sin(4 \cdot 5) = 0,0707 \cdot \sin(20 \text{ рад}) = 0,0707 \cdot 0,913 =$$

$$= 0,0645 = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ В}.$$

**Ответ**: $\varepsilon_1 = 65,4 \cdot 10^{-3}$ В.

**Пример 1.3.11.** На соленоид длиной $l$ = 20 см и площадью поперечного сечения $S$ = 30 см$^2$ надета катушка с числом витков $N_к$ = 10. Соленоид имеет $N_с$ = 320 витков, и по нему течет ток $I_1$ = 3 А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетой на соленоид катушке при изменении тока в соленоиде до $I_2$ = 1 А за время $\Delta t$ = 1мс?

**Дано:**
$l = 0,2$ м
$S = 30 \cdot 10^{-4}$ м$^2$
$N_к = 10$
$N_с = 320$
$I_1 = 3$ А
$I_2 = 1$ А
$\Delta t = 1 \cdot 10^{-3}$ с

$\langle \varepsilon_i \rangle$ – ?

*Решение*

Индукция магнитного поля, создаваемого соленоидом на его оси:

$$B = \mu_0 \mu \frac{N_с}{l} I . \quad (1.88)$$

Это магнитное поле пронизывает катушку, надетую на соленоид, создавая магнитный поток через ее поперечное сечение:

$$\Phi_к = N_к B S . \quad (1.89)$$

Согласно закону электромагнитной индукции в катушке возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_к}{dt} . \quad (1.90)$$

Среднее значение ЭДС индукции за время $\Delta t$ определяется выражением

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\varepsilon_i| dt . \quad (1.91)$$

С учетом (1.88), (1.89) и (1.90) получим

$$\left\langle \varepsilon_i \right\rangle = \frac{1}{\Delta t} \int\limits_0^{\Delta t} \left| \frac{d\Phi_к}{dt} \right| dt \, ;$$

$$\left\langle \varepsilon_i \right\rangle = \frac{1}{\Delta t} \left| \int\limits_{B_1}^{B_2} d(N_к BS) \right| = \frac{N_к S}{\Delta t} \left| \int\limits_{B_1}^{B_2} dB \right| = \frac{N_к S}{\Delta t} \frac{\mu_0 \mu N_с}{l} \left| \int\limits_{I_1}^{I_2} dI \right| ;$$

$$\left\langle \varepsilon_i \right\rangle = \frac{N_к S}{\Delta t} \frac{\mu_0 \mu N_с}{l} \left| I_2 - I_1 \right| ; \quad \left\langle \varepsilon_i \right\rangle = \frac{\mu_0 \mu N_с N_к S}{l \Delta t} \left| I_2 - I_1 \right| .$$

Выполним проверку по размерности:

$$\left[ \left\langle \varepsilon_i \right\rangle \right] = \frac{\frac{Гн}{м} \cdot м^2}{м \cdot с} \cdot А = \frac{Гн \cdot А}{с} = \frac{В \cdot с \cdot А}{А \cdot с} = В.$$

Проведем вычисления:

$$\left\langle \varepsilon_i \right\rangle = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 320 \cdot 10 \cdot 30 \cdot 10^{-4}}{0,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left| 1 - 3 \right| = 12057,6 \cdot 10^{-5} = 120,6 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

**Ответ:** $\left\langle \varepsilon_i \right\rangle = 120,6 \cdot 10^{-3}$ В.

**Пример 1.3.12.** Плоский виток провода расположен перпендикулярно однородному магнитному полю. Когда виток повернулся на угол 180°, по нему прошел заряд 7,2 мкКл. На какой угол повернется виток, если по нему пройдет заряд 1,8 мкКл?

**Дано:**

$\alpha_1 = 180°$

$Q_1 = 7,2 \cdot 10^{-6}$ Кл

$Q_2 = 1,8 \cdot 10^{-6}$ Кл

$\alpha_2$ –?

*Решение*:

1. В начальный момент виток неподвижен, поток вектора $\vec{B}$ через плоскость витка $\Phi_0 = BS$ (рис. 45).

Затем виток повернули на угол $\alpha_1 = 180°$:

$$\Phi_1 = -BS \, . \quad \Delta\Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_0 = -2BS \, .$$

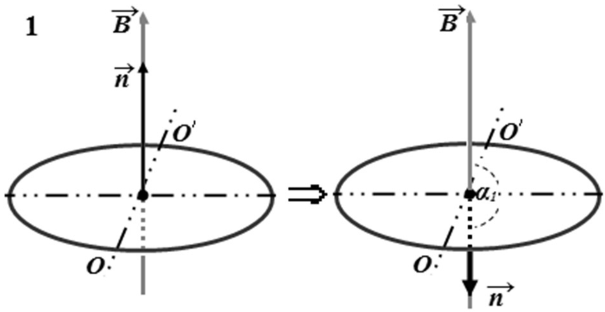



*Рис. 45*

В соответствии с законом электромагнитной индукции получим

$$\left|\varepsilon_1\right| = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} = \frac{2BS}{\Delta t}\,. \tag{1.92}$$

Согласно закону Ома по витку пройдет индукционный ток $I_1$:

$$I_1 = \frac{\left|\varepsilon_1\right|}{R}\,. \tag{1.93}$$

По определению электрического тока

$$I_1 = \frac{Q_1}{\Delta t}\,, \tag{1.94}$$

где $Q_1$ – заряд, прошедший по витку за время $\Delta t$.

Решая совместно систему уравнений (1.92), (1.93), (1.94), получим:

$$\frac{2BS}{\Delta t} = \frac{Q_1 R}{\Delta t} \Rightarrow 2BS = Q_1 R\,. \tag{1.95}$$

2. Из начального положения виток повернули на угол $\alpha_2$ (рис. 46):

$$\Phi_2 = BS\cos\alpha_2\,.$$

Следовательно, магнитный поток изменится на величину

$$\Delta\Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_0 = BS\cos\alpha_2 - BS = BS(\cos\alpha_2 - 1)\,.$$

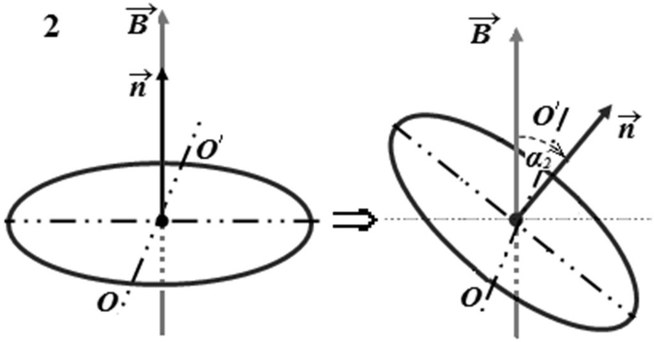



*Рис. 46*

Аналогично (4) получим

$$BS(1-\cos\alpha_2) = Q_2 R\,. \qquad (1.96)$$

Решая совместно систему уравнений (1.95) и (1.96), получим

$$1-\cos\alpha_2 = 2\frac{Q_2 R}{Q_1 R} \Rightarrow 1-\cos\alpha_2 = 2\frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow \cos\alpha_2 = \frac{Q_1 - 2Q_2}{Q_1}.$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{Q_1 - 2Q_2}{Q_1}\right).$$

Проверка по размерности очевидна. Проведем вычисления:

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{7{,}2 - 2\cdot 1{,}8}{7{,}2}\right) = \arccos\left(\frac{1}{2}\right) = 60°\,.$$

**Ответ:** $\alpha_2 = 60°$.

**Пример 1.3.13.** Медный провод диаметром $d$ = 1 мм и длиной $l$ = = 16 см согнут в виде квадрата, концы его замкнуты. Эта рамка помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B$ = 0,2 Тл, так что ее плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определите заряд $Q$, который пройдет по проволочной рамке при изменении ее формы из квадратной на прямоугольную. Соотношение сторон прямоугольника 1 : 3. Удельное сопротивление меди $\rho = 1{,}7\cdot 10^{-8}$ Ом · м.

| **Дано:** | *Решение* |
|---|---|
| $d = 1\cdot 10^{-3}$ м<br>$l = 0{,}16$ м<br>$l = 4a$<br>$B = 0{,}2$ Тл<br>$\frac{b}{c} = \frac{1}{3}$<br>$\rho = 1{,}7\cdot 10^{-8}$ Ом · м<br>$Q_i$ – ? | По условию задачи проводник сначала согнут в виде квадрата, а затем в виде прямоугольника. Оценим площадь, ограниченную рамкой, в обоих случаях. Ее периметр не изменился:<br>$$4a = l = 2b + 2c \text{ или } \frac{l}{2} = 2a = b + c.$$ |

По условию

$$\frac{b}{c} = \frac{1}{3}, \text{ или } b = \frac{c}{3}.$$

Следовательно,

$$b = \frac{l}{8};\ c = \frac{3l}{8};\ a = \frac{l}{4}.$$

Тогда для площади квадрата имеем

$$S_1 = a^2 = \frac{l^2}{16}.$$

Для площади прямоугольника:

$$S_2 = bc = \frac{l}{8}\frac{3l}{8} = \frac{3l^2}{64}.$$

Согласно закону электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_i}{\Delta t}; \tag{1.97}$$

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1, \tag{1.98}$$

где $\Phi_1$, $\Phi_2$ – магнитные потоки через площадь контура в случаях 1 и 2.

По условию задачи угол $\alpha$ между $\vec{n}$ и $\vec{B}$ равен нулю, следовательно:

$$\Phi_1 = BS_1 \cos\alpha = BS_1 = B\frac{l^2}{16}; \qquad (1.99)$$

$$\Phi_2 = BS_2 = B\frac{3l^2}{64}. \qquad (1.100)$$

Решая систему уравнений (1.97), (1.98), (1.99) и (1.100), получим

$$|\varepsilon_i| = \left|\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t}\right| = \left|\frac{B}{\Delta t}\left(\frac{3l^2}{64} - \frac{l^2}{16}\right)\right| = \left|\frac{Bl^2}{64\Delta t}(3-4)\right| = \frac{Bl^2}{64\Delta t}. \qquad (1.101)$$

Согласно закону Ома

$$|\varepsilon_i| = I_i R, \qquad (1.102)$$

где $I_i$ – индукционный ток в рамке; $R$ – сопротивление провода рамки.

Сопротивление однородного проводника может быть найдено по формуле

$$R = \rho\frac{l}{S}. \qquad (1.103)$$

Площадь поперечного сечения провода

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \qquad (1.104)$$

По определению электрического тока

$$I_i = \frac{Q_i}{\Delta t}, \qquad (1.105)$$

где $Q_i$ – заряд, прошедший по рамке за время $\Delta t$.

Подставляя (1.103), (1.104), (1.105) в (1.102), получим

$$|\varepsilon_i| = \frac{4l\rho Q_i}{\pi d^2 \Delta t}. \qquad (1.106)$$

Приравнивая выражение (1.106) к (1.101), выразим $Q_i$ :

$$\frac{Bl^2}{64\Delta t} = \frac{4l\rho Q_i}{\pi d^2 \Delta t}, \quad \frac{B\cdot l}{64} = \frac{4\cdot\rho\cdot Q_i}{\pi\cdot d^2},$$

$$Q_i = \frac{\pi d^2 Bl}{256\rho}.$$

Выполним проверку по размерности:

$$[Q_i] = \frac{\text{м}^2\cdot\text{Тл}\cdot\text{м}}{\text{Ом}\cdot\text{м}} = \frac{\text{м}^2\cdot\text{Тл}}{\text{Ом}} =$$

$$= \frac{\text{м}^2\cdot\text{В}\cdot\text{с}}{\text{Ом}\cdot\text{м}^2} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}\cdot\text{А}}{\text{В}} = \text{с}\cdot\text{А} = \text{Кл}.$$

Проведем вычисления:

$$Q_i = \frac{3{,}14\cdot10^{-6}\cdot0{,}2\cdot0{,}16}{256\cdot1{,}7\cdot10^{-8}} = 0{,}023 = 23\cdot10^{-3}\,\text{Кл}.$$

**Ответ:** $Q_i = 23\cdot10^{-3}\,\text{Кл}.$

**Пример 1.3.14.** Железнодорожные рельсы изолированы друг от друга и от земли и соединены через вольтметр. Каково показание прибора, если по рельсам проходит поезд со скоростью $v = 20$ м/с? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли принята равной $B_{\text{вз}}$ = = 50 мкТл, а расстояние между рельсами равно $l = 1{,}54$ м. Самоиндукцией пренебречь.

| **Дано:** | *Решение* |
|---|---|
| $v = 20$ м/с<br>$B_{\text{вз}} = 50\cdot10^{-6}$ Тл<br>$l = 1{,}54$ м | Рассмотрим контур, образованный парой рельсов, участком цепи с вольтметром и колесной парой (рис. 47). |
| $\varepsilon_i$ –? | |

При движении проводника (колесной пары) по рельсам в магнитном поле Земли магнитный поток, пронизывающий данный контур, изменяется. В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея в данном контуре возникнет ЭДС индукции, которую покажет включенный в цепь вольтметр:

$$\left|\varepsilon_i\right| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right|. \tag{1.107}$$

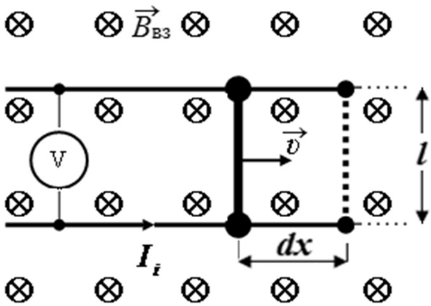



*Рис. 47*

Магнитный поток, пронизывающий данный контур, изменяется за счет увеличения площади контура $dS$:

$$dS = ldx, \tag{1.108}$$

где $dx$ – расстояние, пройденное движущимся поездом за время $dt$:

$$dx = vdt\ . \tag{1.109}$$

Тогда

$$d\Phi = B_{\text{вз}}dS\ . \tag{1.110}$$

Решая совместно систему уравнений (1.107), (1.108), (1.109), (1.110), получим

$$\varepsilon_i = \frac{B_{\text{вз}}lvdt}{dt} = B_{\text{вз}}lv\ .$$

Проверка по размерности:

$$\left[\varepsilon_i\right] = \text{Тл}\cdot\text{м}\cdot\frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}\cdot\frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \text{В}.$$

Выполним вычисления:

$$\varepsilon_i = 50\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}54\cdot 20 = 1540\cdot 10^{-6} = 1{,}54\cdot 10^{-3}\text{ В.}$$

**Ответ:** $\varepsilon_i = 1{,}54\cdot 10^{-3}$ В.

**Пример 1.3.15.** В однородном магнитном поле с индукцией $B$ = = 0,5 Тл движется прямой проводник длиной $l$ = 40 см. Найдите разность потенциалов, возникающую на концах проводника в двух случаях: а) проводник движется с постоянной скоростью $v$ = 5 м/с перпендикулярно линиям поля и оси проводника; б) проводник вращается с постоянной угловой скоростью ω = 5 рад/с, ось вращения проходит через один из его концов и совпадает с направлением магнитного поля.

