

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра общей физики

А.А. Васильев, С.А. Бордзиловский, В.С. Воробьев,
А.П. Ершов, М.И. Захаров, О.Е. Терещенко, А.С. Юношев

ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ С ОТВЕТАМИ

ЧАСТЬ 1

Учебно-методическое пособие

Новосибирск

2013

Васильев А.А., Бордзиловский С.А., Воробьев В.С., Ершов А.П., Захаров М.И., Терещенко О.Е., Юношев А.С. Избранные задачи по общей физике с ответами, часть 1. Учеб.-метод. Пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013.– 80 с.

Учебно-методическое пособие представляет собой первую часть задачника, составленного в рамках программы годовичного курса физики, читаемого на ММФ НГУ для студентов 4-го курса. Сборник охватывает такие разделы физики как «Электромагнитное поле» и «Специальная теория относительности». Сборник ограничен разумным количеством задач, исходя из учебного плана один семинар в неделю и по два контрольных задания в каждом семестре.

Сборник состоит из следующих разделов: 1. «Краткая теория» с основными законами физики и справочными формулами, которые позволяют напомнить студентам изучаемый на семинаре материал, не прибегая к дополнительным учебникам; 2. «Основные задачи» рекомендованные для решения на семинарах; 3. «Контрольные задания», в которых собраны задачи, предназначенные для самостоятельной работы студента; 4. В разделе «Ответы и указания для решения» приведены ответы, облегчающие контроль правильного решения при самостоятельной работе; 5. Программа по физике для студентов 4-го курса ММФ НГУ.

При составлении сборника учитывалась специфика аудитории студентов-математиков, которая позволяет им решать не только стандартные задачи для усвоения основных законов физики, но и применить математическую подготовку при решении задач повышенной сложности для более глубокого усвоения теории электромагнетизма.

Учебно-методическое пособие подготовлено в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009–2018 г.г.

© Новосибирский государственный университет, 2013

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Семинар 1. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ. ДИПОЛЬ. ТЕОРЕМА ГАУССА. УРАВНЕНИЕ ПУАССОНА. ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ ЗАРЯДОВ

Уравнения Максвелла в электростатике имеют вид (гауссова система единиц)

$$\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi\rho, \quad \nabla \times \vec{E} = 0, \quad (1.1)$$

где ρ – объемная плотность электрического заряда; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{D} – вектор электрической индукции. В однородной изотропной среде вектор электрической индукции пропорционален напряженности поля:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (1.2)$$

где ε – диэлектрическая постоянная (проницаемость) среды. В вакууме $\varepsilon = 1$.

Интегральная форма первого из уравнений Максвелла носит название *теоремы Гаусса*:

$$\oint_S \vec{D} \vec{n} da = 4\pi q, \quad (1.3)$$

где S – замкнутая поверхность; da – элемент поверхности;

\vec{n} – внешняя нормаль к поверхности; q – заряд внутри этой поверхности.

Уравнения (1.1) определяют граничные условия для двух сред, разделенных некоторой поверхностью. Если ввести σ – поверхностную плотность зарядов на этой поверхности и \vec{n} – нормаль к поверхности, которая направлена из среды 1 в среду 2, то из уравнений (1.1) следуют граничные условия

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = 4\pi\sigma, \quad \vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0. \quad (1.4)$$

В силу того что электростатическое поле является *безвихревым*, его можно выразить как градиент *скалярного потенциала*

$$\vec{E} = -\nabla\varphi, \quad \varphi(\vec{r}) = -\int_{r_0}^r \vec{E}d\vec{l} + \varphi(\vec{r}_0), \quad (1.5)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки наблюдения, $\varphi(\vec{r}_0)$ – значение потенциала в исходной точке, $\varphi(\infty) = 0$.

Потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi\rho}{\varepsilon}. \quad (1.6)$$

Потенциал и поле точечного заряда, помещенного в начало координат в среде с диэлектрической проницаемостью ε равны

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{q}{\varepsilon r}, \quad \varphi(\infty) = 0, \quad \vec{E}(\vec{r}) = \frac{q\vec{r}}{\varepsilon r^3}, \quad (1.7)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки наблюдения.

Для непрерывного распределения заряда с объемной плотностью $\rho(\vec{r})$ потенциал и напряженность поля в вакууме вычисляются по формулам

$$\varphi(\vec{r}) = \int_V \frac{\rho(\vec{r}')dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \quad \vec{E}(\vec{r}) = \int_V \frac{\rho(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}, \quad (1.8)$$

где $\rho(\vec{r}')dV'$ – заряд элементарного объема в точке с радиус-вектором \vec{r}' . Последние соотношения представляют собой математическую формулировку принципа суперпозиции для потенциалов и полей.

Важным объектом электростатики является электрический диполь, которым называется пара разноименных зарядов $+q$ и $-q$ разделенных промежутком \vec{l} , малым по сравнению с расстоянием до точки наблюдения \vec{r} .

