

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

*Методические указания к расчетно-графическим работам
и варианты заданий для студентов направлений 230100,
230400, 220100*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2014

УДК 537.1

ФИЗИКА. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. Методические указания к расчетно-графическим работам и варианты заданий для студентов направлений 230100 «Информатика и вычислительная техника», 230400 «Информационные системы и технологии», 220100 «Системный анализ и управление». *С.С. Прошкин*. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014, 29 с.

Расчетно-графические работы предназначены для студентов бакалавриата направлений подготовки 230100, 230400, 220100 Национального минерально-сырьевого университета «Горный». Задания выполняются индивидуально в соответствии с вариантом.

Табл. 4; Библиогр.: 8 назв.

Научный редактор: Пщелко Н.С.

© Национальный минерально-сырьевой университет
«Горный», 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях значительного сокращения лекций и часов, отводимых на практические занятия по физике, единственным способом улучшить усвоение материала учебной программы является самостоятельная работа студента. В решении этой проблемы может помочь выполнение студентом индивидуального расчетно-графического задания (РГР). При выполнении РГР студенту приходится сочетать теоретические знания и практические навыки решения задач. Кроме того, у него формируется умение определить, описать и объяснить физические понятия, явления, процессы и величины.

При этом студент приобретает следующие навыки:

- проводить самостоятельный поиск необходимой информации с использованием учебных, справочных и научно-популярных изданий, ресурсов Интернета;
- применять математический аппарат для аналитического решения физических задач;
- анализировать, выполнять сравнительную оценку и делать выводы по результатам своей работы;
- использовать в решениях и представлении результатов (в виде рисунков, схем, таблиц и графиков) компьютерное программное обеспечение.

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов в данном пособии приведены краткие теоретические сведения и разобраны примеры решения и оформления задач.

В приложении представлены справочные материалы, рекомендации к решению задач и содержанию отчета по РГР.

Студентам предлагается решить одно расчетно-графическое задание, которое фактически предполагает рассмотрение трех типовых задач по следующим темам электромагнетизма:

1. «Конденсаторы».
2. «Движение заряженных частиц в электрических полях».
3. «Движение заряженных частиц в магнитных полях».

1. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА И К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТНО – ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

При выполнении расчетно-графических работ по общей физике рекомендуется оформить отчет в печатном виде на листах формата А4 следующего содержания:

1. Титул в соответствии с требованиями вуза.
2. Формулировка задания в соответствии со своим вариантом.
3. Теоретические основы работы.

В краткое содержание теоретической части работы необходимо включить:

- явления или процессы, изучаемые в РГР.
- определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
- законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы.
- пояснение к физическим величинам, входящим в формулы, и единицы их измерения.

4. Решение задач РГР.

При решении задач необходимо:

- выполнить рисунок или начертить схему;
- сопровождать применяемые формулы и законы пояснениями, мотивирующими решение;
- представить результат в общем виде, т. е. преобразовать выражение для определяемой величины так, чтобы в него входили лишь буквенные обозначения величин, заданных в условии задачи, и необходимые физические константы;
- проверить размерность полученного результата;
- выполнить необходимые вычисления и представить результат в Международной системе единиц;
- сформулировать полный ответ в соответствии с вопросом задачи.

5. Графический материал.

- представить таблицы с данными для построения графиков;
- указать аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить;

– указать на осях координат физические величины и единицы их измерения.

б. Анализ и выводы по результатам работы.

2. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

Основные формулы¹

1. Электростатическое поле

Электрический заряд состоит из отдельных элементарных положительных или отрицательных зарядов. Элементарный положительный заряд несут протон, позитрон; элементарный отрицательный заряд – электрон. Элементарный заряд q_e равен $1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Система тел или частиц называется электрически изолированной, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами. В электрически изолированной системе выполняется закон сохранения электрического заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов тел или частиц, образующих электрически изолированную систему, остается неизменной при любых процессах, происходящих в этой системе.

Закон Кулона определяет силу взаимодействия двух точечных неподвижных электрических зарядов в вакууме (точечными зарядами называются заряды, размеры которых много меньше расстояния между ними):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; q_1, q_2 – электрические заряды; r – расстояние между зарядами. Сила Куло-

¹ В данном разделе приведены формулы и законы, которые могут оказаться полезными при решении только данного РГР.

на направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, ее направление выбирается из условия: одноименные точечные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

Напряженность электрического поля является силовой векторной характеристикой электрического поля и равна силе \vec{F} , действующей на пробный положительный заряд q_0 , помещенный в данную точку поля, деленной на величину этого заряда (пробный заряд должен обладать достаточно малыми размерами, чтобы не искажать измеряемое поле):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Потенциал электрического поля является энергетической скалярной характеристикой электрического поля и равен отношению потенциальной энергии положительного пробного точечного заряда, помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W}{q_0},$$

где W – потенциальная энергия заряда q_0 , помещенного в данную точку электрического поля.

Принцип суперпозиции для напряженности электрического поля. Напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i,$$

где \vec{E}_i – напряженность электрического поля, созданного i -м зарядом в данной точке. Принцип суперпозиции позволяет вычислять напряженность поля любой системы зарядов.

Принцип суперпозиции для потенциала электрического поля. Потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$\varphi = \sum_i \varphi_i ,$$

где φ_i – потенциал электрического поля, созданного i -м зарядом.

При расчетах, связанных с неточечными зарядами, используются следующие понятия.

Объемная плотность заряда – физическая величина, определяемая отношением равномерно распределенного заряда q в объеме V к величине этого объема. Данное определение можно выразить следующим образом:

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

Поверхностная плотность заряда – физическая величина, определяемая отношением равномерно распределенного заряда q по поверхности S к величине площади этой поверхности:

$$\sigma = \frac{q}{S} ,$$

где S – площадь поверхности, по которой равномерно распределен заряд q .

Линейная плотность заряда – физическая величина, определяемая отношением равномерно распределенного заряда q по длине заряженного тела (нити, цилиндра) l к длине тела:

$$\tau = \frac{q}{l} .$$

Вектор напряженности, модуль напряженности и потенциал электрического поля точечного заряда в среде:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right); \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{\epsilon r^2}; \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r},$$

где q – электрический заряд; r – расстояние от точечного заряда до данной точки поля; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Напряженность и потенциал электрического поля внутри заряженного проводящего шара или проводящей сферы:

$$\vec{E} = 0; \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R},$$

где q – электрический заряд шара; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится шар; R – радиус шара или сферы.

Вектор напряженности, модуль напряженности и потенциал электрического поля вне равномерно заряженного шара или сферы:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right); \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{\epsilon r^2}; \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r},$$

где q – электрический заряд шара или распределенный по поверхности сферы; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится сфера или шар; r – расстояние от центра шара или сферы до данной точки поля.

Напряженность электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0},$$

где σ – поверхностная плотность заряда.

Разность потенциалов электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости (ZOY) между точками с координатами x_1, x_2

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} (|x_1| - |x_2|).$$

Напряженность поля в пространстве между двумя разноименно заряженными плоскостями (поле плоского конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Связь разности потенциалов с напряженностью для однородного поля:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d},$$

где d – расстояние между эквипотенциальными поверхностями с потенциалами φ_1 и φ_2 .

Вектор напряженности электрического поля бесконечной равномерно заряженной нити и поля вне бесконечного равномерно заряженного цилиндра

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\tau}{\varepsilon r} \vec{r},$$

где τ – линейная плотность заряда; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится нить или цилиндр; r – расстояние от оси нити или цилиндра до данной точки поля.

Разность потенциалов электрического поля между двумя точками поля, лежащими на расстояниях r_1 и r_2 от равномерно заряженной бесконечной прямой нити или вне бесконечного равномерно заряженного цилиндра

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \ln \frac{r_1}{r_2},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится нить или цилиндр; r_1, r_2 – расстояния от оси нити или цилиндра до данных точек поля.

Напряженность электрического поля внутри проводящего бесконечного заряженного цилиндра

$$\vec{E} = 0.$$

Работа внешних сил и сил поля при перемещении заряда в электрическом поле из точки 1 в точку 2:

$$A_{1-2}^{\text{сил поля}} = q(\varphi_1 - \varphi_2); \quad A_{1-2}^{\text{внешних сил}} = -A_{1-2}^{\text{сил поля}};$$

$$A_{1-2}^{\text{внешних сил}} = q(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Связь напряженности и потенциала электрического поля:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi;$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int_1^2 \vec{E} d\vec{r}.$$

Электрическая емкость:

а) уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi};$$

б) конденсатора

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

где q – заряд проводника или положительно заряженной пластины конденсатора; φ – потенциал тела; $\Delta\varphi, U$ – разность потенциалов между пластинами конденсатора.