**Дано:**
$B$ = 0,5 Тл
$l$ = 0,4 м
$v$ = 5 м/с
ω = 5 рад/с

а) $(\varphi_1 - \varphi_2)$ –?
б) $(\varphi_1 - \varphi_2)$ –?

*Решение*

а) Проводник движется с постоянной скоростью $v$ перпендикулярно линиям поля и оси проводника.

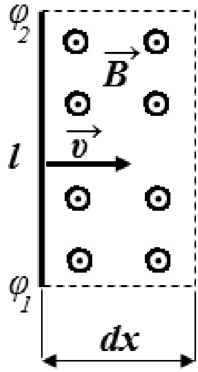


*Рис. 48*

На электрические заряды, перемещающиеся вместе с проводником в магнитном поле (рис. 48), действует сила Лоренца. Она приводит к перераспределению свободных носителей вдоль проводника. Сила Лоренца в данном случае является сторонней силой, и в проводнике возникает ЭДС индукции. Разность потенциалов, возникающая на концах проводника, будет равна ЭДС:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varepsilon_i. \tag{1.111}$$

Для нахождения ЭДС индукции применим закон Фарадея

$$|\varepsilon_i| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right|. \tag{1.112}$$

Проводник, двигаясь в магнитном поле, пересекает магнитный поток

$$d\Phi = BdS, \tag{1.113}$$

где $dS$ – площадь, пересекаемая движущимся проводником,

$$dS = ldx\ , \tag{1.114}$$

где $dx$ – расстояние, пройденное движущимся проводником за время $dt$,

$$dx = vdt\ . \tag{1.115}$$

Решая совместно систему уравнений (1.111), (1.112), (1.113), (1.114) и (1.115), получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Blvdt}{dt} = Blv\ .$$

Выполним проверку по размерности:

$$[\varphi_1 - \varphi_2] = \text{Тл} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \text{В}.$$

Проведем вычисления:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 5 = 1\ \text{В}.$$

б) Проводник вращается с постоянной угловой скоростью ω, ось вращения проходит через один из его концов и совпадает с направлением магнитного поля (рис. 49).

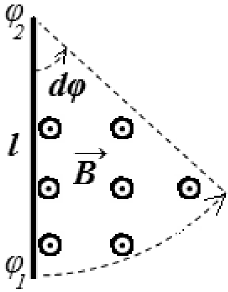



*Рис. 49*

Для решения задачи проведем аналогичные рассуждения:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = |\varepsilon_i| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right|. \tag{1.116}$$

Проводник, двигаясь в магнитном поле, пересекает магнитный поток

$$d\Phi = BdS\ , \tag{1.117}$$

где $dS$ – площадь, пересекаемая движущимся проводником,

$$dS = \frac{\pi l^2}{2\pi} d\varphi = \frac{l^2}{2} d\varphi\ , \tag{1.118}$$

где $d\varphi$ – угол, выраженный в радианах, на который повернулся проводник за время $dt$:

$$d\varphi = \omega dt . \qquad (1.119)$$

Решая совместно систему уравнений (1.116), (1.117), (1.118) и (1.119), для разности потенциалов получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Bl^2\omega dt}{2dt}; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Bl^2\omega}{2}.$$

Осуществим проверку по размерности:

$$[\varphi_1 - \varphi_2] = \text{Тл}\cdot\text{м}^2\cdot\frac{1}{\text{с}} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}\cdot\frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \text{В}.$$

Выполним вычисления:

$$\varphi_1 - \varphi_2 == \frac{0,5\cdot 0,16\cdot 5}{2} = 0,2\ \text{В}.$$

**Ответ:** а) $\varphi_1 - \varphi_2 = 1\ \text{В.}$; б) $\varphi_1 - \varphi_2 = 0,2\ \text{В}$.

**Пример 1.3.16.** Соленоид с сердечником из немагнитного материала содержит $N$ = 2000 витков провода, плотно прилегающих друг к другу. При силе тока $I$ = 5 А магнитный поток Ф = 6 мкВб. Определите индуктивность $L$ соленоида и энергию $W$ магнитного поля соленоида.

**Дано:**
$N = 2000$
$I = 5$ А
$Ф = 6\cdot 10^{-6}$ Вб

$L$ –?
$W$ –?

*Решение*

По определению индуктивность $L$ является коэффициентом пропорциональности между током в контуре и потокосцеплением $\psi$:

$$L = \frac{\psi}{I}. \qquad (1.120)$$

С другой стороны, потокосцепление $\psi$ может быть найдено через магнитный поток и число витков:

$$\psi = \Phi N. \qquad (1.121)$$

Решая совместно уравнения (1.120) и (1.121), для индуктивности соленоида получим

$$L = \frac{\Phi N}{I}. \tag{1.122}$$

Проверка по размерности очевидна:

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

Подставив численные значения, для индуктивности получим

$$L = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000}{5} = 2400 \cdot 10^{-6} = 2{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Для нахождения энергии магнитного поля соленоида воспользуемся выражением

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}. \tag{1.123}$$

Используя полученное выражение для индуктивности (1.122), для энергии магнитного поля в соленоиде получим

$$W = \frac{\Phi N I}{2}.$$

Проведем проверку по размерности:

$$[W] = \text{Вб} \cdot \text{А} = \text{Гн} \cdot \text{А} \cdot \text{А} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} \cdot \text{А}^2 = \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А} = \text{В} \cdot \text{Кл} = \text{Дж}.$$

Выполним вычисления:

$$W = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 5}{2} = 30 \cdot 10^{-3} \quad \text{Дж.}$$

**Ответ**: $L = 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ Гн., $W = 30 \cdot 10^{-3}$ Дж.

# 2. МАТЕРИАЛ К СЕМИНАРСКИМ ЗАНЯТИЯМ

## 2.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ. ЗАКОН КУЛОНА (ЗАНЯТИЕ 1)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Электрический заряд, его свойства, единицы измерения.
2. Закон сохранения электрического заряда.
3. Элементарный электрический заряд.
4. Точечный электрический заряд.
5. Взаимодействие электрических зарядов, закон Кулона, границы применимости закона.

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 1.1.** Два точечных заряда, находясь в воздухе на расстоянии 20 см друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии нужно поместить их в машинном масле, чтобы сила взаимодействия не изменилась?

**С 1.2.** На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону, причем сила электрического отталкивания капелек уравновешивает силу их гравитационного притяжения. Каковы радиусы капелек?

**С 1.3.** Найдите силу электростатического отталкивания между ядром атома натрия и бомбардирующим его протоном, считая, что протон подошел к ядру атома натрия на расстояние $r = 6 \cdot 10^{-14}$ м. Заряд ядра натрия в 11 раз больше заряда протона. Влиянием электронной оболочки атома натрия пренебречь.

**С 1.4.** Два одинаковых металлических шарика, имеющих заряды $q_1 = 9 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл, приведены в соприкосновение и разведены на прежнее расстояние. Определите отношение модулей сил взаимодействия до и после соприкосновения.

**С 1.5.** В вершинах правильного треугольника находятся положительные точечные заряды по $q = 2$ нКл каждый. Какой отрицательный заряд $Q_1$ нужно поместить в центр треугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

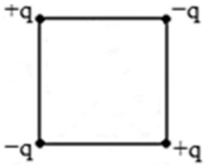


*Рис. 50*

**С 1.6.** Четыре точечных заряда, равные по абсолютному значению, находятся в вершинах квадрата (рис. 50). Будут ли заряды сближаться, разбегаться друг от друга или вся система будет находиться в равновесии?

**С 1.7.** Два маленьких шарика одинакового радиуса и массы подвешены на нитях одинаковой длины так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам общего заряда $q_0 = 0,4$ мкКл они оттолкнулись друг от друга и разошлись на угол $\alpha = 60°$. Найти массу каждого шарика, если расстояние от точки подвеса до центра шарика равно $l = 20$ см.

**С 1.8.** На тонком стержне длиной $l = 8$ см равномерно распределен заряд $q_1 = 350$ мкКл, действующий с силой $F = 120$ мкН на точечный заряд $q_2$, находящийся на продолжении этого стержня на расстоянии $r = 6$ см от его середины. Определите величину заряда $q_2$, если вся система зарядов находится в воздухе.

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 1.1.** *Как формулируется закон сохранения электрического заряда?*

1) алгебраическая сумма зарядов в консервативной системе тел постоянна;

2) электрический заряд любого тела является величиной постоянной;

3) алгебраическая сумма зарядов тел величина постоянная;

4) алгебраическая сумма зарядов изолированной системы постоянна.

**Т 1.2.** *Выберите* ***неправильное*** *продолжение утверждения.*

Электрические заряды…

1. бывают положительные и отрицательные;

2. одного знака притягиваются, а заряды противоположного знака – отталкиваются;

3. релятивистски инвариантны, т. е. величина заряда не зависит от скорости его движения;

4. дискретны, т. е. кратны целому числу элементарных электрических зарядов.

**Т 1.3.** *Электрический заряд можно разделить…*

1) на заряды, меньшие исходного в два, четыре, восемь и т. д. раз;

2) на множество малых зарядов;

3) до получения неделимого, наименьшего в природе электрического заряда;

4) до бесконечности.

**Т 1.4.** *Пылинка, имевшая отрицательный заряд –10 е (е – элементарный электрический заряд), при освещении потеряла четыре электрона. Каким стал заряд пылинки?*

1) –6 *е*;

2) +6 *е*,

3) –14 *е*;

4) +14 *е*.

**Т 1.5.** *Два малых одинаковых металлических шарика, заряженные одноименными зарядами* ***q*** *и* ***4q****, находятся на расстоянии* ***r*** *друг от друга. Шарики привели в соприкосновение и удалили друг от друга на прежнее расстояние. При этом сила их кулоновского взаимодействия…*

1) не изменилась;

2) уменьшилась;

3) возросла.

**Т 1.6.** *Точечный заряд* ***Q*** *помещен между двумя разноименными зарядами так, как показано на рис. 51. Куда направлена равнодействующая кулоновских сил, действующих на заряд* ***Q****?*

1) сила направлена влево ←;

2) сила направлена вправо →;

3) сила направлена вверх ↑;

4) сила направлена вниз ↓;

5) сила равна 0.

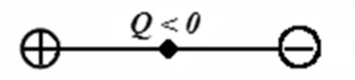



*Рис. 51*

**2.** Решите задачу № 1 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 2.

# 2.2. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ И ТЕОРЕМЫ ГАУССА ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ (ЗАНЯТИЕ 2)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Электрическое поле, электростатическое поле.
2. Напряженность электрического поля (определение, формула, единицы измерения.
3. Напряженность электрического поля точечного заряда (формула).
4. Принцип суперпозиции электрических полей (формулировка и математическая запись).
5. Силовые линии электрического поля, их особенности.
6. Поток вектора напряженности электрического поля (определение, формула, единицы измерения).
7. Теорема Гаусса-Остроградского (формулировка и математическая запись).
8. Алгоритм применения теоремы Гаусса–Остроградского.

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 2.1.** Заряды $q$ и $-4q$ находятся на расстоянии $l$ друг от друга. Найдите положение точки, где напряженность поля равна нулю.

**С 2.2.** В вершинах правильного шестиугольника со стороной $a$ = = 10 см расположены точечные заряды $q$, $2q$, $3q$, $4q$, $5q$, $6q$ ($q = 0{,}10$ мкКл). Найдите напряженность электростатического поля в центре шестиугольника. Ответ поясните рисунком.

**С 2.3.** Заряд $q$ = $15 \cdot 10^{-9}$ Кл равномерно распределен по тонкому кольцу радиуса $R$ = 0,2 м. Найти напряженность электростатического поля в точке, находящейся на оси кольца на расстоянии $h$ = 0,15 м от его центра.

**С 2.4.** Пользуясь принципом суперпозиции и результатами, полученными в предыдущей задаче, найдите напряженность поля бесконечной заряженной плоскости с поверхностной плотностью зарядов σ.

**С 2.5.** Найдите напряженность поля бесконечной плоскости, заряженной с поверхностной плотностью зарядов σ, пользуясь теоремой Гаусса. Сделайте выводы.

**С 2.6.** Две бесконечные плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma_1$ и $\sigma_2$ расположены параллельно друг другу. Найдите напряженность поля во всех частях пространства, нарисуйте силовые линии. Рассмотрите случаи $\sigma_2 = -\sigma_1$ и $\sigma_2 = \sigma_1$. Постройте графики зависимости напряженности $E_x = f(x)$. Ось $x$ перпендикулярна заряженным плоскостям.

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 2.1.** *Напряженность электрического поля на расстоянии* 10 см *от точечного заряда равна* 100 В/м. *Напряженность электрического поля на расстоянии* 20 см *равна…*

1) 400 В/м;
2) 200 В/м;
3) 50 В/м;
4) 25 В/м.

**Т 2.2.** *На рис. 52 показано расположение двух неподвижных точечных зарядов* + 2*q и* –*q*. *Модуль вектора напряженности электрического поля этих зарядов имеет*:

1) максимальное значение в точке *A*;
2) максимальное значение в точке *B*;
3) одинаковые значения в точках *A* и *C*;
4) одинаковые значения во всех трех точках.