Дипольным моментом называется произведение $\vec{p} = q\vec{l}$, причем вектор \vec{p} направлен от отрицательного заряда к положительному. Электрический диполь описывает поле молекул, у которых центры тяжести положительного и отрицательного зарядов смещены друг относительно друга. Потенциал и поле диполя в вакууме описываются следующими выражениями (на расстояниях $|\vec{r}| \gg |\vec{l}|$):

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\vec{p}\vec{r}}{r^3} = -\vec{p}\nabla\left(\frac{1}{r}\right), \quad \vec{E} = \frac{3(\vec{p}\vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}}{r^3}. \quad (1.9)$$

Потенциальная энергия электрического диполя во внешнем электрическом поле:

$$W = -\vec{p}\vec{E} \quad (1.10)$$

Вращательный момент, действующий на диполь во внешнем электрическом поле:

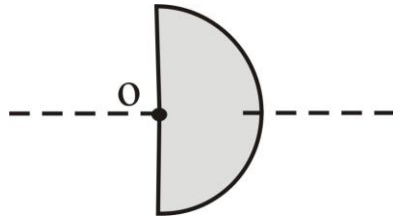
$$\vec{N} = [\vec{p} \times \vec{E}] \quad (1.11)$$

Из граничных условий (1.4) и из условия непрерывности потенциала следует, что на границе раздела двух сред с поверхностным зарядом σ на единицу площади выполняются условия

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \varepsilon_1 \frac{d\varphi_1}{dn} - \varepsilon_2 \frac{d\varphi_2}{dn} = 4\pi\sigma, \quad (1.12)$$

где вектор нормали \vec{n} направлен из среды 1 в среду 2.

1.1. Определить поле в центральной точке O равномерно заряженного по объему полушара радиуса R . Общий заряд полушара равен $Q/2$.



1.2. Тонкий диск радиуса R имеет заряд σ на единицу поверхности. Найти потенциал $\varphi(z)$ и напряженность электрического поля $\vec{E}(z)$ на оси диска. Найти потенциал на краю диска и в центре.

1.3. В системе трех концентрических сфер радиусами R_1 , R_2 и R_3 на средней сфере находится заряд Q , а остальные две заземлены. Определить напряженность поля и потенциал в зависимости от \vec{r} .

1.4. Два диполя \vec{p}_1 и \vec{p}_2 расположены вдоль одной прямой на расстоянии \vec{r} друг от друга. Определить силу их взаимодействия. Определить энергию системы.

1.5. Поверхностное натяжение α сферической жидкой пленки, создает дополнительное давление P , обратно пропорциональное радиусу пленки R . Будет ли устойчивым мыльный пузырь, если его оболочке сообщить некоторый заряд Q ? (Сила поверхностного натяжения $F = \alpha l$, где α – поверхностное натяжение, l – длина границы поверхности.)

Семинар 2. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. МЕТОД ЗЕРКАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

Внутри проводника, находящегося в постоянном электрическом поле $\vec{E} = 0$, а потенциал $\varphi = const$. Если среда l является металлом, а среда 2 характеризуется диэлектрической проницаемостью ε , то из (1.4) следуют граничные условия на поверхности проводника:

$$E_t = 0, \quad D_n = 4\pi\sigma \quad (2.1)$$

Из последнего соотношения можно определить плотность заряда на поверхности металла:

$$\sigma = -\frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{d\varphi}{dn} \quad (2.2)$$

Емкостью конденсатора называют отношение заряда на одной из обкладок к разности потенциалов между обкладками

$$C = \frac{q}{V}, \quad (2.3)$$

где $V = \Delta\varphi$ обычно называют *напряжением* на конденсаторе. Емкость плоского конденсатора, заполненного диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε , с площадью обкладок S и расстоянием между обкладками d :

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}. \quad (2.4)$$

Энергия электрического поля может быть определена путем интегрирования по объему произведения плотности заряда и потенциала, либо произведения напряженности поля и вектора электрической индукции:

$$W = \frac{1}{2} \int \rho\varphi dV, \quad W = \frac{1}{8\pi} \int \vec{E}\vec{D}dV. \quad (2.5)$$

Для конденсатора энергию можно выразить двумя способами:

$$W = \frac{q^2}{2C}, \quad W = \frac{CV^2}{2}. \quad (2.6)$$

2.1. Металлические полуплоскости образуют двухгранный прямой угол. Заряд Q расположен в точке (a, b) от вершины угла. Найти распределение индуцированных на плоскостях зарядов $\sigma(x, z)$ и $\sigma(y, z)$.

2.2. Заряд Q помещен между двумя параллельными проводящими плоскостями таким образом, что от ближайшей плоскости он находится на расстоянии a . Плоскости расположены на расстоянии $3a$ друг от друга. Определить силу взаимодействия заряда с плоскостями.

2.3. Заряд Q расположен на расстоянии l от центра заземленной сферы радиуса R ($l > R$). Определить поверхностную плотность заряда на сфере.

2.4. Изменится ли емкость плоского конденсатора (площадь пластин S , расстояние между ними d), если:

- а) параллельно пластинам расположить металлическую сетку на расстоянии a от одной из обкладок;
- б) затем соединить сетку с этой обкладкой;
- в) или заземлить сетку и соединить пластины проводом таким образом, чтобы сетка и пластины представляли собой две обкладки конденсатора.

Семинар 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ. ВЕКТОРЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ИНДУКЦИИ. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

В случае диэлектриков, которые состоят из множества зарядов, в уравнения Максвелла (1.1) входит *макроскопическое* (усредненное) *электрическое поле* $\vec{E} = \langle \vec{e} \rangle$, где \vec{e} – микроскопическое молекулярное поле, и

макроскопическая (усредненная) плотность заряда $\rho = N \langle \rho_{\text{мол}} \rangle$, где $\rho_{\text{мол}}$ – молекулярная плотность заряда, а N – число молекул в единице объема.

При включении поля в диэлектрической среде индуцируется множество атомных или молекулярных диполей $\vec{p}_{\text{мол}}$. Имеется несколько механизмов индуцирования дипольного момента, например: *электронная и / или ионная поляризация, ориентационная поляризация*.