При рассмотрении конденсатора принято разность потенциалов между его обкладками обозначать буквой U .

Электрическая емкость плоского конденсатора

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

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между пластинами;
 S – площадь одной пластины; d – расстояние между пластинами.

Электрическая емкость сферического конденсатора

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

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между обкладками; R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней обкладок.

Электрическая емкость цилиндрического конденсатора

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

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора; l – длина конденсатора; R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней обкладок.

Эквивалентная емкость при соединении конденсаторов:

а) параллельном соединении

$$C_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^N C_i ;$$

б) последовательном соединении

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i},$$

где N , C_i – количество и емкость соединенных конденсаторов.

Энергия заряженного конденсатора

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

где U – разность потенциалов (напряжение) между пластинами конденсатора; C – электрическая емкость конденсатора; q – заряд пластины конденсатора.

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия системы точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i,$$

где q_i – i -й заряд системы; φ_i – потенциал, создаваемый в месте нахождения i -го заряда всеми остальными зарядами системы; N – число точечных зарядов.

2. Магнитное поле

Индукция магнитного поля \vec{B} является силовой характеристикой магнитного поля.

Определение индукции магнитного поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}; \quad B = \frac{F_{\max}}{qv},$$

где M_{\max} – максимальный вращающий момент, действующий на плоский контур с током I ; S – площадь поверхности, натянутой на контур тока; F_{\max} – максимальная сила, действующая на точечный заряд q , движущийся со скоростью v .

Магнитный момент контура с током

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

где \vec{n} – единичная положительная нормаль к контуру, направление которой связано с направлением тока в контуре правилом правого винта.

Если рамка содержит N витков провода, то магнитный момент рамки

$$\vec{p}_m = N I S \vec{n}.$$

Принцип суперпозиции для индукции магнитного поля. Если магнитное поле создается несколькими источниками, то вектор магнитной индукции в данной точке определяется как сумма векторов магнитной индукции полей, создаваемых каждым источником в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i; \quad \vec{B} = \int_l d\vec{B},$$

где l – длина проводника с током, создающим магнитное поле.

Вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}], \quad M = p_m B \sin(\vec{p}_m, \vec{B}).$$

Закон Био–Савара–Лапласа позволяет рассчитать индукцию магнитного поля, создаваемого проводником с током, в любой точке пространства:

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

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin(d\vec{l}, \vec{r}),$$

где I – сила тока; $d\vec{l}$ – элемент длины провода (вектор $d\vec{l}$ совпадает по направлению с током I); \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента $d\vec{l}$ к точке наблюдения.

Сила Лоренца (полная электромагнитная сила, действующая на заряженную частицу)

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

где q – электрический заряд; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{v} – скорость частицы; \vec{B} – индукция магнитного поля.

В магнитном поле на движущуюся заряженную частицу действует магнитная составляющая силы Лоренца

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

Магнитная составляющая силы Лоренца перпендикулярна вектору скорости и вектору магнитной индукции. Она не изменяет величины скорости, а изменяет только ее направление, следовательно, работы не совершает.

Если частица влетает в магнитное поле под углом 90° к силовым линиям \vec{B} , то она равномерно движется в магнитном поле по окружности радиусом и периодом обращения:

$$R = \frac{mv}{qB}; \quad T = \frac{2\pi m}{qB},$$

где m – масса частицы.

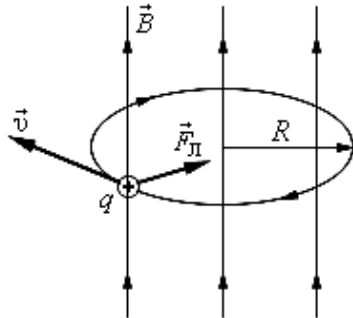


Рис. 1. Направление силы Лоренца

Если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ к силовым линиям поля, то она движется по винтовой линии (рис. 2).