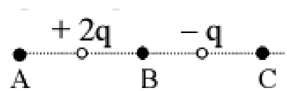



*Рис. 52*

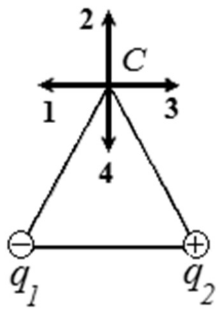



*Рис. 53*

**Т 2.3.** *Электрическое поле создано одинаковыми по величине точечными зарядами* $q_1$ *и* $q_2$, *лежащими в двух вершинах равностороннего треугольника* (рис. 53). *Если* $q_1 = -q$, $q_2 = +q$, *то вектор напряженности поля в точке С, лежащей в третьей вершине равностороннего треугольника, ориентирован в направлении…*

1) влево (1);
2) вверх (2);
3) вправо (3);
4) вниз (4);
5) напряженность равна 0.

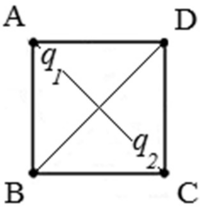



*Рис. 54*

**Т 2.4.** *В вершинах A и C квадрата ABCD находятся одноименные заряды* $q_1 = q, q_2 = 2q$ (рис. 54). *Если модуль напряженности заряда* $q_1$ *в центре квадрата равен E, то модуль напряженности суммарного поля двух зарядов в центре квадрата равен …*

1. $E$;
2. $2E$;
3. $3E$;
4. 0.

**Т 2.5.** *Сферическая замкнутая поверхность охватывает заряд* $q_1$. *Как изменится поток вектора напряженности, если радиус поверхности увеличится в два раза?*

1) уменьшится в 2 раза;
2) уменьшится в 4 раза;
3) возрастет в 2 раза;
4) возрастет в 4 раза;
5) не изменится.

**Т 2.6.** *Дана система точечных зарядов в вакууме и замкнутые поверхности* $S_1, S_2$ и $S_3$ (рис. 55). *Поток вектора напряженности электростатического поля* ***равен нулю*** *…*

1) через поверхности $S_1$ и $S_2$;
2) через поверхности $S_2$ и $S_3$;
3) только через поверхность $S_1$;
4) только через поверхность $S_2$;
5) только через поверхность $S_3$.

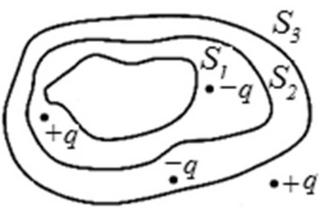



*Рис. 55*

**2.** Решите задачу № 2 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 3.

# 2.3. РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПОТЕНЦИАЛ. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ. СВЯЗЬ НАПРЯЖЕННОСТИ И ПОТЕНЦИАЛА (ЗАНЯТИЕ 3)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Работа сил электростатического поля.
2. Консервативные силы.
3. Потенциальное поле, вихревое поле.
4. Потенциал электрического поля, разность потенциалов (определение, формула, единицы измерения).
5. Потенциал поля точечного заряда (формула).
6. Принцип суперпозиции для потенциала (формулировка и математическая запись).
7. Связь между напряженностью и потенциалом.
8. Эквипотенциальные поверхности, их свойства.

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 3.1.** По тонкому кольцу радиуса $R$ равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\lambda$. Используя принцип суперпозиции, определите потенциал на оси кольца как функцию расстояния от центра.

**С 3.2.** Используя результат, полученный в предыдущей задаче (С 3.1), определите напряженность на оси кольца как функцию расстояния от центра. Сравните данный метод нахождения напряженности поля с методом, используемым при решении задачи С 2.3, сделайте выводы.

**С 3.3.** Электрическое поле образовано положительно заряженной бесконечной нитью с линейной плотностью заряда $\lambda = 0,2$ мкКл/м. Какую скорость получит электрон под действием поля, приблизившись к нити с расстояния $r_1 = 1$ см до расстояния $r_2 = 0,5$ см ?

**С 3.4.** Определите работу, которую совершают силы поля при перемещении заряда $q_0 = 1$ нКл из точки $A$ в точку $B$. При этом $r = 6$ см, $c = 8$ см, $q_1 = +3,33$ нКл, $q_2 = -3,33$ нКл, $\varphi_\infty = 0$.

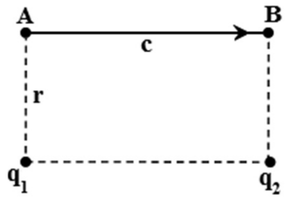



*Рис. 56*

**С 3.5.** При бомбардировке неподвижного ядра натрия $\alpha$-частицей сила отталкивания между ними достигла значения $F = 140$ Н. На какое наименьшее расстояние $r$ приблизилась $\alpha$-частица к ядру атома натрия? Какую начальную скорость $v_0$ имела $\alpha$-частица?

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

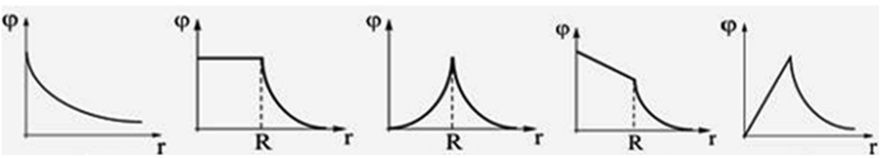
**Т 3.1.** *Потенциал поля в некоторой точке равен* 5 В. *Это значит, что в данной точке поля…*

1) на заряд в 1 Кл действует сила 5 Н;
2) на заряд в 5 Кл действует сила 1 Н;
3) потенциальная энергия заряда в 1 Кл равна 5 Дж.

**Т 3.2.** *В двух противоположных вершинах А и С квадрата ABCD со стороной* 6 см *находятся точечные заряды* $q_A$ = – 1,2 нКл *и* $q_C$ = = 1,6 нКл. *Потенциал электрического поля этих зарядов в вершине В равен…*

1) 60 В;
2) 420 В;
3) 1000 В.

**Т 3.3.** *Электростатическое поле создано положительно заряженной сферой радиуса R. Правильно отражает зависимость потенциала от расстояния r рис. 57 под буквой_____.*




*а* *б* *в* *г* *д*

*Рис. 57*

**Т 3.4.** *Найдите разность потенциалов между точками однородного поля, находящимися на силовой линии и удаленными друг от друга на* 5 м, *если напряженность этого поля* 2 В/м.

1) 0,4 В;
2) 2,5 В;
3) 10 В.

**Т 3.5.** *В электростатическом поле точечного заряда q из точки A в точки B, C, D и E перемещается один и тот же пробный заряд* (рис. 58). *Работа по перемещению заряда равна нулю на участках ...*

1) *AD* и *AE*;
2) *AC* и *AB*;
3) *AE* и *AC*;
4) *AD* и *AB*.

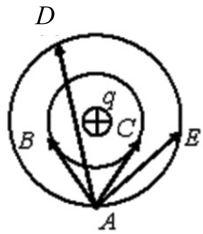


*Рис. 58*

**Т 3.6.** *На рис. 59 показаны эквипотенциальные поверхности системы зарядов и значения потенциала на них. Вектор напряженности электрического поля в точке A ориентирован в направлении…*

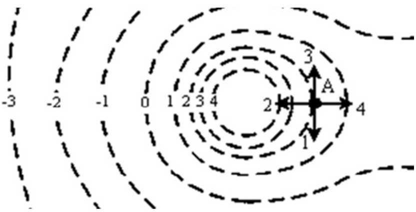


*Рис. 59*

1) 1;
2) 2;
3) 3;
4) 4.

**2.** Решите задачу № 3 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 4.

## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ (ЗАНЯТИЕ 4)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.
2. В чем состоит суть электростатической защиты?
3. Три основные группы диэлектриков, типы поляризации в них.
4. Электрическая емкость (определение, формула, единицы измерения).
5. От чего зависит емкость уединенного проводника?
6. Конденсатор (определение).
7. Емкость конденсатора (определение, формула), от чего зависит.

8. Плоский, сферический, цилиндрический конденсаторы, емкость конденсаторов разной формы (формула с выводом).

9. Соединения конденсаторов, емкость при параллельном и последовательном соединении конденсаторов (формула с выводом).

10. Энергия конденсатора (формулы).

11. Энергия электрического поля, плотность энергии электрического поля (формулы).

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 4.1.** Площадь каждой обкладки плоского конденсатора $S = 1\ \text{м}^2$, расстояние между ними $d = 5\ \text{мм}$, зазор между обкладками заполнен двухслойным диэлектриком $d_1 = 3\ \text{мм}$, $\varepsilon_1 = 2$ и $d_2 = 2\ \text{мм}$, $\varepsilon_2 = 3$. Найдите емкость конденсатора.

**С 4.2.** Конденсатор, заряженный до напряжения $U_1 = 100\ \text{В}$, соединяют параллельно с конденсатором такой же емкости, но заряженным до напряжения $U_2 = 200\ \text{В}$. Какое напряжение установится между обкладками? Какая энергия $W'$ израсходуется на образование искры в момент присоединения конденсаторов? Емкость конденсаторов $C = 1\ \text{нФ}$.

**С 4.3.** Плоский конденсатор в присутствии диэлектрика между его обкладками заряжают до разности потенциалов $U_1 = 1\ \text{кВ}$ и отключают от источника напряжения. Если удалить диэлектрик, разность потенциалов возрастает до $U_2 = 3\ \text{кВ}$. Какова диэлектрическая проницаемость диэлектрика?

**С 4.4.** Два одинаковых конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику постоянной ЭДС. Во сколько раз изменится разность потенциалов между обкладками в первом конденсаторе, если второй полностью погрузить в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$?

**С 4.5.** Лейденская банка емкостью $C = 3{,}3\ \text{нФ}$ заряжена до разности потенциалов $U = 20\ \text{кВ}$. Предполагая, что при разряде банки 10 % ее энергии рассеивается в виде звуковых и электромагнитных волн, определите количество выделившейся теплоты.

**С 4.6.** Найдите емкость системы конденсаторов, изображенной на рис. 60. Емкость каждого конденсатора $C = 1$ мкФ.

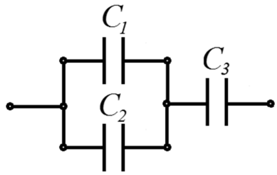


*Рис. 60*

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 4.1.** *Фарада* (Ф) *единица электрической емкости в системе СИ равна*:

1) Кл/В;
2) В/м;
3) В/Кл;
4) Дж/Кл.

**Т 4.2.** *При зарядке конденсатора одной из его пластин сообщают электрический заряд* +6 Кл, *на другой – индуцируется заряд* –6 Кл. *Если электроемкость конденсатора* 3 Ф, *то напряжение между его пластинами равно*:

1) 0 В;
2) 0,5 В;
3) 2 В;
4) 4 В;
5) 18 В.

**Т 4.3.** *На корпусе конденсатора написано* «50 мкФ, 300 В». *Какой максимально допустимый заряд можно сообщить данному конденсатору?*

1) 300 мкКл;
2) 50 мкКл;
3) 15 мкКл;
4) 15 мКл;
5) 6 МКл.

**Т 4.4.** *Плоский конденсатор*, ***заполненный диэлектриком***, *зарядили от источника постоянного напряжения и* ***отсоединили*** *от него. Если диэлектрик удалить из конденсатора, то разность потенциалов на обкладках конденсатора ...*

1) не изменится;

2) увеличится;
3) уменьшится.

**Т 4.5.** *Имеется плоский конденсатор, присоединенный к источнику постоянного напряжения. Какое из перечисленных действий приведет к уменьшению заряда на конденсаторе?*

1) увеличение площади пластин;
2) увеличение расстояния между пластинами;
3) увеличение диэлектрической проницаемости диэлектрика.

**Т 4.6.** *Плоский воздушный конденсатор отключили от источника напряжения, а затем увеличили расстояние между его обкладками. Что произойдет при этом с зарядом на обкладках конденсатора, электроемкостью конденсатора и его энергией? Каждой позиции из первого столбца поставьте в соответствие одну из позиций второго.*

| ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ | ИХ ИЗМЕНЕНИЕ |
|---|---|
| 1. Заряд конденсатора | A. Не изменится |
| 2. Электроемкость | B. Увеличится |
| 3. Энергия конденсатора | C. Уменьшится |

**2.** Решите задачу № 4 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 5.

## 2.5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА (ЗАНЯТИЕ 5)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Электрический ток (определение), условия существования электрического тока.
2. Сила тока, плотность тока (определения и единицы измерения).
3. Сопротивление проводника, удельное сопротивление (определения и единицы измерения), параллельное и последовательное соединение проводников.
4. Измерительные приборы, используемые в электрических цепях постоянного тока, способы их включения в цепь.
5. Условные обозначения элементов электрической цепи постоянного тока.

6. Сторонние силы и их роль в возникновении постоянного тока.
7. ЭДС источника, напряжение и разность потенциалов.
8. Законы Ома в интегральной и дифференциальной форме, правила Кирхгофа.
9. Работа и мощность постоянного тока.
10. Полная, полезная мощность и мощность потерь в электрической цепи.
11. Закон Джоуля–Ленца.
12. Коэффициент полезного действия цепи.

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 5.1.** Ток в проводнике меняется со временем по закону $I = 4 + 2t$, где все величины заданы в системе СИ. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 2$ с до $t_2 = 4$ с? При каком постоянном токе $I_0$ через поперечное сечение проводника за то же время проходит такое же количество электричества?

**С 5.2.** Цепь составлена из бесконечного числа ячеек, состоящих из трех одинаковых сопротивлений (рис. 61). Найдите общее сопротивление цепи, если $R = 1$ Ом.