Вектор поляризации \vec{P} представляет собой дипольный момент единицы объема:

$$\vec{P} = N \langle \vec{p}_{\text{мол}} \rangle = \sum_{i=1}^N \vec{p}_{\text{мол},i}, \quad (3.1)$$

где $\langle \vec{p}_{\text{мол}} \rangle$ – средний дипольный момент молекулы. При выводе уравнений электростатики для макроскопических (усредненных) полей выделяют два сорта зарядов: ρ – *свободные* (нескомпенсированные) заряды, которые входят в уравнения (1.1) для усредненных полей и ρ_p – *поляризационные* заряды, которые индуцированы электрическим полем. Вектор поляризации можно выразить через плотность поляризационных зарядов:

$$\nabla \vec{P} = -\rho_p. \quad (3.2)$$

Это уравнение показывает, что объемная плотность поляризационных зарядов возникает только в том случае, когда поляризация неоднородна. Из него также следует граничное условие на поверхности раздела двух диэлектриков:

$$\vec{n}(\vec{P}_1 - \vec{P}_2) = \sigma_p, \quad (3.3)$$

где вектор нормали \vec{n} направлен из среды 1 в среду 2, а σ_p – поверхностная плотность поляризационных зарядов. Физический смысл уравнения (3.3) заключается в том, что при однородной поляризации диэлектрического материала *поверхностная плотность поляризационных зарядов на границе диэлектрика с вакуумом равна поляризации внутри материала*.

Вектор электрической индукции выражается через напряженность поля и поляризацию диэлектрика

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}. \quad (3.4)$$

Для того чтобы решать задачи электростатики соотношение (3.4) необходимо дополнить *уравнениями среды*, т. е. зависимостями $\vec{P}(\vec{E})$ или $\vec{D}(\vec{E})$. Для *изотропных однородных* сред вектор поляризации \vec{P} параллелен \vec{E} и в первом приближении зависимость $\vec{P}(\vec{E})$ полагают линейной. Тогда

$$\vec{P} = \chi \vec{E}, \quad \varepsilon = 1 + 4\pi\chi, \quad (3.5)$$

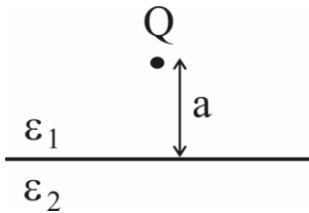
где χ – *диэлектрическая восприимчивость*, а ε – *диэлектрическая постоянная* (проницаемость) среды.

Уравнения (3.3) и (3.4) позволяют также выразить плотность поляризационных зарядов на границе двух сред 1 и 2 через электрические поля в этих средах и их диэлектрические проницаемости:

$$\sigma_p = \frac{1}{4\pi} [(\varepsilon_1 - 1)E_{n1} - (\varepsilon_2 - 1)E_{n2}], \quad (3.6)$$

где E_{n1}, E_{n2} – нормальные компоненты поля в первой и второй среде соответственно.

3.1. Точечный заряд q расположен на плоской границе раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 . Определить напряженность \vec{E} , индукцию \vec{D} и потенциал φ в обеих средах.



3.2. Заряд Q расположен на расстоянии a вблизи плоской границы двух диэлектриков с ε_1 и ε_2 . Найти напряженность электрического поля \vec{E} в каждом из диэлектриков. Какова сила, действующая на Q ?

3.3. Заряд Q , расположенный в диэлектрической среде с проницаемостью ε , удален на расстояние a от проводящей плоскости. Определить распределение индуцированных на плоскости зарядов и силу, действующую на Q .

3.4. Определить емкость сферического конденсатора, заполненного слоями диэлектрика с проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 (геометрические размеры первого слоя: $a < r < b$, второго: $b < r < c$). Определить распределение связанных зарядов.

3.5. Определить энергию диполя U и силу его взаимодействия с заземленным проводящим шаром радиуса R , погруженным в жидкий диэлектрик с показателем ϵ . Диполь расположен на расстоянии $a > R$ от центра шара и ориентирован перпендикулярно соединяющей линии, его дипольный момент равен \vec{p} . Каков вращательный момент, действующий на диполь?

Семинар 4. ПОСТОЯННЫЙ ТОК. ПРОВОДИМОСТЬ, СОПРОТИВЛЕНИЕ, ЭДС. МОЩНОСТЬ ТОКА. ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА

В простейшей теории электропроводности плотность тока \vec{j} и электропроводность (проводимость) σ выражаются через n – число свободных электронов в единице объема, e , m – заряд и массу электрона соответственно; \vec{u}_{op} – среднюю дрейфовую скорость электронов и τ – среднее время между столкновениями электрона с решеткой:

$$\vec{j} = ne\vec{u}_{op}, \quad \sigma = \frac{ne^2\tau}{m}. \quad (4.1)$$

Закон сохранения заряда записывается в виде уравнения непрерывности

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (4.2)$$

В случае постоянного тока накопления зарядов не происходит, поэтому

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0. \quad (4.3)$$

Из уравнения (4.3) следует, что нормальная компонента \vec{j} на поверхности раздела двух сред с различными проводимостями непрерывна

$$\vec{n}(\vec{j}_1 - \vec{j}_2) = 0, \quad (4.4)$$

где \vec{j}_i – плотность тока в i -й среде, а нормаль \vec{n} направлена из первой среды во вторую.

В металлах в широком диапазоне плотностей токов экспериментально установлен закон Ома. Ниже в левой колонке записан закон Ома в диффе-

ренциальной форме, а в правой колонке этот же закон записан для квазилинейных токов (т. е. в случае, когда можно ввести контур тока):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad I = \frac{V}{R}, \quad (4.5)$$

где I – полный ток; V – напряжение на концах проводника;

R – сопротивление проводника. В случае цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad \text{где } \rho = \frac{1}{\sigma} \text{ – удельное электросопротивление, } l, S \text{ – длина и}$$

площадь поперечного сечения проводника, соответственно.