При этом частица движется по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью, равной поперечной составляющей

$$v_{\perp} = v \sin \alpha .$$

Одновременно частица будет двигаться вдоль поля с продольной составляющей скорости, определяемой формулой:

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha .$$

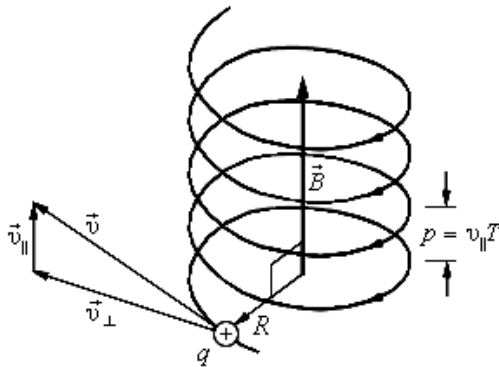


Рис. 2. Движение заряженной частицы по винтовой линии в однородном магнитном поле

Параметры винтовой линии, по которой движется частица, определяются следующими формулами:

$$R = \frac{m v_{\perp}}{q B} ; \quad p = \frac{2\pi R v_{\parallel}}{v_{\perp}} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha ,$$

где R - радиус винтовой линии; p - шаг винтовой линии.

Закон Ампера определяет силу, действующую на проводник с током, помещенный в магнитное поле:

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]; \quad dF = I B dl \sin(\angle d\vec{l}, \vec{B}),$$

где I – сила тока; $d\vec{l}$ – элемент длины провода (вектор $d\vec{l}$ совпадает по направлению с током I); l – длина проводника.

Сила Ампера перпендикулярна направлению тока и направлению вектора магнитной индукции.

Если прямолинейный проводник длиной l находится в однородном поле, то модуль силы Ампера определяется выражением

$$F = I B l \sin(\vec{l}, \vec{B}).$$

Индукция магнитного поля бесконечно длинного прямого проводника с током

$$B = \frac{\mu \mu_0}{2\pi} \frac{I}{a},$$

где a – расстояние от точки наблюдения до оси проводника; μ – магнитная проницаемость среды, в которой находится проводник.

Индукция магнитного поля прямого проводника конечной длины

$$B = \frac{\mu \mu_0}{4\pi} \frac{I}{a} [\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2],$$

где a – расстояние от точки наблюдения до прямой, на которой лежит проводник; α_1 – угол между проводником и радиусом-вектором, проведенным из начала проводника в точку наблюдения; α_2 – угол между проводником и радиусом-вектором, проведенным из конца проводника в точку наблюдения.

Индукция магнитного поля движущегося в вакууме точечного заряда

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^3} [\vec{v}, \vec{r}],$$

где q – электрический заряд; \vec{v} – постоянная нерелятивистская скорость; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от заряда к точке наблюдения.

Индукция магнитного поля в центре кругового витка с током

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{2R},$$

где R – радиус кругового витка; p_m – магнитный момент витка.

Индукция магнитного поля в центре дуги окружности

$$B = \frac{\mu \mu_0}{4\pi} \frac{I l}{R^2},$$

где l – длина дуги; R – радиус дуги.

Индукция магнитного поля внутри длинного соленоида на его оси

$$B = \mu \mu_0 n I,$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника; n – число витков на единице длины соленоида.

Индукция магнитного поля на оси тороида

$$B = \mu \mu_0 I \frac{N}{2\pi R},$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника; N – число витков, намотанных на тороид; R – радиус тороида.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Задача 1.

Заряженная частица после прохождения ускоряющей разности потенциалов $\Delta\varphi$, влетела в расположенный горизонтально плоский конденсатор. Вектор начальной скорости частицы \vec{v} направлен под углом α к горизонтальному направлению (см. рис. 3). Точка влета частицы расположена на расстоянии y_0 по отношению к нижней пластине конденсатора.

К пластинам конденсатора приложено напряжение U . Расстояние между пластинами – d ; длина пластин конденсатора – l (пластины имеют форму квадрата); C – электрическая емкость; Q – заряд на обкладках конденсатора².

После того как частица покинула конденсатор, она влетела в однородное магнитное поле с магнитной индукцией B , расположенное под углом 90° к плоскости пластин конденсатора и направленное вниз.