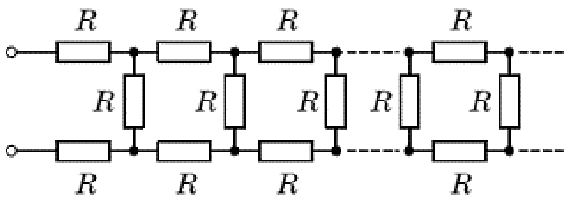



*Рис. 61*

**С 5.3.** Определите ток короткого замыкания для аккумуляторной батареи, если при токе нагрузки $I_1 = 5$ А она отдает во внешнюю цепь мощность $P_1 = 9{,}5$ Вт, а при токе нагрузки $I_2 = 8$ А мощность, выделяемая во внешней цепи, $P_2 = 14{,}4$ Вт.

**С 5.4.** Элемент замыкается один раз на сопротивление $R_1 = 4$ Ом, а в другой раз на сопротивление $R_2 = 9$ Ом. И в том и в другом случае количество теплоты, выделившееся на сопротивлениях за одно и то же время, оказывается одинаковым. Каково внутреннее сопротивление элемента?

**С 5.5.** Определите силу тока в цепи и сопротивление аккумулятора с ЭДС $\varepsilon = 2,2$ В, если при нагрузке $R = 0,5$ Ом, КПД $\eta = 65\,\%$.

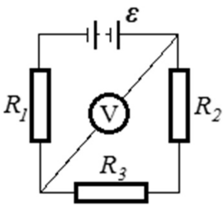



*Рис. 62*

**С 5.6** Сопротивления $R_1 = R_2 = R_3 = 200$ Ом, сопротивление вольтметра $R_V = 1$ кОм (рис. 62). Вольтметр показывает разность потенциалов $U = 100$ В. Найдите ЭДС батареи. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 5.1.** *Электрический ток это – ...*

1) направленное движение электрических зарядов от меньшего потенциала к большему;

2) направленное движение электрических зарядов;

3) направленное движение электрических зарядов при одинаковых потенциалах на концах проводника;

4) произвольное движение электрических зарядов внутри атомной решетки проводника.

**Т 5.2.** *На рис. 63 показана зависимость силы тока в электрической цепи от времени. Заряд, прошедший по проводнику в интервале от* 5 *до* 10 с, *равен…*

1) 50 мКл;
2) 75 мКл;
3) 100 мКл;
4) 125 мКл.

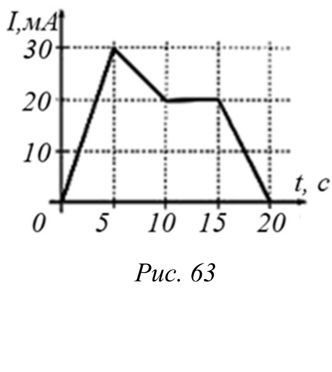



*Рис. 63*

**Т 5.3.** *В участке цепи, изображенном на рис. 64, сопротивление каждого из резисторов равно* 2 Ом. *Полное сопротивление участка равно…*

1) 8 Ом;
2) 6 Ом;
3) 5 Ом;
4) 4 Ом.

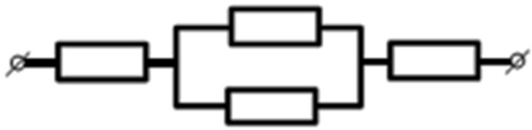


*Рис. 64*

**Т 5.4.** *Два проводника равной длины, изготовленные из одного материала, имеют разные сечения* ( $S_1 > S_2$ ). *Проводники последовательно включены в цепь. Напряжение на концах проводника…*

1) больше в проводнике сечением $S_1$;

2) больше в проводнике сечением $S_2$;

3) одинаково в обоих проводниках.

**Т 5.5.** *Закон Ома в дифференциальной форме имеет вид* $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.

*Выберите **неверное** утверждение*:

1) $j$ – плотность тока;

2) $\sigma$ – удельное сопротивление;

3) $\vec{E}$ – напряженность поля в проводнике.

**Т 5.6.** *Падение напряжения на внешней нагрузке сопротивления* 6 Ом *равно* 18 В. *Чему равна электродвижущая сила источника, если его внутреннее сопротивление составляет величину* 4 Ом?

1) 6 В;
2) 12 В;
3) 18 В;
4) 24 В;
5) 30 В.

**Т 5.7.** *В соответствии со вторым правилом Кирхгофа в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС, действующих в данном контуре, равна …*

1) алгебраической сумме падений напряжений на всех сопротивлениях в этом контуре;

2) алгебраической сумме всех токов контура;

3) алгебраической сумме всех сопротивлений контура.

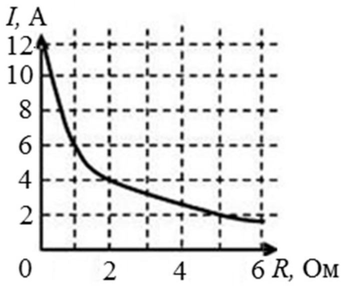



*Рис. 65*

**Т 5.8.** *На рис. 65 представлены результаты экспериментального исследования силы тока в цепи от значения сопротивления R, подключенного к источнику постоянного тока. КПД источника (в процентах) при сопротивлении R =* = 4 Ом *составляет* ____________ .

(*Найдите правильное значение* ***в процентах***).

**2.** Решите задачу № 5 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 6.

## 2.6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ИНДУКЦИЯ И НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЗАКОН БИО–САВАРА–ЛАПЛАСА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ (ЗАНЯТИЕ 6)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Магнитное поле (определение), источник магнитного поля, релятивистский характер магнитного поля.
2. Вектор магнитной индукции (определение, единицы измерения).
3. Определение экспериментальным способом значения вектора магнитной индукции в данной точке пространства.
4. Напряженность магнитного поля (определение, единицы измерения).
5. Связь между напряженностью и индукцией магнитного поля.
6. Линии магнитной индукции (их свойства).
7. Вихревой характер магнитного поля.
8. Однородное магнитное поле.
9. Магнитное поле движущегося заряда (величина и направление).
10. Принцип суперпозиции для магнитного поля.
11. Закон Био–Савара–Лапласа (формулировка, смысл величин, входящих в выражение закона).

12. Магнитное поле бесконечного, прямого проводника с током (величина, направление).

13. Магнитное поле кругового тока (величина, направление).

14. Магнитное поле на оси соленоида (величина, направление).

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 6.1.** На рис. 66 изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояние между проводниками $AB = 10$ см, токи $I_1 = 20$ А и $I_2 = 30$ А. Найдите напряженность магнитного поля, вызванного токами $I_1$ и $I_2$, в точках $M_1, M_2$ и $M_3$. Расстояние $M_1A = 2$ см, $AM_2 = 4$ см и $BM_3 = 3$ см.

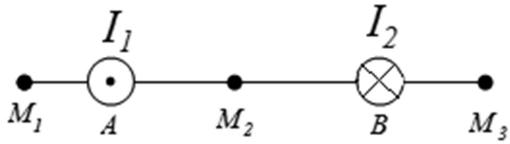



*Рис. 66*

**С 6.2.** Два прямолинейных длинных проводника расположены параллельно на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. По проводникам текут токи $I_1 = I_2 = 5$ А в противоположных направлениях. Найдите модуль и направление вектора индукции магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии $a = 10$ см от каждого проводника.

**С 6.3.** Четыре прямых бесконечно длинных проводника с одинаково направленными токами по $I = 10$ А расположены в вершинах квадрата со стороной $a = 20$ см. Определите напряженность магнитного поля в середине одной из сторон.

**С 6.4.** По контуру, изображенному на рис. 67, идет ток силой $I = 10$ А. Определите магнитную индукцию в точке *O*, если радиус дуги $R = 10$ см, угол φ = 60º.

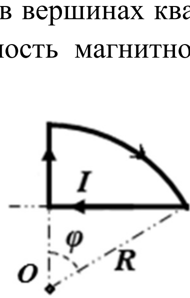



*Рис. 67*

**С 6.5.** Два круговых витка радиусом $R = 4$ см каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. По виткам текут токи $I_1 = I_2 = 2$ А. Найдите индукцию магнитного поля на оси витков в точке, находящейся на равном расстоянии от них. Задачу решить, когда: а) токи в витках текут в одном направлении; б) токи в витках текут в противоположных направлениях.

**С 6.6.** Рассмотрите подходы к нахождению магнитного поля в точке $O$ проводников с токами $I$, форма которых приведена на рис. 68.

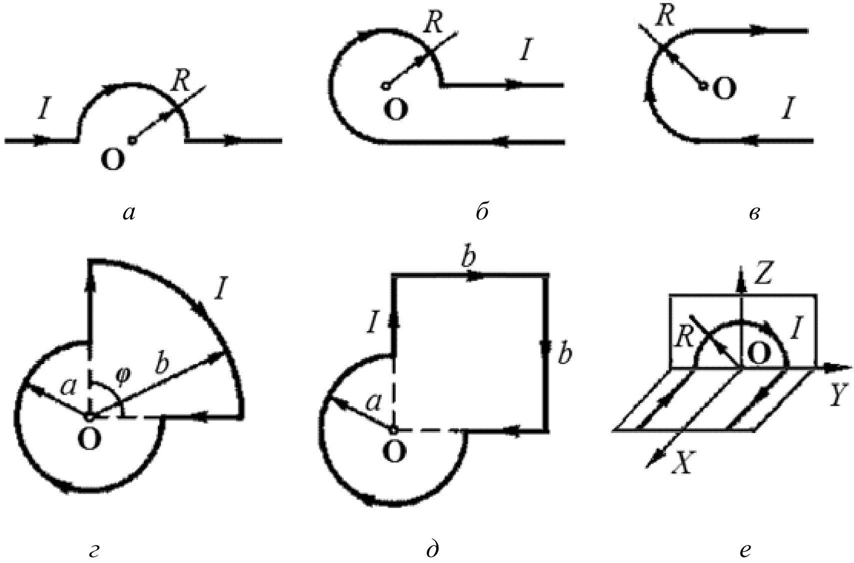



*Рис. 68*

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 6.1.** *Магнитное поле создается…*
1) как покоящимися, так и движущимися электрическими зарядами;
2) только неподвижными зарядами;
3) только движущимися зарядами;
4) только проводниками;

5) только диэлектриками

6) только магнитами.

**Т 6.2.** *На рис. 69 изображен вектор скорости движущегося электрона. Вектор индукции магнитного поля, создаваемого в точке С электроном при его движении, имеет направление…*

1) снизу вверх (↑);
2) сверху вниз (↓);
3) слева направо (→);
4) справа налево (←);
5) из плоскости рисунка (·);
6) в плоскость рисунка (×).

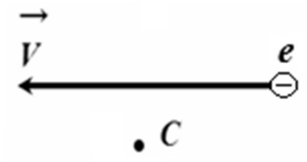



*Рис. 69*

**Т 6.3.** *На рис. 70 изображены сечения двух бесконечных проводников с токами* $I_1$ *и* $I_2$*, которые в точке О создают магнитные поля с индукцией* $\vec{B}_1$ *и* $\vec{B}_2$*. Укажите направление токов в проводниках*:

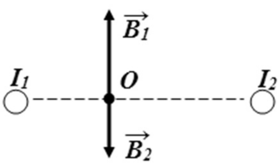



*Рис. 70*

1) оба тока $I_1$ и $I_2$ из плоскости рисунка;
2) оба тока $I_1$ и $I_2$ в плоскость рисунка;
3) $I_1$ из плоскости рисунка $I_2$ в плоскость рисунка;
4) $I_1$ в плоскость рисунка $I_2$ из плоскости рисунка.

**Т 6.4.** *Магнитное поле создано двумя параллельными длинными проводниками с токами* $I_1$ *и* $I_2$*, расположенными перпендикулярно плоскости чертежа* (рис. 71). *Если* $I_2 = 2I_1$*, то вектор индукции результирующего поля в точке А направлен…*

1) вправо →;
2) влево ←;
3) вниз ↓;
4) вверх ↑;
5) $B = 0$.

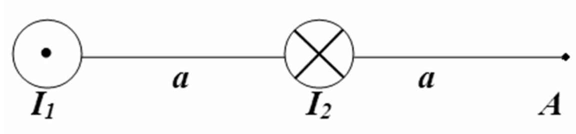



*Рис. 71*

**Т 6.5.** *На рис. 72 изображены сечения двух параллельных, бесконечно длинных проводников с токами* $I_1$ *и* $I_2$, *причем* $I_1 = 2I_2$. *Вектор индукции результирующего поля в некоторой точке равен нулю. Эта точка находится на участке…*

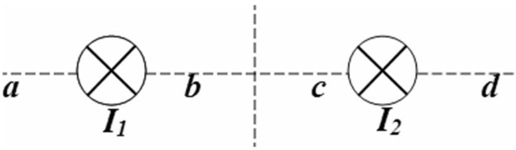



*Рис. 72*

1) *a*;
2) *b*;
3) *c*;
4) *d*;
5) такой точки не существует.

**Т 6.6.** *При наложении двух однородных магнитных полей с магнитными индукциями соответственно* 0,3 Тл *и* 0,4 Тл *друг на друга так, что силовые линии полей взаимно перпендикулярны, модуль магнитной индукции результирующего поля равен…*

1) 0,1 Тл;
2) 0,3 Тл;
3) 0,4 Тл;
4) 0,5 Тл;
5) 0,7 Тл.

**2.** Решите задачу № 6 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 7.

## 2.7. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ И ПРОВОДНИКИ С ТОКОМ. СИЛА ЛОРЕНЦА. СИЛА АМПЕРА (ЗАНЯТИЕ 7)

**Вопросы для подготовки к занятию**

1. Сила Лоренца (определение, формула), как определяется направление силы Лоренца.
2. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если ее скорость направлена параллельно линиям магнитной индукции?
3. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если ее скорость направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции?

4. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если ее скорость направлена под произвольным углом к линиям магнитной индукции?

5. Совершает ли работу сила Лоренца, что это значит?

6. Сила Ампера (определение, формула), как определяется направление силы Ампера.

7. Объясните, почему два параллельных проводника, по которым текут токи одного направления, притягиваются, а токи противоположного направления – отталкиваются.

8. Когда магнитное поле не действует на проводники с током?