Постоянный ток возможен только в том случае, когда в цепи существуют источники, создающие *стороннюю электродвижущую силу* (индукционного, химического, теплового или механического происхождения):

$$\varepsilon = \oint \vec{E}^{\text{стр}} d\vec{l}, \quad (4.6)$$

где $\vec{E}^{\text{стр}}$ – поле сторонних сил, входящее в обобщенный закон Ома:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^{\text{стр}}), \quad (4.7)$$

Для квазилинейных токов выполняются *законы Кирхгофа*.

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов в точке разветвления цепи (узле) равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0, \quad (4.8)$$

Второй закон Кирхгофа. В любом замкнутом контуре с номером k , который можно выделить в произвольной цепи, алгебраическая сумма падений напряжения $I_{ik} R_{ik}$ равна сумме сторонних ЭДС, действующих в данном контуре:

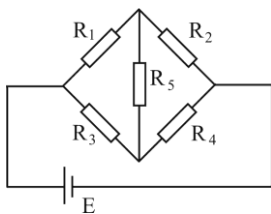
$$\sum_i I_{ik} R_{ik} = \sum_i \varepsilon_{ik}. \quad (4.9)$$

При составлении алгебраических уравнений следует обходить контур в одном направлении и учитывать направление токов и знаки эдс.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме позволяет определить удельную тепловую мощность тока – количество тепла, выделяемого в единицу времени в единице объема проводника:

$$q = \rho j^2 \quad (4.9)$$

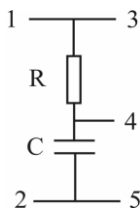
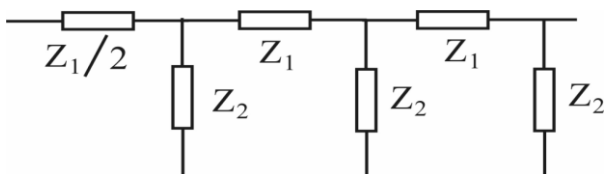
При протекании постоянного тока I в течение времени t в проводнике с постоянным сопротивлением R выделяется полное количество теплоты :



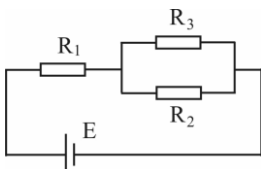
$$Q = RI^2t. \quad (4.10)$$

4.1. Мостовая схема имеет сопротивления $R_1 \div R_4$ в плечах квадрата и R_5 , включенное в диагональ. Схема подключена концами второй диагонали к источнику с эдс E . При каком условии через диагональное сопротивление R_5 ток течь не будет? Каково общее сопротивление мостовой схемы?

4.2. Элемент с импедансом $Z_1/2$ и множество последующих элементов Z_1 включены в один из проводов двухпроводной линии. К каждому соединению Z_1 и второму проводу подключены элементы с импедансом Z_2 . Найти комплексный импеданс Z бесконечной цепочки из таких элементов. Что будет, если все импедансы будут чисто мнимые (конденсаторы, катушки индуктивности)?



4.3. На контакты 1–2 RC -цепочки из последовательно соединенных сопротивления R и конденсатора C подается напряжение в виде ступеньки с амплитудой U_0 . Какова форма сигнала, регистрируемого на R и C соответственно (контакты 3–4 и 4–5)?



4.4. Батарея с эдс E , сопротивление R_1 и параллельно соединенные между собой сопротивления R_2 и R_3 составляют замкнутую цепь. При каком значении R_3 мощность, рассеиваемая на этом сопротивлении, не зависит от величины R_3 ?

Семинар 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА. ФОРМУЛА БИО-САВАРА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ. ВЕКТОРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Пусть K и K' – две инерциальные системы отсчета с параллельными осями, причем скорость системы K' относительно K направлена вдоль оси ox и равна V , кроме того, в начальный момент времени обе системы совпадали. Тогда формулы преобразования для компонент электрического и магнитного полей имеют вид (штрихованные величины измерены в системе K'):

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x, & E'_y &= \Gamma \left(E_y - \frac{V}{c} B_z \right), & E'_z &= \Gamma \left(E_z + \frac{V}{c} B_y \right), \\ B'_x &= B_x, & B'_y &= \Gamma \left(B_y + \frac{V}{c} E_z \right), & B'_z &= \Gamma \left(B_z - \frac{V}{c} E_y \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $\Gamma = \left[1 - \left(\frac{V}{c} \right)^2 \right]^{-1/2}$;

Основные уравнения магнитостатики в дифференциальной форме:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (5.2)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции, \vec{H} – вектор магнитного поля. В магнитной среде эти два вектора связаны соотношением:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (5.3)$$

где μ – магнитная проницаемость среды.

Несмотря на исторически сложившуюся терминологию, фундаментальной величиной магнитного поля является вектор \vec{B} , так как основное свойство магнитного поля – отсутствие магнитных зарядов – выражается первым из уравнений (5.2). В вакууме $\mu = 1$ и $\vec{H} \equiv \vec{B}$.

Закон Био и Савара. Магнитную индукцию \vec{B} можно рассчитать путем интегрирования вкладов в поле $d\vec{B}$, создаваемых элементарными токами $I d\vec{l}$, текущими по бесконечно тонкому проводу с элементом длины $d\vec{l}$:

$$d\vec{B} = I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}, \quad (5.6)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из точки местонахождения элемента тока $I d\vec{l}$ в точку наблюдения. Для магнитного поля справедлив *принцип линейной суперпозиции*.