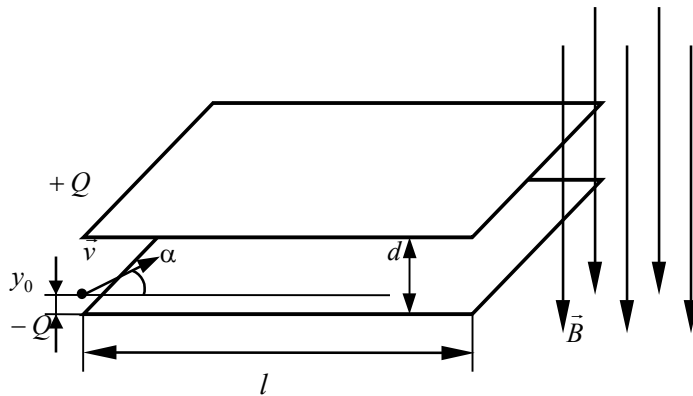


Рис. 3. Иллюстрация к условию влета положительно заряженной частицы

² По условию задачи верхняя пластина конденсатора всегда имеет знак заряда, равный знаку заряда влетающей частицы.

В таблицах 1 и 2 приведены численные значения известных величин. В соответствии со своим вариантом следует определить величины, отмеченные знаком вопроса, а так же радиус кривизны и шаг траектории частицы в магнитном поле.

В таблице 3 знаком «+» отмечены функциональные зависимости, для которых необходимо построить соответствующие графики.

Таблица 1

Параметры частицы перед влетом в конденсатор

Вариант	Частица	α°	$v, 10^6, \text{м/с}$	$y_0, \text{мм}$	$\Delta\varphi, \text{В}$
1	Электрон	17	?	4	410
2	Электрон	18	?	5	480
3	Электрон	15	?	4	560
4	Электрон	15	15,1	3	?
5	Позитрон	17	11,9	4	?
6	Позитрон	16	14,1	6	?
7	Позитрон	14	?	3	1140
8	Позитрон	14	?	4	1780
9	Протон	3	6,1	2	?
10	Протон	6	3,2	3	?
11	Протон	2	?	2	25300
12	Протон	2	7,3	2	?
13	Электрон	12	17,8	4	?
14	Электрон	13	16,8	5	?
15	Электрон	16	15,7	6	?
16	Электрон	14	?	5	620
17	Позитрон	13	?	5	510
18	Позитрон	17	12,1	6	?
19	Позитрон	15	14,0	5	?
20	Позитрон	14	20,0	5	?
21	Протон	2	?	2	30100
22	Протон	2	?	3	32000
23	Протон	5	7,6	2	?
24	Протон	6	3,4	3	?

Таблица 2.

Параметры электрического и магнитного поля

Вариант	d , см	l , см	Q , мкКл	U , В	C , пФ	E , В/м	B , Тл
1	10	50	?	?	?	350	0,5
2	12	?	?	45	22	?	1,1
3	15	40	?	35	?	?	0,7
4	12	?	?	?	23	300	2
5	22	40	?	?	22	500	1,5
6	20	?	?	?	30	430	2
7	15	?	?	40	35	?	1,2
8	16	40	?	45	23	?	2
9	20	25	?	?	?	22000	3
10	15	24	?	?	?	25000	4
11	16	24	?	3850	?	?	3
12	18	25	?	3750	?	?	4
13	12	40	?	50	30	?	2,1
14	10	?	?	45	35	?	1,8
15	15	?	?	?	20	375	1,5
16	20	40	?	?	22	500	1,7
17	16	60	?	?	24	430	1,4
18	17	40	?	?	25	450	1,2
19	16	50	?	360	30	?	1,3
20	15	40	?	420	32	?	1,1
21	15	30	?	3500	?	?	5
22	16	?	?	3800	4,3	?	6
23	18	?	?	?	4,5	21000	4
24	20	?	?	?	5	20500	5

Таблица 3.

Графические зависимости

Вариант	$R(t)$	$a_{\tau}(t)$	$a_n(t)$	$y(x)$	$p(t)$	$v(x)$	$a_{\tau}(y)$	$a_n(y)$
1		+			+			
2			+	+				
3	+						+	
4		+				+		
5	+			+				
6					+			+
7			+			+		
8	+				+			
9				+			+	
10						+		+
11	+		+					
12		+				+		
13				+	+			
14	+							+
15			+			+		
16		+		+				
17	+				+			
18				+			+	
19			+			+		
20		+			+			
21	+			+				
22			+			+		
23		+		+				
24	+							+

Где R – радиус кривизны траектории частицы в магнитном поле; p – шаг винтовой линии траектории частицы в магнитном поле; a_{τ} и a_n – тангенциальная и нормальная составляющие ускорения частицы внутри конденсатора; v – скорость частицы внутри конденсатора.