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 7.1.** Определите силу, действующую на электрон в момент, когда он пересекает под прямым углом ось длинного соленоида в непосредственной близости от его конца. Сила тока в соленоиде $I = 2$ А, число витков на единицу длины $n = 3000\ \text{м}^{-1}$. Скорость электрона $v = 3 \cdot 10^7$ м/с. Магнитную проницаемость среды принять равной единице.

**С 7.2.** В однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}001$ Тл перпендикулярно его силовым линиям влетает $\alpha$-частица. По какой траектории будет двигаться частица, если она прошла ускоряющую разность потенциалов $U = 300$ В? Определите характерный параметр траектории частицы.

**С 7.3.** Протон и электрон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Сравните радиусы окружностей, которые описывают частицы, если у них: а) одинаковые скорости; б) одинаковые энергии.

**С 7.4.** Электрон, обладающий скоростью $v$, попадает в однородное магнитное поле, индукция которого составляет некоторый угол $\alpha$ к направлению скорости. Определите параметры траектории.

**С 7.5.** Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}01$ Тл. По проводу длиной $L = 70$ см, помещенному перпендикулярно к направлению магнитного поля, течет ток $I = 10$ А. Найдите силу $F$, действующую на провод.

**С 7.6.** Металлический стержень длиной $a = 15$ см расположен перпендикулярно бесконечно длинному прямому проводу, по которому течет ток $I_1 = 2$ А. Найдите силу, действующую на стержень со стороны магнитного поля, создаваемого проводом, если по стержню пропустить ток $I_2 = 0{,}5$ А, расстояние от провода до ближайшего конца стержня $b = 5$ см.

**С 7.7.** В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}5$ Тл движется равномерно проводник длиной $l = 10$ см. По проводнику течет ток $I = 2$ А. Скорость движения проводника $v = 20$ см/с и направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найдите работу $A$ перемещения проводника за время $t = 10$ с и мощность $P$, затраченную на это перемещение.

**С 7.8.** Небольшая катушка, по которой течет ток $I = 1$ А, помещена в однородное магнитное поле так, что ее ось совпадает с направлением поля. Катушка выполнена из медной проволоки $d = 1$ мм, радиус витков $R = 100$ мм. При каком значении индукции магнитного поля обмотка катушки может быть разорвана? Прочность меди на разрыв $\sigma_р = 230$ МПа.

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 7.1.** *Определите направление силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле* (рис. 73)…

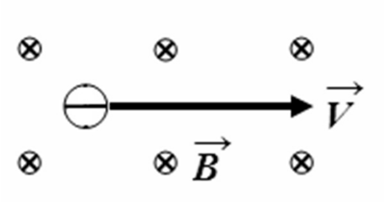



*Рис. 73*

1) слева направо (→);
2) справа налево (←);
3) снизу вверх (↑);
4) сверху вниз (↓);
5) из плоскости рисунка (·);
6) в плоскость рисунка (×);
7) сила Лоренца равна нулю.

**Т 7.2.** *Однозарядные ионы, имеющие одинаковые скорости, влетают в однородное магнитное поле. Их траектории показаны на рис. 74. Наименьшую массу имеет ион, движущийся по траектории ...*

1) 1;
2) 2;
3) 3;
4) характеристики траектории не зависят от массы частицы.

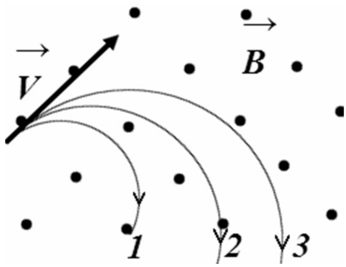



*Рис. 74*

**Т 7.3.** *На рис. 75 показаны траектории заряженных частиц, имеющих одинаковую скорость и влетающих в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости чертежа. При этом для частицы 3…*

1) $q = 0$;
2) $q > 0$;
3) $q < 0$.

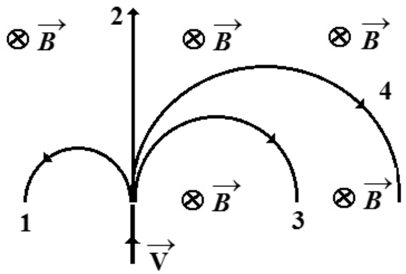



*Рис. 75*

**Т 7.4.** *Как изменится радиус кривизны траектории движения заряженной частицы в масс-спектрографе при увеличении в 2 раза скорости частицы и уменьшении в 2 раза индукции магнитного поля?*

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

**Т 7.5.** *Два параллельных проводника, по которым текут токи в одинаковом направлении ...*

1) не взаимодействуют;
2) притягиваются;
3) отталкиваются;
4) могут и притягиваться, и отталкиваться.

**Т 7.6.** *На рис. 76 изображен проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией* $\vec{B}$, *направленное перпендикулярно плоскости чертежа. Укажите правильную комбинацию направления тока в проводнике и вектора силы Ампера*:

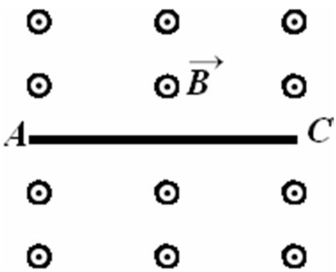



*Рис. 76*

1) ток в направлении $\boldsymbol{A \to C}$, сила Ампера – в плоскость рисунка;
2) ток в направлении $\boldsymbol{A \to C}$, сила Ампера – из плоскости рисунка;
3) ток в направлении $\boldsymbol{A \to C}$, сила Ампера – снизу вверх;
4) ток в направлении $\boldsymbol{A \to C}$, сила Ампера – сверху вниз.

**2.** Решите задачу № 7 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к семинарскому занятию 8.

## 2.8. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЗАКОН ФАРАДЕЯ. ЭДС САМОИНДУКЦИИ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (ЗАНЯТИЕ 8)

### Вопросы для подготовки к занятию

1. Явление электромагнитной индукции (определение, закон). Индукционный ток. Правило Ленца.
2. Явление самоиндукции (определение, закон).
3. Индуктивность (определение, единицы измерения, от чего зависит).
4. Индуктивность бесконечного соленоида (формула).

5. Токи при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность.

6. Взаимная индукция.

7. Энергия магнитного поля, плотность энергии.

**Задачи для решения на семинарском занятии**

**С 8.1.** На рис. 77 изображен плоский контур, помещенный в однородное магнитное поле, направленное в плоскость чертежа. Укажите направление тока, возникающего в контуре, если: а) $\vec{B}$ растет, б) $\vec{B}$ уменьшается, в) контур растягивается, г) контур сжимается, д) контур поворачивается таким образом, что его плоскость становится перпендикулярной плоскости чертежа.

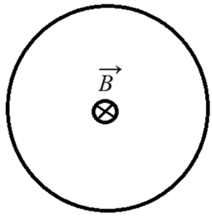



*Рис. 77*

**С 8.2.** Катушка диаметром $D = 10$ см, состоящая из $N = 500$ витков проволоки, находится в магнитном поле, ось катушки параллельна линиям магнитной индукции. Найдите среднюю ЭДС индукции, возникающую в этой катушке, если индукция магнитного поля увеличивается за $\Delta t = 0{,}1$ с от 0 до 2 Тл.

**С 8.3.** В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. При этом прошел заряд $Q = 50$ мкКл. Определите изменение магнитного потока через кольцо, если сопротивление цепи гальванометра $R = 10$ Ом.

**С 8.4.** На соленоид длиной $l = 40$ см и площадью поперечного сечения $S = 20\ \text{см}^2$ надет проволочный виток того же сечения. Соленоид имеет $N = 500$ витков, и по нему идет ток $I = 2{,}0$ А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке при уменьшении тока в соленоиде до нуля в течение $\Delta t = 1{,}0$ мс?

**С 8.5.** Скорость самолета с реактивным двигателем $v = 950$ км/ч. Найдите разность потенциалов, возникающую на концах крыльев самолета, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли $H_в = 39{,}8$ А/м, а размах крыльев самолета $l = 12{,}5$ м.

**С 8.6.** В магнитном поле, индукция которого $B = 0,05$ Тл, вращается стержень длиной $l = 1$ м с угловой скоростью $\omega = 20$ рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах стержня.

**С 8.7.** Тороидальная катушка содержит $N = 500$ витков. Найдите энергию магнитного поля, если при токе $I = 2,0$ А магнитный поток через поперечное сечение тора равен $\Phi = 1$ мВб.

**С 8.8.** Через катушку, индуктивность которой $L = 21$ мГн, течет ток, изменяющийся со временем по закону $I = I_0 \sin\omega t$, где $I_0 = 5$ А, $\omega = 2\pi / T$ и $T = 0,02$ с. Найдите зависимость от времени: а) ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке; б) энергии $W$ магнитного поля катушки.

**Задание на дом**

**1.** Ответьте на вопросы тестовых заданий.

**Т 8.1.** *Установите соответствие между физической величиной и ее единицей измерения в системе СИ.*

| | |
|---|---|
| 1) Индукция магнитного поля | A. Гаусс |
| 2) Индуктивность | B. Тесла |
| 3) Магнитный поток | C. Вебер |
| | D. Генри |

**Т 8.2.** *Контур площадью* 100 см$^2$ *находится в однородном магнитном поле с индукцией* 2 Тл. *Чему равен магнитный поток, пронизывающий контур, если плоскость контура параллельна вектору магнитной индукции?*

1) 200 Вб;
2) 2 Вб;
3) $2 \cdot 10^{-2}$ Вб;
4) 0 Вб.

**Т 8.3.** *ЭДС индукции возникает в замкнутом проводящем контуре…*

1) если он находится в магнитном поле;
2) если магнитный поток, пронизывающий контур, отличен от нуля;
3) если магнитный поток, пронизывающий контур, изменяется с течением времени;
4) если магнитный поток, пронизывающий контур, больше нуля.

**Т 8.4.** *На рис. 78 представлен график зависимости магнитного потока, пронизывающего некоторый замкнутый контур, от времени. Модуль ЭДС индукции в контуре максимален на временном интервале…*

1) (0…1) с;
2) (1…2) с;
3) (2…3) с;
4) (3…4) с;
5) (4…5) с.

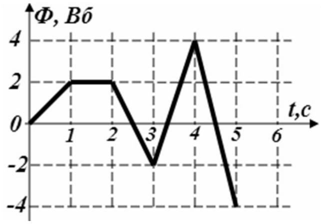



*Рис. 78*

**Т 8.5.** *Проволочное кольцо находится в меняющемся со временем магнитном поле. Положение кольца, направление магнитной индукции и характер ее изменения показаны на рис. 79. Укажите направление тока, наводимого в кольце.*

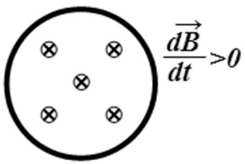



*Рис. 79*

1) по часовой стрелке;
2) против часовой стрелки;
3) ток индуцироваться не будет.

**Т 8.6.** *На рис. 80 показана зависимость силы тока от времени в электрической цепи индуктивностью* 1 мГн. *Модуль среднего значения ЭДС самоиндукции в интервале от* 0 *до* 5 с *равен…*

1) 0 В;
2) 2 мкВ;
3) 4 мкВ;
4) 6 мкВ;
5) 10 мкВ;
6) 20 мкВ.

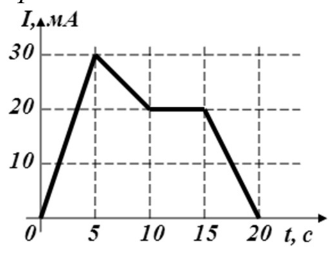



*Рис. 80*

**Т 8.7.** *Через контур индуктивностью* $L$ = 0,02 Гн *течет ток, изменяющийся по закону* $I$ = 0,5 sin 500$t$ А. *Максимальное значение ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре, равно…*

1) 0,01 В;
2) 0,5 В;
3) 5 В;
4) 500 В.

**Т 8.8.** *На катушке с сопротивлением* 10 Ом *поддерживается напряжение* 50 В. *Чему равна энергия магнитного поля, запасенная в катушке, если ее индуктивность* 20 мГн?

1) 200 мДж;
2) 250 мДж;
3) 500 мДж;
4) 2 Дж;
5) 2,50 Дж.

**2.** Решите задачу № 8 расчетно-графического задания.

**3.** Подготовьтесь к итоговому семинарскому занятию.

## 2.9. ИТОГОВОЕ ЗАНЯТИЕ. ПРОВЕДЕНИЕ ЗАЧЕТНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

**Вопросы для подготовки к занятию**

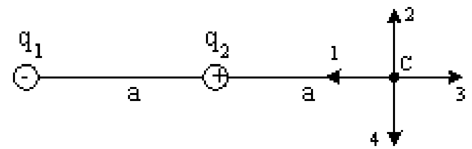
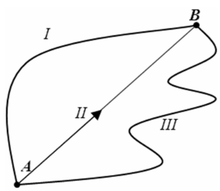
1. *Электростатика*. При подготовке к тесту по вопросам данного раздела необходимо обратить внимание на фундаментальные свойства электрического заряда, знать силовую и энергетическую характеристику электрического поля (напряженность и потенциал) и связь между ними. Уметь применять принцип суперпозиции для вычисления напряженности и потенциала системы точечных зарядов, по заданной картине силовых линий, делать выводы об изменении величин напряженности и потенциала поля от точки к точке. Уметь анализировать информацию, представленную в виде графика, рисунка. Знать понятие потока и циркуляции электрического поля. Знать и уметь применять теорему Гаусса–Остроградского. Уметь рассчитывать работу электростатического поля. Знать особенности поведения проводников и диэлектриков в электрическом поле. Ориентироваться в вопросах, касающихся электроемкости, конденсаторов, соединения конденсаторов, энергии и плотности энергии электрического поля.

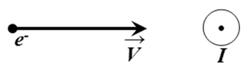
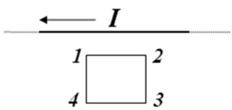
2. *Постоянный электрический ток*. Знать определение силы тока, плотности тока; законы Ома и правила Кирхгофа; сопротивление при последовательном и параллельном соединении проводников; закон Джоуля–Ленца; работу и мощность тока, КПД цепи. Уметь применять эти знания в условиях конкретной задачи, анализировать информацию, представленную в виде графика, рисунка.