Метод векторного потенциала. Первое соотношение (5.2) позволяет представить \vec{B} в виде ротора *векторного потенциала*

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (5.4)$$

Подстановка уравнения (5.4) во второе из соотношений (5.2) вместе с условием $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ дает уравнение Пуассона для каждой из декартовых координат векторного потенциала:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}. \quad (5.8)$$

По аналогии с электростатикой (см. уравнения (1.8)) можно записать решение для \vec{A} в интегральной форме

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{\vec{j}(\vec{r}') dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}. \quad (5.9)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки наблюдения, \vec{r}' – радиус-вектор элемента тока.

Во всех выражениях настоящего параграфа переход от объемного распределения плотности тока к линейным токам получается заменой

$$\vec{j} dV \rightarrow I d\vec{l}. \quad (5.10)$$

Направление $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока положительных зарядов.

Магнитным дипольным моментом петли площадью S любой формы, по которой протекает ток I , называется произведение

$$\vec{m} = \frac{IS}{c} \vec{n}, \quad (5.11)$$

где \vec{n} – нормаль к плоскости петли, направление которой определяется по направлению тока, согласно правила буравчика.

Векторный потенциал и поле, которые создает магнитный момент \vec{m} на расстояниях $|\vec{r}| \gg a$, где a – характерный размер петли с током:

$$\vec{A} = \frac{[\vec{m} \times \vec{r}]}{r^3} \quad \vec{B} = \frac{3(\vec{m}\vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \quad (5.12)$$

5.1. Заряд Q движется с постоянной скоростью \vec{V} . Определить электрическое и магнитное поле в точках, удаленных от заряда на расстояние \vec{r} .

5.2. Два заряда q_1 и q_2 расположены вдоль прямой параллельной оси oy и движутся параллельным курсом вдоль оси ox со скоростью v . Расстояние между зарядами равно d . Найти силу взаимодействия между двумя зарядами.

5.3. Заряд Q движется к точке $x = 0$ со стороны положительных значений x со скоростью \vec{v} . В момент времени $t = 0$ заряд достигает начала координат и меняет направление движения на обратное. Найти распределение электрического поля.

5.4. Определить напряженность магнитного поля на оси кругового (радиус r_0) тока I . Изменится ли поле в центре кольца, если его согнуть по диаметру так, чтобы плоскости полуколец составляли прямой угол?

5.5. Определить векторный потенциал \vec{A} и магнитное поле \vec{B} для длинного тонкого прямолинейного проводника с током I . Ток течет в положительном направлении оси oz .

Семинар 6. ТЕОРЕМА О ЦИРКУЛЯЦИИ. МАГНЕТИКИ. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Уравнения (5.2) определяют граничные условия на поверхности раздела двух сред с различными магнитными свойствами:

$$\vec{n}(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad \vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \frac{4\pi}{c} \vec{i} \quad (6.1)$$

где \vec{i} – плотность поверхностного тока, а нормаль \vec{n} направлена из первой среды во вторую.

Интегральная форма второго уравнения (5.2) носит название *теоремы о циркуляции (закон Ампера)*:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{4\pi}{c} I, \quad (6.2)$$

где I – полный ток, охватываемый контуром L .

6.1. Определить напряженность магнитного поля:

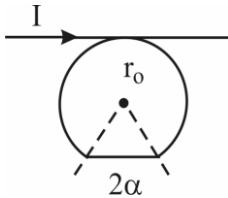
а) ток I течет по длинному прямолинейному цилиндрическому проводнику радиуса R ; по толстостенной трубе с R_1 и R_2 ;

б) ток I течет по тонкой ленте ширины a с плотностью тока $j = I/a$;

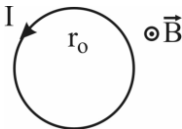
в) ток с плотностью j течет по плоскости xoz в положительном направлении оси oz ;

г) ток течет по соленоиду бесконечно большой длины с количеством витков на единицу длины n и силой тока в каждом витке i (поле внутри и снаружи соленоида);

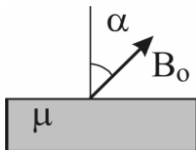
д) ток течет по обмотке тора с радиусами R_1 и R_2 (полное число витков равно N). Найти поле внутри обмотки.



6.2. Из участка длинного прямолинейного провода сформирована кольцевая петля радиуса r_0 (угол $2\pi - 2\alpha$) и линейный участок (угол 2α). Определить магнитное поле \vec{B} в центре этой петли, если по проводнику течет ток I .



6.3. При какой напряженности магнитного поля \vec{B} кольцо радиуса r_0 с током I разорвется, если кольцо имеет прочность на разрыв F_0 ? Поле \vec{B} перпендикулярно плоскости кольца.



6.4. На границе раздела магнетик-вакуум поле в вакууме равно \vec{B}_0 и составляет угол α с нормалью.

Определить поле в магнетике (проницаемость μ) вблизи этой границы.

Семинар 7. ДВИЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ. СИЛА ЛОРЕНЦА. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ, СИЛА АМПЕРА

Сила, действующая на заряженную частицу в электромагнитном поле, называется *силой Лоренца*:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c}\vec{v} \times \vec{B}, \quad (7.1)$$

где \vec{v} , q – скорость и заряд частицы, соответственно. Если однородное магнитное поле \vec{B} перпендикулярно плоскости, в которой происходит движение частицы со скоростью v_{\perp} и с зарядом q , то траектория частицы

является окружностью радиуса $R_L = \frac{mv_{\perp}c}{qB}$ (*ларморовский радиус*).