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 2.

Определить ускоряющую разность потенциалов, которую должен пройти в электрическом поле электрон, обладающий скоростью $1,00 \cdot 10^6$ м/с, чтобы скорость его возросла в два раза.

Ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi$ можно найти, вычислив работу A сил электрического поля. Эта работа равна произведению заряда на разность потенциалов:

$$A = q_e \Delta\varphi. \quad (1)$$

Работа сил электрического поля равна в данном случае изменению кинетической энергии электрона:

$$A = E_{к2} - E_{к1} = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}, \quad (2)$$

где $E_{к1}$, $E_{к2}$ – кинетическая энергия электрона до и после прохождения ускоряющего поля; m_e – масса электрона; v_1 и v_2 – начальная и конечная скорости электрона.

Приравняв правые части равенств (1) и (2), получим

$$q_e \Delta\varphi = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = \frac{m_e (n v_1)^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = \frac{m_e v_1^2}{2} (n^2 - 1).$$

Отсюда искомая разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{m_e v_1^2}{2 q_e} (n^2 - 1) = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} (10^6)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} (2^2 - 1) = 8,53 \text{ В}. \quad (3)$$

В формуле (3) заряд электрона берется по модулю, поскольку силы электрического поля совершают положительную работу по перемещению электрона.

Ответ: $\Delta\varphi = 8,53 \text{ В}$.

Задача 3.

Электрон, обладающий скоростью $v = 4 \cdot 10^7$ м/с, влетает в плоский конденсатор, причем вектор его скорости лежит в плоскости, параллельной пластинам. Найти вертикальное смещение электрона на выходе из конденсатора. Расстояние между пластинами конденсатора $d = 1$ см, разность потенциалов $U = 300$ В, длина конденсатора $l = 5$ см. Пластины конденсатора горизонтальны.

Электрон в конденсаторе движется под действием электрической силы. Сила тяжести электрона оказывается на много порядков меньше электрической силы, поэтому ею можно пренебречь. В этом случае становится безразлично, куда направлено электрическое поле в конденсаторе: вверх или вниз. Траектория движения электрона в конденсаторе показана на рис. 4.

Напряженность электрического поля в конденсаторе

$$E = \frac{U}{d}, \quad (4)$$

где U – напряжение между пластинами; d – расстояние между пластинами.

Тогда электрическая сила, действующая на электрон,

$$F = e E = \frac{eU}{d}. \quad (5)$$

Под действием этой силы электрон будет двигаться по вертикали равноускоренно с ускорением

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eU}{m d}. \quad (6)$$

Уравнения движения электрона по осям координат:

$$x = v_0 t; \quad (7)$$

$$y = \frac{at^2}{2}. \quad (8)$$

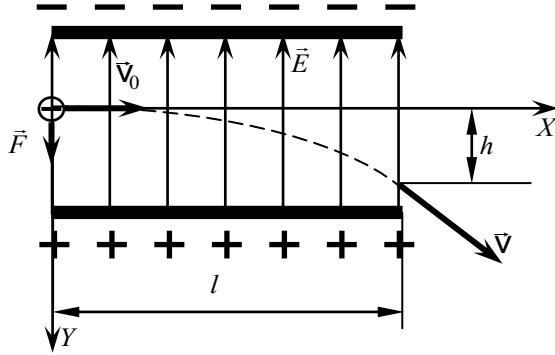


Рис. 4.

При вылете из конденсатора в момент $t = t_k$ координата $x(t_k) = l$, поэтому

$$l = v_0 t_k \quad \text{и} \quad t_k = \frac{l}{v_0}. \quad (9)$$

Смещение по вертикали за время t_k с учетом выражений (6) и (9)

$$h = y(t_k) = \frac{at_k^2}{2} = \frac{eUl^2}{2mdv_0^2} =$$

$$= \frac{1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 300 (0,05)^2}{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 0,01 (4 \cdot 10^7)^2} = 4,12 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,12 \text{ мм}.$$

В расчетную формулу подставляется модуль заряда электрона, так как знак заряда был учтен при определении направления электростатической силы, действующей на электрон.

Ответ: $h = 4,12 \text{ мм}$.

Задача 4.

Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = 400$ В, попал в однородное магнитное поле напряженностью $H = 1$ кА/м. Определить радиус кривизны траектории электрона в магнитном поле, если вектор скорости перпендикулярен линиям поля.