3. *Магнетизм.* Знать вектор магнитной индукции, напряженность магнитного поля; правило нахождения направления вектора магнитной индукции и напряженности поля прямолинейного проводника с током, кругового витка с током в произвольной точке поля; принцип суперпозиции полей; силу Ампера и силу Лоренца; правило нахождения направления сил Ампера и Лоренца, радиус окружности, по которой движется частица в магнитном поле. Знать определение магнитного потока, явление электромагнитной индукции, закон Фарадея для электромагнитной индукции, явление самоиндукции, формулу для ЭДС самоиндукции, индуктивность. Уметь находить направление возникающего индукционного тока. Уметь извлекать информацию из графика, делать вывод о характере изменения искомой величины. Знать типы и свойства магнетиков и их поведение в магнитном поле. Знать законы электростатики и электромагнетизма, обобщением которых являются уравнения Максвелла. Уметь воспринимать информацию, представленную в виде уравнений.

## Пример варианта зачетного теста

| | | |
|---|---|---|
| **1** | Как формулируется закон сохранения электрического заряда? | 1) алгебраическая сумма зарядов в консервативной системе тел постоянна;<br>2) электрический заряд любого тела является величиной постоянной;<br>3) алгебраическая сумма зарядов тел величина постоянная;<br>4) алгебраическая сумма зарядов изолированной системы постоянна |
| | | |
| **2** | Как изменится сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов при **уменьшении** расстояния между ними в 3 раза? | 1) возрастет в 3 раза;<br>2) уменьшится в 3 раза;<br>3) уменьшится в 9 раз;<br>4) увеличится в 9 раз;<br>5) не изменится |

| | | |
|---|---|---|
| **3** | Электростатическое поле создано одинаковыми по величине точечными зарядами $q_1$ и $q_2$. Если $q_1 = -q$, $q_2 = +q$, а расстояние между зарядами и от $q_2$ до точки *C* равно *a*, то вектор напряженности поля в точке *C* ориентирован в направлении…<br> | 1) влево 1;<br>2) вправо 3;<br>3) вверх 2;<br>4) вниз 4;<br>5) напряженность равна 0 |
| | | |
| **4** | Точечный заряд $+q$ находится в центре сферической поверхности. Если заряд сместить из центра сферы, оставляя его внутри нее, то поток вектора напряженности электростатического поля $\vec{E}$ через поверхность… | 1) не изменится;<br>2) увеличится;<br>3) уменьшится |
| | | |
| **5** | <br>α-частица перемещается в однородном электростатическом поле из точки ***A*** в точку ***B*** по траекториям ***I***, ***II*** и ***III***. При движении по какой из траекторий работа электростатического поля будет наибольшей? | 1) по траектории ***I***;<br>2) по траектории ***II***;<br>3) по траектории ***III***;<br>4) работа сил электростатического поля по траекториям ***I***, ***II***, ***III*** одинакова |
| | | |
| **6** | Электрическое поле внутри диэлектрика... | 1) равно нулю;<br>2) равно внешнему;<br>3) меньше внешнего;<br>4) больше внешнего |
| | | |
| **7** | **Присоединенный к источнику** постоянного напряжения плоский **воздушный конденсатор** имеет на обкладках разность потенциалов ***U***. Если расстояние между обкладками конденсатора увеличить, разность потенциалов на обкладках конденсатора … | 1) не изменится;<br>2) увеличится;<br>3) уменьшится |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **8** | Два резистора $R_1 = 20$ Ом и $R_2 = 30$ Ом соединены последовательно. Вольтметр, подключенный к первому резистору, показывает 25 В. Напряжение на втором резисторе равно: | | 1) 15 В;<br>2) 25 В;<br>3) 25,5 В;<br>4) 37,5 В |
| | | | |
| **9** | Какова единица измерения **магнитной проницаемости** в СИ? | | 1) тесла;<br>2) вебер;<br>3) генри;<br>4) ампер на метр;<br>5) среди представленных ответов нет правильного |
| | | | |
| **10** | Индукция магнитного поля в центре кругового витка с током ***I***, радиусом ***R*** вычисляется по формуле…<br>A: $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R^2}$<br>B: $B = \frac{\mu\mu_0}{2}\frac{I}{R}$<br>C: $B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I}{R}$<br>D: $B = \frac{I}{2\pi R}$ | | 1) A;<br>2) B;<br>3) C;<br>4) D |
| | | | |
| **11** | Вблизи длинного проводника с током ***I***, расположенного перпендикулярно плоскости рисунка, пролетает электрон со скоростью $\vec{V}$ . Сила Лоренца направлена… |   | 1) снизу вверх (↑);<br>2) сверху вниз (↓);<br>3) слева направо (→);<br>4) справа налево (←);<br>5) из плоскости рисунка (·);<br>6) в плоскость рисунка (×);<br>7) сила Лоренца равна нулю |
| **12** | Сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле, называется … | | 1) силой Кулона;<br>2) силой Ампера;<br>3) силой Лоренца |
| | | | |
| **13** | На рисунке показан проводник, в одной плоскости с которым находится небольшая проводящая рамка. При **включении** тока заданного направления в рамке индукционный ток … |   | 1) не возникает;<br>2) возникает в направлении 1–2–3–4;<br>3) возникает в направлении 4–3–2–1 |

Окончание таблицы

| | | |
|---|---|---|
| **14** | Напряженность магнитного поля возросла в два раза. Как изменилась объемная плотность энергии?<br><br>Ферромагнетики отсутствуют. | 1) не изменилась;<br>2) возросла в 2 раза;<br>3) уменьшилась в 2 раза;<br>4) возросла в 4 раза;<br>5) уменьшилась в 4 раза |
| **15** | К веществам, усиливающим магнитное поле, относятся … | 1) любые магнетики;<br>2) только диамагнетики;<br>3) только парамагнетики;<br>4) только ферромагнетики;<br>5) диа- и парамагнетики;<br>6) пара- и ферромагнетики |

<table>
<tr><td rowspan="6">16</td><td colspan="3">Полная система уравнений Максвелла для электромагнитного поля имеет вид…</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\oint\limits_{(L)} \vec{E}\,d\vec{l} = -\int\limits_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,d\vec{S}$</td><td>$\oint\limits_{(L)} \vec{H}\,d\vec{l} = \int\limits_{(S)} \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) d\vec{S}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\oint\limits_{(S)} \vec{D}\,d\vec{S} = \int\limits_{(V)} \rho dV$</td><td>$\oint\limits_{(S)} \vec{B}\,d\vec{S} = 0$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Следующая система уравнений справедлива для переменного электромагнитного поля …</td><td rowspan="3">1) в отсутствие заряженных тел и токов проводимости;<br>2) при наличии заряженных тел и токов проводимости;<br>3) в отсутствие заряженных тел;<br>4) в отсутствие токов проводимости</td></tr>
<tr><td>$\oint\limits_{(L)} \vec{E}\,d\vec{l} = -\int\limits_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,d\vec{S}$</td><td>$\oint\limits_{(L)} \vec{H}\,d\vec{l} = \int\limits_{(S)} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\,d\vec{S}$</td></tr>
<tr><td>$\oint\limits_{(S)} \vec{D}\,d\vec{S} = 0$</td><td>$\oint\limits_{(S)} \vec{B}\,d\vec{S} = 0$</td></tr>
</table>

# 3. МАТЕРИАЛ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ

## 3.1. ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Общей физики

**РГЗ**
**по физике**

**ВАРИАНТ №__**
(номер варианта определяется последней цифрой номера зачетной книжки)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |

Выполнил: студент АВТФ
Иванов Петр Иванович
(Ф.И.О. – без сокращений)

зачетная книжка №______
группа ФБИ-81(82)

Проверил: _______________

___________________________

**Новосибирск 20___**

## 3.2. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ И РЕШЕНИЯ РГЗ

**1.** Расчетно-графическое задание выполняется гелиевой или шариковой ручкой. В работе допускается использование чернил синего, фиолетового или черного цвета. Графики и рисунки аккуратно выполняются остро отточенным карандашом с использованием линейки и циркуля. Для замечаний преподавателя следует оставлять поля не менее 30 мм.

**2.** РГЗ выполняется на листах формата А4, каждая задача – на отдельном листе. На титульном листе РГЗ приводятся сведения по образцу, представленному выше. Подробные примеры решения задач приведены в разделе 1 «Краткая теория с примерами решения задач». Прежде чем приступать к решению задач, обязательно прочитайте данный раздел.

**3.** При оформлении РГЗ **условия задач записываются полностью, без сокращений**.

**4.** Решение задачи необходимо начинать с **внимательного чтения условия**. При первом же чтении следует определить, на какую тему, о каком конкретном процессе или состоянии идет речь, каким законам он подчиняется, какими параметрами его можно охарактеризовать.

**5.** Далее следует записать краткое условие задачи: что «дано», что «найти». Все величины необходимо выражать в единицах **СИ**.

**6.** Для того чтобы представить взаимодействие тел, их расположение, следует **непременно сделать схематический чертеж**, на котором показать заданные расстояния, векторы действующих сил и других векторных величин, о которых идет речь в задаче.

**7.** В решении необходимо записать уравнения или формулы законов, описывающих процессы и явления, о которых идет речь в задаче. **Составление системы уравнений, полностью отражающих конкретную ситуацию, физический процесс, является основной трудностью при решении задачи.**

- Исходные уравнения следует записывать в векторной форме (если речь идет о векторных уравнениях), а затем в скалярной виде.

- Если при решении задачи применяется формула, не выражающая собой основной закон (например, закон Кулона, законы сохранения) или являющаяся хорошо известным следствием этих законов, то ее необходимо вывести.

- Символическую запись законов, используемых для решения задачи, следует сопровождать разъяснениями буквенных обозначений, формулировкой законов и условий, гарантирующих выполнение этих законов.

**8.** Вывод расчетной формулы следует осуществлять в общем виде. Решить задачу в общем виде – значит выразить искомую величину через те величины, которые заданы в условии задачи или справочных таблицах.

**9.** Полученную расчетную формулу необходимо проверить по размерности. Получение адекватных единиц измерения искомой величины служит одним из важнейших критериев правильности решения задачи.

**10.** Вычисление искомой величины следует осуществлять с учетом правил приближенных вычислений (приведены ниже).

**11.** После получения численного значения необходимо оценить реальность (правдоподобность) полученного результата исходя из соображений здравого смысла (встречаются ли в действительности такие численные значения искомой величины).

**12.** Последний этап решения – запись результата (буквенное обозначение, численное значение и единицы измерения).

## 3.3. О ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

**Значащими цифрами** числа называют все цифры числа, кроме нулей слева. Например, в числе 3,25 три значащие цифры, 0,0325 – три значащие цифры, 0,030025 – пять значащих цифр, 3,00 – три значащие цифры.

Выполняя вычисления, всегда необходимо помнить о той точности, которую нужно или которую можно получить. Недопустимо вести вычисления с большой точностью, если данные задачи не допускают или не требуют этого. В настоящее время в распоряжении студентов имеются различные счетно-вычислительные машины, которые при вычислениях дают результаты с большим числом значащих цифр. Часто студенты в своих работах по неопытности допускают ошибку, добиваясь при вычислениях результатов такой степени точности, которая не оправдывается точностью используемых данных. Для того чтобы не повторить этой ошибки, при решении задач следует придерживаться правил приближенных вычислений.

*Правила округления*

1. Если первая отбрасываемая цифра больше 5 или 5 с последующими цифрами, не равными нулю, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу. Например, число 3,56317 при округлении до десятых дает 3,6.

2. Если первая отбрасываемая цифра меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не изменяется. Например, число 3,56317 при округлении до сотых дает 3,56.

3. Если первая отбрасываемая цифра 5 и за ней либо нет цифр, либо есть одни нули, то последняя сохраняемая цифра должна быть четной. Например, число 3,5500 при округлении до десятых дает 3,6; $3{,}85 \approx 3{,}8$.

*Основные правила приближенных вычислений*

1. **При сложении и вычитании** результат округляется так, чтобы он не имел значащих цифр в тех разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одной из заданных величин; например, $7{,}852 + 3{,}18 - 4{,}3 = 6{,}732 \approx$ $\approx$ **6,7** (результат округлен до десятых по числу 4,3).

2. **При умножении** сомножители округляются так, чтобы каждый содержал столько значащих цифр, сколько их имеет сомножитель с наименьшим их числом. Например, вместо $(7{,}852 \times 3{,}18 \times 4{,}3)$ следует вычислять $(7{,}9 \times 3{,}2 \times 4{,}3)$. В окончательном результате при этом следует оставлять такое же число значащих цифр, как и в сомножителях после округления: $7{,}852 \times 3{,}18 \times 4{,}3 \approx 7{,}9 \times 3{,}2 \times 4{,}3 = 108{,}704 \approx$ $\approx 1{,}1 \times 10^2$.

3. **При делении** необходимо соблюдать такое же правило, как и при умножении. Например, $7{,}852 : 3{,}18 \approx 7{,}85 : 3{,}18 = 2{,}4685\ldots \approx 2{,}47$.

4. **При возведении числа в степень** результат округляется таким образом, чтобы он имел столько значащих цифр, сколько их имеет основание степени. Например, $3{,}18^3 = 32{,}157432 \approx 32{,}2$.

5. **При извлечении корня** в результате указывается столько значащих цифр, сколько их в подкоренном выражении. Например,

$$\sqrt{7{,}852} = 2{,}802142\ldots \approx 2{,}802\,.$$

6. **При вычислении сложных выражений** следует применять указанные выше правила в соответствии с видом производимых действий.