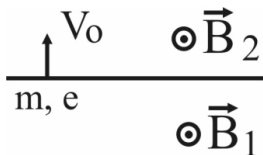
Угловая частота вращательного движения $\omega_C = \frac{qB}{mc}$ называется *циклотронной частотой*.

Из уравнения (7.1) можно вычислить силу $d\vec{F}$, действующую на проводник с элементом тока $Id\vec{l}$ в магнитном поле \vec{B} (*формула Ампера*):

$$d\vec{F} = \frac{I}{c}d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (7.2)$$

7.1. Релятивистская частица массы m с зарядом q влетает в однородное электрическое поле \vec{E} со скоростью \vec{v}_0 , причем $\vec{v}_0 \perp \vec{E}$. Определить скорость движения и траекторию частицы.

7.2. Нерелятивистская частица массы m с зарядом q влетает в однородное магнитное поле \vec{B} , причем скорость \vec{v}_0 составляет угол α с \vec{B} . Определить характер движения.



7.3. Плоскость служит границей раздела однородных магнитных полей \vec{B}_1 и \vec{B}_2 , параллельных друг другу. С этой плоскости перпендикулярно ей вылетает электрон со скоростью V_0 . Определить дрейфовую скорость электрона вдоль границы. Заряд e и масса электрона m известны.

7.4. Однородные поля \vec{E} и \vec{B} параллельны друг другу (плоскость xoy) и направлены вдоль оси oy . Определить характер движения нерелятивистской частицы m , если в момент времени $t = 0$ она влетает со скоростью \vec{v}_0 , двигаясь по отношению к силовым линиям: а) параллельно $-v_y = v_0$; б) перпендикулярно $-v_x = v_0$.

Семинар 8. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. САМОИНДУКЦИЯ И ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ. ТОК ФУКО. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. СВЕРХПРОВОДНИКИ.

Согласно закону индукции Фарадея, электродвижущая сила в контуре пропорциональна скорости изменения потока вектора магнитной индукции через этот контур:

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.1)$$

где $\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} d\vec{l}$ – эдс индукции в контуре; $\Phi = \int_S \vec{B} \vec{n} da$ – поток вектора

магнитной индукции через контур; S – поверхность, ограниченная контуром C . Знак индукционной эдс определяется по *правилу Ленца*, согласно которому индукционный ток и соответствующая ему эдс индукции имеют такое направление, которое препятствует изменению потока через контур.

Соотношение (8.1) преобразуется в дифференциальное выражение, применимое в свободном пространстве:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (8.2)$$

Ток I , протекающий в контуре, создает магнитный поток через этот контур, который, в свою очередь, пропорционален силе тока

$$\Phi = \frac{1}{c} LI. \quad (8.3)$$

Коэффициент пропорциональности L называется *самоиндукцией* (или *индуктивностью*) контура. Отсюда следует, что при изменении тока в контуре возникает *эдс самоиндукции*:

$$\mathcal{E}_{\text{си}} = -\frac{1}{c^2} L \frac{dI}{dt}. \quad (8.4)$$

Магнитная энергия квазилинейного тока выражается через индуктивность проводника, по которому протекает ток I :

$$W_{\text{м}} = \frac{1}{2c^2} LI^2. \quad (8.5)$$

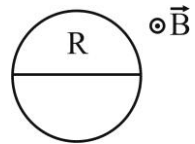
Если имеются несколько индуктивно связанных контуров, то для полного потока через i -й контур можно записать

$$\Phi_i = \frac{1}{c} \sum_k L_{ik} I_k, \quad (8.6)$$

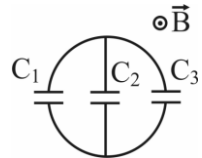
где L_{ik} – коэффициенты взаимной индуктивности между i -м и k -м контуром. Для двух магнитно связанных контуров имеет место теорема взаимности

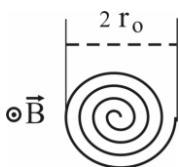
$$L_{12} = L_{21}. \quad (8.7)$$

8.1. Кольцо радиуса R с диаметральной перемычкой помещено в магнитное поле $B = B_0 \cos \alpha x$, перпендикулярное плоскости кольца. Определить токи, если сопротивление единицы длины проводника равно ρ . Индуктивность кольца без перемычки L .



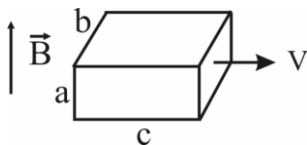
8.2. Контур, имеющий вид окружности радиуса a с диаметральной перемычкой, помещен в магнитное поле $B = B_0 (1 - t/\tau)$, перпендикулярное контуру. В полуокружности и перемычку включены конденсаторы C_1 , C_2 и C_3 . Определить конечные заряды на обкладках каждого конденсатора.





8.3. Плоская спираль с большим числом витков n и наружным радиусом r_0 помещена в магнитное поле $B = B_0 \cos \alpha t$, перпендикулярное плоскости спирали. Считая расстояние между витками одинаковым определить эдс индукции.

8.4. Сверхпроводящее кольцо радиусом a с индуктивностью L находится в однородном магнитном поле \vec{B} . Вначале \vec{B} перпендикулярно плоскости кольца. Затем кольцо поворачивают так, что его плоскость становится параллельной \vec{B} . Определить значение тока в кольце после поворота.



8.5. Определить разность потенциалов между боковыми плоскостями металлического бруска с размерами $a \times b \times c$, движущегося в магнитном поле \vec{B} со скоростью $\vec{v} \perp \vec{B}$. Какова поверхностная плотность заряда σ .