Траектория движения электрона показана на рис. 5. На движущийся в магнитном поле электрон действует магнитная составляющая силы Лоренца $\vec{F}_M = q[\vec{v}, \vec{B}]$, направленная перпендикулярно вектору скорости \vec{v} . Под действием этой силы электрон будет двигаться по дуге окружности.

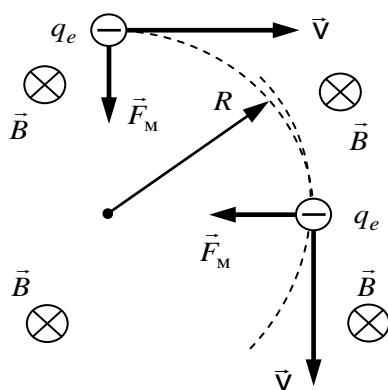


Рис. 5.

По второму закону Ньютона

$$\vec{F}_M = m\vec{a}_n,$$

где $a_n = v^2/R$ – нормальное ускорение.

В скалярной форме имеем

$$|q_e|vB \sin \alpha = \frac{m_e v^2}{R}, \quad (10)$$

где q_e – заряд электрона; v – скорость электрона; B – индукция магнитного поля; α – угол между векторами v и \vec{B} (так как в задаче $\vec{v} \perp \vec{B}$, то $\alpha = 90,0^\circ$); m_e – масса электрона; R – радиус кривизны траектории.

Из соотношения (10) получаем

$$R = \frac{m_e v}{|q_e| B}. \quad (11)$$

Скорость электрона найдем из закона сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = |q_e| \Delta\varphi,$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2|q_e|\Delta\varphi}{m_e}}.$$

Магнитную индукцию поля выразим через напряженность поля:

$$B = \mu_0 H.$$

Подставляя найденные выражения для скорости v и индукции B в формулу (11) для радиуса кривизны, получаем

$$R = \frac{m_e}{|q_e| \mu_0 H} \sqrt{\frac{2|q_e|\Delta\varphi}{m_e}} = \frac{1}{\mu_0 H} \sqrt{\frac{2m_e\Delta\varphi}{|q_e|}}.$$

Произведем вычисления:

$$R = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 400}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 53,7 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 53,7 \text{ мм}.$$

Ответ: $R = 53,7$ мм.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. СПб., М.: Лань, 2010
2. *Детлаф А.А.* Курс физики. / Детлаф А.А., Яворский Б.М. М.: Высшая школа, 2009.
3. *Прошкин С.С., Ниженский Н.В., Самолетов В.А.* Сборник задач по электродинамике и квантовой физике. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013, - 411 с.
4. *Савельев И.В.* Курс физики, Т. 2. СПб., М.: Лань, 2010.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, Т. 3, М., Наука, 2009.
6. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Высшая школа, 2009.
7. *Чертов А.Г.* Задачник по физике. / Чертов А.Г., Воробьев А.А. М.: Высшая школа, 2008.
8. *Яворский Б.М.* Основы физики, Т. 2. / Яворский Б.М., Пинский А.А. М.: Наука, 2009

ПРИЛОЖЕНИЯ
Основные физические постоянные

Таблица 4.

Физическая величина	Численное значение
Скорость света в вакууме	$c=2,9979250(10)\cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6,672\cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг·с ²)
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02\cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807\cdot 10^{-23}$ Дж/К
Молярная газовая постоянная	$R=8,314$ Дж/(К·моль)
Элементарный заряд	$e = 1,602\cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	$m_e = 0,911\cdot 10^{-30}$ кг = 0,511 МэВ
Масса протона	$m_p = 1,672\cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Планка	$h = 6,626\cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar=h/2\pi= 1,0546\cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67\cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
Постоянная Ридберга	$R = 3,29\cdot 10^{15}$ с ⁻¹
	$R' = 1,10\cdot 10^7$ м ⁻¹
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85\cdot 10^{-12}$ Ф·м ⁻¹
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,257\cdot 10^{-6}$ Гн/м

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Требования к содержанию отчета и к решению задач по расчетно – графической работе.....	4
2. Учебные материалы к разделу «Электромагнетизм».....	5
3. Задание для расчетно-графической работы.....	18
4. Примеры решения задач.....	22
Рекомендательный библиографический список.....	27
Приложения.....	28
Содержание	29