## 3.4. СОДЕРЖАНИЕ РГЗ

| Содержание | | Номера задач |
|---|---|---|
| **1** | Взаимодействие электрических зарядов. Закон Кулона | 101–110 |
| **2** | Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции | 111–120 |
| **3** | Потенциал, разность потенциалов. Работа перемещения зарядов в электростатическом поле | 121–130 |
| **4** | Электрическая емкость. Конденсаторы | 131–140 |
| **5** | Постоянный ток | 141–150 |
| **6** | Магнитное поле. Магнитная индукция. Закон Био–Савара–Лапласа. Принцип суперпозиции | 151–160 |
| **7** | Сила Лоренца. Сила Ампера | 161–170 |
| **8** | Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. ЭДС самоиндукции | 171–180 |

## 3.5. ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ РГЗ
### (номер варианта определяется последней цифрой номера зачетной книжки)

| **Вариант** | **Номера задач** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** |
| **1** | 101 | 111 | 121 | 131 | 141 | 151 | 161 | 171 |
| **2** | 102 | 112 | 122 | 132 | 142 | 152 | 162 | 172 |
| **3** | 103 | 113 | 123 | 133 | 143 | 153 | 163 | 173 |
| **4** | 104 | 114 | 124 | 134 | 144 | 154 | 164 | 174 |
| **5** | 105 | 115 | 125 | 135 | 145 | 155 | 165 | 175 |
| **6** | 106 | 116 | 126 | 136 | 146 | 156 | 166 | 176 |
| **7** | 107 | 117 | 127 | 137 | 147 | 157 | 167 | 177 |
| **8** | 108 | 118 | 128 | 138 | 148 | 158 | 168 | 178 |
| **9** | 109 | 119 | 129 | 139 | 149 | 159 | 169 | 179 |
| **0** | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |

## 3.6. ЗАДАЧИ РГЗ

**101.** Два отрицательно заряженных шарика, расположенных на расстоянии $L = 4{,}8$ мкм, взаимодействуют с силой $F = 3{,}6 \cdot 10^{-10}$ Н. Найдите число «избыточных» электронов на каждом шарике. Заряды шариков считать равными. Шарики принять за материальные точки.

**102.** Отрицательный заряд $q_1 = -5q$ и положительный $q_2 = +2q$ закреплены на расстоянии $r = 1$ м друг от друга. Где на линии, соединяющей заряды, следует поместить заряд $Q$, чтобы он находился в равновесии?

**103.** Два положительных точечных заряда $q$ и $9q$ закреплены на расстоянии $L = 100$ см. Где между ними, какой по величине и знаку заряд надо поместить, чтобы он находился в устойчивом равновесии?

**104.** Два равных по величине положительных заряда $q_1 = q_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-9}$ Кл расположены в вершинах острых углов равнобедренного прямоугольного треугольника на расстоянии $L = 2{,}0$ см друг от друга. Определите, с какой силой оба заряда действуют на третий заряд $q_3 = 1{,}0 \cdot 10^{-9}$ Кл, находящийся в вершине прямого угла треугольника. Ответ поясните рисунком.

**105.** Три одинаковых заряда $q_1 = q_2 = q_3 = 2{,}0$ нКл находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 10{,}0$ см. Определите силу $F$, действующую на один из этих зарядов.

**106.** В вершинах квадрата со стороной $a$ находятся одинаковые положительные заряды $+q$. Какой заряд $Q$ необходимо поместить в центр квадрата, чтобы вся система зарядов находилась в равновесии?

**107.** В вершинах правильного шестиугольника, со стороной $a = 10$ см расположены точечные заряды $q$, $2q$, $3q$, $4q$, $5q$, $6q$ ($q = 0{,}10$ мкКл). Найдите силу, действующую на точечный заряд $q$, лежащий в центре шестиугольника. Ответ поясните рисунком.

**108.** Два шарика массой $m = 1{,}0$ г каждый подвешены на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина каждой нити $L = 10$ см.

Какие одинаковые заряды необходимо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол $\alpha = 60°$ ?

**109.** Два соприкасающихся шарика, каждый массой $m = 0,25$ г, подвешены на нитях длиной по $l = 100$ см. После сообщения шарикам общего заряда $Q$ они разошлись на расстояние $d = 6$ см друг от друга. Чему равен заряд $Q$, сообщенный шарикам?

**110.** Находясь на расстоянии $l = 10$ см, два одинаковых проводящих шарика притягиваются с силой $F_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ Н. Если шарики привести в соприкосновение, а затем снова развести на это же расстояние, то сила взаимодействия становится равной $F_2 = 4 \cdot 10^{-5}$ Н. Определите первоначальные заряды шариков.

**111.** В вертикально направленном однородном электрическом поле находится пылинка массой $m = 1 \cdot 10^{-9}$ г и зарядом $q = 3,2 \cdot 10^{-17}$ Кл. Какова напряженность поля, если пылинка находится в равновесии?

**112.** Электрическое поле создано двумя точечными зарядами: $q_1 = 30$ нКл и $q_2 = -10$ нКл. Расстояние между зарядами равно $d = 20$ см. Определите напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 15$ см от первого и на расстоянии $r_2 = 10$ см от второго заряда.

**113.** Определите напряженность электростатического поля в центре правильного шестиугольника со стороной $a$, в вершинах которого расположены: а) равные заряды одного знака; б) заряды, равные по модулю, но чередующиеся по знаку. Ответ поясните рисунком.

**114.** Два одинаковых положительных заряда $q = 1,0 \cdot 10^{-7}$ Кл находятся в воздухе на расстоянии $L = 8,0$ см друг от друга. Определите напряженность электростатического поля: а) в точке *O*, находящейся на середине отрезка, соединяющего заряды; б) в точке *A*, расположенной на расстоянии $r = 5,0$ см от каждого заряда.

**115.** В трех вершинах квадрата со стороной $a = 0,4$ м находятся одинаковые положительные заряды по $q = 5,0 \cdot 10^{-9}$ Кл. Найдите напряженность поля в четвертой вершине квадрата.

**116.** Расстояние между зарядами $+q$ и $+9q$ равно $l = 8{,}0$ см. На каком расстоянии от меньшего заряда находится точка, в которой напряженность поля равна нулю?

**117.** Расстояние между зарядами $q_1 = +6{,}4 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_2 = -6{,}4 \times$ $\times 10^{-6}$ Кл равно $l = 12$ см. Найдите напряженность поля в точке, удаленной на $r = 8{,}0$ см от каждого из зарядов.

**118.** Электрическое поле создано двумя параллельными бесконечными заряженными пластинами, несущими одинаковый равномерно распределенный по площади заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 1{,}0$ нКл/м$^2$. Определите напряженность электрического поля между пластинами; вне пластин.

**119.** Электрическое поле создано двумя параллельными бесконечными заряженными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 2{,}0$ нКл/м$^2$ и $\sigma_2 = -5{,}0$ нКл/м$^2$. Определите напряженность электрического поля между пластинами; вне пластин.

**120.** Тонкое кольцо радиусом $R = 8{,}0$ см несет заряд, распределенный с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Какова напряженность электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние $r = 10{,}0$ см?

**121.** Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом $R = 10$ см. Он заряжен с линейной плотностью заряда $\tau = 300$ нКл/м. Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести заряд $q = 5{,}0$ нКл из центра кольца в точку А, расположенную на оси кольца на расстоянии $L =$ $= 20$ см от его центра?

**122.** Положительные заряды $q_1 = 3{,}0$ мкКл и $q_2 = 20$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $L_1 = 1{,}5$ м друг от друга. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния $L_2 = 1{,}0$ м.

**123.** Поле образовано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10$ нКл/м$^2$. Определите разность потенциалов двух точек поля, отстоящих от плоскости на расстояния $x_1 = 5,0$ см и $x_2 = 10,0$ см.

**124.** Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом $R = 10$ см. Он заряжен с линейной плотностью заряда $\tau = 800$ нКл/м. Определите потенциал $\varphi$ в точке, расположенной на оси кольца на расстоянии $h = 10$ см от его центра.

**125.** На расстоянии $r_1 = 4,0$ см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд $q = 0,66$ нКл. Под действием поля заряд приближается к нити до расстояния $r_2 = 2,0$ см. При этом полем совершается работа $A = 50 \cdot 10^{-7}$ Дж. Найдите линейную плотность заряда $\tau$ на нити.

**126.** Тонкий стержень согнут в полукольцо. Стержень заряжен с линейной плотностью заряда $\tau = -133$ нКл/м. Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести заряд $q = 6,7$ нКл из центра кольца в бесконечность?

**127.** Равномерно заряженная бесконечно протяженная плоскость с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-5}$ Кл/м$^2$ и точечный заряд $q = 1,0 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся на расстоянии $L_1 = 50$ см. Какую работу необходимо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $L_2 = 20$ см?

**128.** На тонком кольце радиусом $R = 10$ см равномерно распределен заряд $q = 2,0$ мкКл. Какую наименьшую скорость необходимо сообщить находящемуся в центре кольца маленькому шарику массой $m = 10$ мг с зарядом $q_0 = -3,0$ мкКл, чтобы он мог удалиться из центра кольца на бесконечность?

**129.** В однородное электрическое поле напряженностью $E = 200$ В/м влетает (вдоль силовой линии) электрон со скоростью $v_0 = 2,0 \cdot 10^6$ м/с. Определите расстояние $L$, которое пройдет электрон до точки, где его скорость будет равна половине начальной.

**130.** Шарик массой $m = 0,20$ г и зарядом $q = +10$ нКл перемещается из одной точки поля с потенциалом $\varphi_1 = 5,0 \cdot 10^3$ В в другую с потенциалом $\varphi_2 = 0$. Найдите скорость шарика в первой точке, если во второй точке она стала равной $v_2 = 1,0$ м/с.

**131.** Найдите работу, которую нужно затратить, чтобы вынуть диэлектрик из плоского конденсатора, если напряжение на обкладках поддерживается постоянным и равным $U = 500$ В. Площадь каждой пластины $S = 50$ см$^2$, расстояние между пластинами $d = 5,0$ мм, а диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\varepsilon = 2,0$.

**132.** Найдите работу, которую нужно затратить, чтобы вынуть диэлектрик из плоского конденсатора, если заряд на обкладках поддерживается постоянным и равным $q = 6,0$ мкКл. Площадь каждой пластины $S = 100$ см$^2$, расстояние между пластинами $d = 3,0$ мм, а диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\varepsilon = 2,0$.

**133.** Найти работу, которую нужно затратить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора, заряженного разноименными зарядами $|q| = 0,20$ мкКл, на величину $\Delta x = 0,20$ мм. Площадь каждой пластины конденсатора $S = 400$ см$^2$.

**134.** Какую работу надо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского вакуумного конденсатора с площадью пластин $S = 100$ см$^2$ каждая от расстояния $x_1 = 0,010$ м до расстояния $x_2 = 0,020$ м? Напряжение между пластинами поддерживается постоянным и равным $U = 220$ В.

**135.** Площадь каждой пластины плоского воздушного конденсатора $S = 0,10$ м$^2$, расстояние между ними $d = 5,0$ мм. Какое напряжение было приложено к пластинам, если известно, что при разряде конденсатора выделилось $Q = 4,19$ мДж тепла?

**136.** Плоский конденсатор, заполненный жидким диэлектриком с проницаемостью $\varepsilon = 3,0$, зарядили, затратив при этом энергию

$W_1 = 10$ мкДж. Затем конденсатор отсоединили от источника, слили диэлектрик и разрядили. Определите энергию $W_2$, которая выделилась при разрядке.

**137.** Плоский конденсатор заполнен диэлектриком и на его пластины подано некоторое напряжение. Его энергия при этом $W = 20$ мкДж. После того как конденсатор отключили от источника напряжения, диэлектрик вынули из конденсатора. Найти диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если работа, которая была совершена против сил электрического поля, $A = 40$ мкДж.

**138.** Обкладки конденсатора с неизвестной емкостью $C_1$, заряженного до напряжения $U_1 = 80$ В, соединяют с обкладками конденсатора емкостью $C_2 = 60$ мкФ, заряженного до напряжения $U_2 = 16$ В. Определите емкость $C_1$, если напряжение на конденсаторах после их соединения $U' = 20$ В. Конденсаторы соединяются обкладками, имеющими одноименные заряды.

**139.** Обкладки конденсатора с неизвестной емкостью $C_1$, заряженного до напряжения $U_1 = 80$ В, соединяют с обкладками конденсатора емкостью $C_2 = 60$ мкФ, заряженного до напряжения $U_2 = 16$ В. Определите емкость $C_1$, если напряжение на конденсаторах после их соединения $U' = 20$ В. Конденсаторы соединяются обкладками, имеющими разноименные заряды.

**140.** Конденсатор емкостью $C_1 = 10$ мкФ заряжен до напряжения $U_1 = 10$ В. Определите заряд на обкладках этого конденсатора после того как параллельно ему был подключен другой, не заряженный конденсатор, емкостью $C_2 = 30$ мкФ.

**141.** Элемент сначала замкнут на внешнее сопротивление $R_1 = 2{,}0$ Ом, а затем на внешнее сопротивление $R_2 = 0{,}50$ Ом. Найдите ЭДС элемента и его внутреннее сопротивление, если известно, что в каждом из этих случаев мощность, развиваемая во внешней цепи, одинакова и равна $P_1 = P_2 = 2{,}54$ Вт.

**142.** Внешняя цепь постоянного тока потребляет мощность $P = 0,75$ Вт. Определите силу тока в цепи, если ЭДС источника $\varepsilon = 2,0$ В, а внутреннее сопротивление $r = 1,0$ Ом.

**143.** К батарее, ЭДС которой $\varepsilon = 2,0$ В и внутреннее сопротивление $r = 0,50$ Ом, присоединили проводник. Исследуйте, при каком сопротивлении проводника мощность, выделяемая в нем, максимальна. Найдите эту мощность.

**144.** Максимальная сила тока генератора равна $I_{max} = 3,0$ А, ЭДС генератора равна $\varepsilon = 6,0$ В. Найдите наибольшее количество теплоты, которое может быть выделено на внешнем сопротивлении за $\Delta t = 1,0$ с.

**145.** Наибольшая мощность, которая может выделяться во внешней цепи некоторого источника, $P_{max} = 9,0$ Вт. Сила тока при этом $I = 3,0$ А. Найдите ЭДС $\varepsilon$ и внутреннее сопротивление $r$ этого источника.