Семинар 9. ПЕРЕМЕННЫЕ ТОК И НАПРЯЖЕНИЕ. ВЕКТОНЫЕ ДИАГРАММЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Условие квазистационарности электромагнитного поля имеет вид:

$$T \gg \frac{l}{c}, \quad \omega \ll \frac{c}{l}, \quad (9.1)$$

где l – характерный размер системы, ω – частота поля, T – период колебаний поля. В этом случае можно пренебречь конечной скоростью распространения электромагнитных возмущений внутри системы и можно считать, что поле в каждый момент времени определяется мгновенным расположением зарядов. Сила тока во всех сечениях цепи, удовлетворяющей условию квазистационарности, одинакова.

Дифференциальное уравнение для тока I в замкнутой цепи с последовательно включенными сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C имеет вид:

$$I(t) = \frac{dq}{dt}, \quad \frac{L}{c^2} \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon(t), \quad (9.2)$$

где q – заряд на обкладках конденсатора; $\varepsilon(t)$ – эдс в контуре.

При гармонической зависимости эдс от времени $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{-i\omega t}$, последнее уравнение сводится к алгебраическому соотношению:

$$I(t) = \frac{\varepsilon(t)}{Z}, \quad Z = R + i\left(\frac{1}{\omega C} - \frac{\omega L}{c^2}\right), \quad (9.3)$$

где Z – комплексное сопротивление (импеданс) цепи.

Переход от комплексных переменных в значениях тока к действительным (измеряемым) значениям дает:

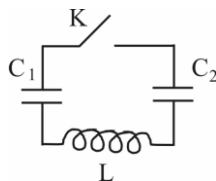
$$I(t) = \frac{\varepsilon_0 \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega L}{c^2} - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\left(\frac{\omega L}{c^2} - \frac{1}{\omega C}\right)}{R}. \quad (9.4)$$

Глубина проникновения переменного электромагнитного поля в проводник характеризуется толщиной скин-слоя:

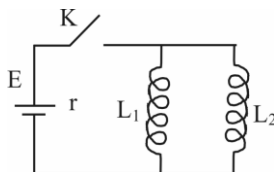
$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}, \quad (9.5)$$

где ω – частота поля, σ и μ – проводимость и магнитная проницаемость проводника.

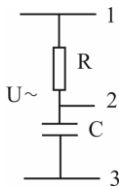
9.1. Электрическая цепь представляет последовательно соединенные конденсатор C_1 , катушку индуктивности L , конденсатор C_2 и ключ K . Определить I_{\max} и $Q_{2\max}$ после замыкания ключа K , если вначале заряд Q_1 был только на конденсаторе C_1 .



9.2. Найти установившиеся токи в параллельно соединенных сверхпроводящих катушках индуктивности L_1 и L_2 после подключения к ним с

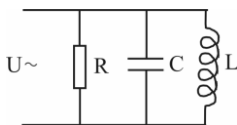


помощью ключа K батареи с эдс E и внутренним сопротивлением r .



9.3. На вход RC -цепочки в момент времени $t = 0$ подано напряжение $U_{13} = U_0 \cos \alpha t$. Определить U_R и U_C .

9.4. Аналогично предыдущей задаче рассмотреть также:
а) RL и б) LC -цепочки.



9.5. Определить токи и сопротивление цепи из параллельно соединенных RCL -элементов, подключенных к источнику $U = U_0 \cos \alpha t$. Наблюдаются ли в этой цепи резонансные явления?

9.6. Оценить толщину скин-слоя для меди при следующих условиях: проводимость $\sigma = 5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, $\mu \cong 1$, $\nu_l = 50 \text{ Гц}$, $\nu_2 = 1 \text{ МГц}$.

Семинар 10. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА ДЛЯ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ. ДЛИНА ОБЪЕКТА. СОБСТВЕННОЕ ВРЕМЯ

Пусть K и K' – две инерциальные системы отсчета с параллельными осями, причем скорость системы K' относительно K направлена вдоль оси ox и равна V , кроме того, в начальный момент времени обе системы совпадали. Тогда *преобразования Лоренца* для координат и времени имеют вид (штрихованные величины измерены в системе K'):

$$x' = \Gamma(x - Vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \Gamma\left(t - \frac{V}{c^2}x\right),$$

$$\text{где } \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - B^2}}, \quad B = \frac{V}{c}. \quad (10.1)$$

Обратные преобразования Лоренца получаются заменой V на $-V$.

Время, отсчитываемое по часам, движущимся вместе с частицей, называется *собственным временем* этой частицы. Из определения (10.1) можно

выразить интервал собственного времени $d\tau$ через интервал времени dt в лабораторной системе для частицы движущейся со скоростью $v(t)$:

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt = \frac{1}{\gamma} dt. \quad (10.2)$$

Собственное время частицы инвариантно относительно преобразований Лоренца.

10.1. Два события в неподвижной системе K имеют координаты (x_1, t_1) и (x_2, t_2) . Найти скорость системы, в которой: а) эти события одновременны; б) происходят в одной точке.

10.2. Система K' движется со скоростью V вдоль оси ox неподвижной системы K . Система K'' движется относительно K' со скоростью W вдоль оси $o'y'$. Соответствующие оси координат всех систем параллельны между собой. Установить взаимосвязь координат систем K'' и K .

10.3. На концах стержня, движущегося с $V = \frac{4}{5}c$ вдоль оси ox , вспыхивают две лампочки. Какова должна быть очередность вспышек в неподвижной системе K , чтобы для наблюдателя в системе K' движущегося стержня вспышки казались одновременными? В системе K длина стержня $L = 27$ м.