**146.** ЭДС батареи равна $\varepsilon = 18$ В. КПД батареи равен $\eta = 0,90$ при силе тока $I = 4,5$ А. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

**147.** На концах проводника длиной $L = 6,0$ м поддерживается разность потенциалов $U = 120$ В. Каково удельное сопротивление проводника, если плотность тока в нем $j = 3,6 \cdot 10^8$ А/м$^2$?

**148.** Между точками с постоянной разностью потенциалов $U = 100$ В включили сопротивление $r_1 = 2$ кОм и вольтметр, соединенные последовательно. Показания вольтметра $U_1 = 80$ В. Когда сопротивление заменили на другое, вольтметр показал $U_2 = 60$ В. Определите второе сопротивление.

**149.** К источнику с ЭДС $\varepsilon = 12,0$ В присоединена нагрузка. Напряжение на нагрузке $U = 8,0$ В. Определите КПД источника.

**150.** ЭДС батареи $\varepsilon = 12,0$ В. При силе тока $I = 4,0$ А КПД батареи $\eta = 0,60$. Определите внутреннее сопротивление батареи.

**151.** Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиус каждого витка $R = 2,0$ см, а токи в витках $I_1 = I_2 = 5,0$ А. Найдите напряженность и индукцию магнитного поля в центре этих витков.

**152.** По квадратной рамке со стороной $a = 5{,}0$ см течет ток $I = 10{,}0$ А. Какова магнитная индукция в точке пересечения диагоналей квадрата?

**153.** Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиус каждого витка $R_1 = 2{,}5$ см, $R_2 = 4{,}0$ см, а токи в витках $I_1 = 3{,}0$ А и $I_2 = 5{,}0$ А. Найдите индукцию магнитного поля в центре этих витков.

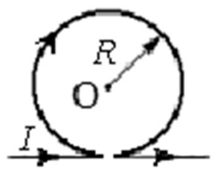
**154.** По проводнику, изогнутому в виде окружности, течет ток. Напряженность магнитного поля в центре окружности $H_1 = 50$ А/м. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определите напряженность магнитного поля в центре этого квадрата.

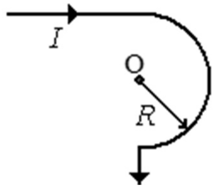
**155.** Два бесконечно длинных прямых проводника с токами $I_1 = 3{,}0$ А и $I_2 = 4{,}0$ А располагаются под прямым углом в параллельных плоскостях, расстояние между которыми $d = 20$ см. Найдите индукцию магнитного поля в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра к проводникам.

**156.** Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток $I = 100$ А. Вычислите напряженность магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла и удаленной от вершины угла на расстояние $d = 100$ см.

**157.** По двум бесконечно длинным параллельным проводам текут токи $I_1 = 50$ А и $I_2 = 100$ А в противоположных направлениях. Расстояние между проводами $d = 50$ см. Определите магнитную индукцию $B$ в точке, удаленной на расстояние $r_1 = 30$ см от первого и $r_2 = 40$ см от второго провода.

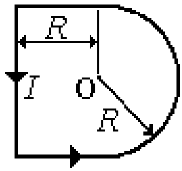
**158.** Бесконечно длинный тонкий проводник с током $I = 10{,}0$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 20{,}0$ см. Определите магнитную индукцию поля, создаваемого этим током в точке $O$.






**159.** Проводник с током $I = 10{,}0$ А лежит в плоскости и имеет форму, показанную на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 10{,}0$ см. Определите магнитную индукцию поля, создаваемого этим током в точке $O$.

**160.** Проводник с током $I = 2{,}0$ А лежит в плоскости и имеет форму, показанную на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 40$ см. Определите напряженность и магнитную индукцию поля, создаваемого этим током в точке $O$.




**161.** Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}08$ Тл. В поле помещают прямой проводник с током $I = 10{,}0$ А и длиной $L = 70$ см так, что на него действует максимальная сила. Затем проводник поворачивают на некоторый угол φ так, что сила, действующая на проводник, уменьшается в 2 раза. Определите угол φ и силу, действующую на проводник в первом случае.

**162.** Прямоугольная проволочная рамка со сторонами $l_1 = 10{,}0$ см и $l_2 = 5{,}0$ см расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что ее ближайшая сторона $l_1$, параллельная проводу, находится на расстоянии $d = 2{,}0$ см от него. Определите силу, действующую на рамку, если токи, текущие по проводу и рамке, соответственно равны $I_1 = 10{,}0$ А, $I_2 = 1{,}0$ А.

**163.** Квадратная рамка со стороной $a = 15$ см, по которой течет ток $I = 5{,}0$ А, расположена в магнитном поле с индукцией $B = 0{,}10$ Тл так, что силовые линии поля перпендикулярны плоскости рамки. Найдите силу: а) действующую на одну сторону рамки; б) на рамку в целом.

**164.** Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи $I = 20{,}0$ А.

Определите силу $F$, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине.

**165.** По жесткому проволочному кольцу диаметром $D = 40{,}0$ мм течет ток $I = 2{,}0$ А. Плоскость кольца перпендикулярна магнитному полю, индукция которого $B = 100$ Тл. Определите силу натяжения, возникающую в поперечном сечении проволоки. Решение поясните рисунком.

**166.** Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 600$ В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}30$ Тл и начал двигаться по окружности. Вычислите ее радиус.

**167.** Ион, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 645$ В, влетел в скрещенные под прямым углом однородные магнитное $B = 1{,}5$ мТл и электрическое $E = 200$ В/м поля перпендикулярно к ним. Определите отношение заряда иона к его массе, если ион в этих полях движется прямолинейно.

**168.** Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 300$ В, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии $d = 4{,}0$ мм от него. Какая по величине сила подействует на электрон, если по проводнику пустить ток $I = 5{,}0$ А ?

**169.** Протон и $\alpha$-частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Во сколько раз радиус кривизны $R_1$ траектории $\alpha$-частицы больше радиуса кривизны $R_2$ траектории протона?

**170.** Перпендикулярно магнитному полю с индукцией $B = 0{,}10$ Тл возбуждено электрическое поле напряженностью $E = 100$ кВ/м. Заряженная частица движется перпендикулярно обоим полям, не отклоняясь от прямолинейной траектории. Определите скорость частицы.

**171.** Квадратная проволочная рамка со стороной $a = 5{,}0$ см и сопротивлением $R = 10$ мОм находится в однородном магнитном поле $B = 40$ мТл. Нормаль к плоскости рамки составляет угол $\alpha = 30°$

с линиями магнитной индукции. Определите заряд $Q$, который пройдет по рамке, если магнитное поле выключить.

**172.** Медный провод диаметром $d = 1,0$ мм согнут в виде квадрата со стороной $a = 4,0$ см, и концы его замкнуты. Эта рамка помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,20$ Тл так, что ее плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определите заряд, который потечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

**173.** В магнитное поле с индукцией $B = 0,01$ Тл помещен круговой виток из медной проволоки. Площадь витка $S = 16$ см$^2$, а полное сопротивление проволоки $R = 250$ Ом. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости витка. Какой заряд $Q$ пройдет по витку при исчезновении магнитного поля?

**174.** На соленоид длиной $l = 20$ см и площадью поперечного сечения $S = 30$ см$^2$ надет проволочный виток того же сечения. Соленоид имеет $N = 320$ витков, и по нему идет ток $I = 3,0$ А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке при уменьшении тока в соленоиде до нуля в течение $\Delta t = 1,0$ мс?

**175.** Катушка, состоящая из $N = 400$ витков проволоки, помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,02$ Тл. Ось катушки параллельна силовым линиям магнитного поля. Какой заряд пройдет по катушке при исчезновении магнитного поля? Сопротивление катушки $R = 15$ Ом, диаметр витка $d = 5,0$ см.

**176.** Соленоид содержит $N = 800$ витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала) $S = 10$ см$^2$. По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B = 8,0$ мТл. Определите среднее значение ЭДС самоиндукции, которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время $\Delta t = 0,8$ мс.

**177.** Короткая катушка, содержащая $N = 10$ витков диаметром $d = 4,0$ см, помещена в однородное магнитное поле, индукция которого

$B = 0{,}020$ Тл. Ось катушки параллельна линиям поля. Сопротивление катушки $R = 10{,}0$ Ом. Какой заряд пройдет по катушке при повороте ее на $\delta = 90°$?

**178.** Алюминиевое кольцо расположено в однородном магнитном поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. Диаметр кольца $D = 25$ см, толщина провода $d = 2$ мм. Определите скорость изменения магнитной индукции поля со временем $\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right|$, если при этом в кольце возникает индукционный ток $I = 12$ А. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

**179.** В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}5$ Тл движется прямой проводник длиной $l = 50{,}0$ см. Найдите разность потенциалов, возникающую на концах проводника, если проводник движется с постоянной скоростью $v = 10{,}0$ м/с перпендикулярно линиям поля и оси проводника.

**180.** Прямой провод длиной $l = 40$ см движется в однородном магнитном поле со скоростью $v = 5{,}0$ м/с перпендикулярно линиям поля и оси провода. Появившаяся при этом разность потенциалов на концах провода равна $U = 0{,}60$ В. Определите индукцию магнитного поля.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. – М.: Высшая школа, 2002.

2. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1979.

3. *Трофимова Т.И.* Курс физики. 20-е изд. – М.: Академия, 2014.

4. *Трофимова Т.И.* Курс физики. Задачи и решения. – 5-е изд. – М.: Академия, 2012.

5. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 т. Том 2. Электричество и магнетизм. – 5-е изд. – СПб.: Лань, 2011.

6. *Детлаф А.В.*, *Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2002.

7. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики: для технических вузов. – СПб.: Книжный мир, 2006.

8. *Сахаров Д.И.* Сборник задач по физике. – М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2003.

9. *Савченко Н.Е.* Задачи по физике с анализом их решения. – М.: Просвещение, 2000.

10. *Горбунова О.И.*, *Зайцева А.М.*, *Красников С.Н.* Задачник-практикум по общей физике. Электричество. Электромагнетизм. – М.: Просвещение, 1975.

11. *Мясников С.П.*, *Осанова Т.Н.* Пособие по физике. – М.: Высшая школа, 1988.

12. *Чертов А.Г.*, *Воробьев А.А.* Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981.

13. *Чертов А.Г.* Физические величины. – М.: Высшая школа, 1990.

14. *Сена Л.А.* Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1969.

15. *Давыдков В.В.* Физика: механика, электричество и магнетизм: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017.

16. Электростатика. Постоянный ток: учебное пособие для ИДО / сост.: *Э.Б. Селиванова и др.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.

17. Физика. Механика и электростатика: методические указания: решения задач по физике для 1 и 2 курсов дневной и заочной формы обучения / сост.: *Л.М. Родникова*, *Н.Я. Усольцева*, *В.Б. Уткин*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010.

18. Физика. Электромагнетизм: методические указания: решение задач по физике для 1 и 2 курсов дневной и заочной форм обучения / сост.: *Л.М. Родникова*, *Н. Я. Усольцева*, *Н. В. Чичерина*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.

19. Физика. Методические указания к выполнению контрольной работы № 1 / сост.: *Н.В. Чичерина*, *А.А. Штыгашев* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015.

20. Физика. Электромагнетизм, оптика, элементы квантовой механики / сост.: *Н.В. Чичерина*, *А.А. Штыгашев* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

**Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц**

| Множитель | Приставка | | |
|---|---|---|---|
| | Наименование | Обозначение | |
| | | русское | международное |
| 1 000 000 000 000 000 000 000 000 $=10^{24}$ | иотта | И | Y |
| 1 000 000 000 000 000 000 000 $=10^{21}$ | зета | З | Z |
| 1 000 000 000 000 000 000 $=10^{18}$ | экса | Э | E |
| 1 000 000 000 000 000 $= 10^{15}$ | пэта | П | P |
| 1 000 000 000 000 $= 10^{12}$ | тера | Т | T |
| 1 000 000 000 $= 10^{9}$ | гига | Г | G |
| 1 000 000 $= 10^{6}$ | мега | М | M |
| 1 000 $= 10^{3}$ | кило | к | k |
| 100 $= 10^{2}$ | (гекто)* | г | h |
| 10 $= 10^{1}$ | (дека) | да | da |
| 0,1 $= 10^{-1}$ | (деци) | д | d |
| 0,01 $= 10^{-2}$ | (санти) | с | c |
| 0,001 $= 10^{-3}$ | милли | м | m |
| 0,000 001 $= 10^{-6}$ | микро | мк | µ |
| 0,000 000 001 $= 10^{-9}$ | нано | н | n |
| 0,000 000 000 001 $= 10^{-12}$ | пико | п | p |
| 0,000 000 000 000 001 $= 10^{-15}$ | фемто | ф | f |
| 0,000 000 000 000 000 001 $= 10^{-18}$ | атто | а | a |
| 0,000 000 000 000 000 000 001 $= 10^{-21}$ | зепто | з | z |
| 0,000 000 000 000 000 000 000 001 $= 10^{-24}$ | иокто | и | y |

* Приставки в скобках следует применять только в названиях уже устоявшихся единиц (сантиметр, гектар, декалитр).

## Некоторые физические константы

| | |
|---|---|
| Гравитационная постоянная | $G = 6,67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ |
| Ускорение свободного падения | $g = 9,807\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ |
| Элементарный электрический заряд | $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Масса электрона | $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг |
| Масса протона | $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Электрическая постоянная | $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$ |
| Магнитная постоянная | $\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ |

## Диэлектрические проницаемости (относительные)

| | |
|---|---|
| Вода | 81 |
| Воздух | 1,00058 |
| Керосин | 2,0 |
| Масло машинное | 2,5 |
| Парафин | 2,0 |
| Скипидар | 2,2 |
| Стекло | 6,0 |
| Эбонит | 2,7 |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

**Чичерина Наталья Витальевна**
**Рубанович Михаил Григорьевич**

**ФИЗИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Учебное пособие**

Редактор *М.О. Мокшанова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 07.02.2020. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 8,37. Печ. л. 9,0. Изд. № 391/17. Заказ № 357. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20