10.4. В неподвижной системе K стержень длиной $L = 1$ м наклонен под углом $\theta = 30^\circ$ к оси ox . Найти длину стержня L' и угол наклона θ' в K' -системе, движущейся со скоростью $V = \frac{24}{25}c$.

10.5. Прямолинейно движущийся источник I излучает сигналы с частотой ν_0 , приемник Π , находящийся на линии движения I , воспринимает эти сигналы. Определить зависимость частоты воспринимаемого сигнала ν от скорости излучателя V (эффект Доплера).



Семинар 11. СКОРОСТЬ ЧАСТИЦЫ. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ

Преобразования Лоренца для скоростей:

$$u'_x = \frac{u_x - V}{1 - \frac{u_x V}{c^2}}, \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - B^2}}{1 - \frac{u_x V}{c^2}}, \quad u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - B^2}}{1 - \frac{u_x V}{c^2}}. \quad (11.1)$$

Где введены обозначения для компонент скорости частицы в системе K :

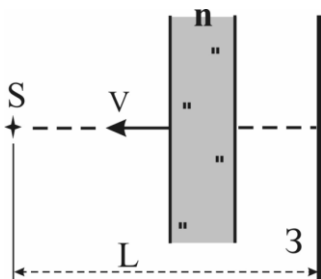
$$u_x = \frac{dx}{dt}, \quad u_y = \frac{dy}{dt}, \quad u_z = \frac{dz}{dt}; \text{ и в системе } K':$$

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}, \quad u'_y = \frac{dy'}{dt'}, \quad u'_z = \frac{dz'}{dt'}.$$

11.1. В неподвижной системе K частица движется со скоростью \vec{u} , направленной под углом θ к оси ox . Каков θ' в системе K' , движущейся вдоль ox со скоростью V ? Что наблюдается при $V \rightarrow c$? Какова \vec{u}' ?

11.2. Параллельный оси ox стержень длиной l_0 движется вдоль ou со скоростью W . Как выглядит движение этого стержня для наблюдателя в системе K' , движущейся вдоль ox со скоростью V ?

11.3. В релятивистскую реку на расстоянии h от берега упал камень. Через какое время волны достигнут берега, если скорость течения равна u , а скорость волн в неподвижной воде w ?



11.4. Плоскопараллельная прозрачная пластина толщиной l_0 , имеющая показатель преломления $n = c/v$ (v – скорость света в пластине), движется со скоростью V от зеркала к источнику S . Определить время, затрачиваемое световым импульсом на прохождение пути от излучателя до зеркала

и обратно. Зависит ли время от направления движения пластины?

Семинар 12. СИСТЕМА ЧАСТИЦ. ИМПУЛЬС И ЭНЕРГИЯ СВОБОДНЫХ ЧАСТИЦ. Ц-СИСТЕМА. УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СОУДАРЕНИЯ. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Релятивистский импульс и энергия:

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}, \quad E = \gamma m c^2, \quad (12.1)$$

где \vec{v} – скорость частицы; $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\beta = \frac{v}{c}$. Для того чтобы полу-

чить кинетическую энергию частицы T , необходимо из полной энергии вычесть энергию покоя $E_0 = mc^2$:

$$T = E - mc^2. \quad (12.2)$$

Соотношение между энергией и импульсом

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (12.3)$$

Для частиц с нулевой массой (фотоны, γ -кванты), скорость которых в любой системе равна c , энергия и импульс связаны соотношением

$$E = pc. \quad (12.4)$$

Энергия и импульс фотона связаны с его частотой ω соотношениями

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}, \quad E = \hbar \omega, \quad (12.5)$$

где $\vec{k} = \frac{\omega}{c} \vec{s}$, \vec{s} – единичный вектор в направлении распространения

фотона; $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – *редуцированная постоянная*

Планка, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – *постоянная Планка*,

12.1. Покоящаяся частица массы M распадается на две с массами покоя m_1 и m_2 . Определить кинетические энергии образовавшихся частиц.

12.2. Из двух одинаковых частиц с массой покоя m одна из них испытывает упругое соударение с неподвижной второй. Найти зависимость

кинетической энергии рассеянных частиц T_i от кинетической энергии T_0 налетающей и ее угла рассеяния θ . Определить угол ψ разлета частиц. Рассмотреть случай $T_0 \ll mc^2$.

12.3. Сколько времени занимает распространение света от Солнца до Земли (расстояние $L = 1,5 \cdot 10^8$ км) в системе протона, движущегося по этому пути с кинетической энергией $T_0 = 10^3$ МэВ?

12.4. Фотон рассеялся на неподвижном электроне. Определить изменение длины волны фотона $\Delta\lambda$ от угла рассеяния θ (Комптон-эффект).

Семинар 13. 4-ВЕКТОРЫ, ИХ ИНВАРИАНТЫ. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОМПОНЕНТ

В четырехмерном пространстве, образованном точками, которые являются координатами события и задаются компонентами 4-радиус вектора $\vec{R}_4(ct, x, y, z)$, можно определить 4-вектор $\vec{A}_4(A^0, A^1, A^2, A^3)$, если при переходе от инерциальной системы отсчета K к другой системе K' (причем скорость системы K' относительно K направлена вдоль оси ox и равна V) компоненты вектора преобразуются по закону

$$A^{0'} = \Gamma(A^0 - \mathbf{V}A^1), \quad A^{1'} = \Gamma(A^1 - \mathbf{V}A^0), \quad A^{2'} = A^2, \quad (13.1)$$

$$A^{3'} = A^3,$$

$$\text{где } \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{V}^2}}, \quad \mathbf{V} = \frac{V}{c}.$$

Квадрат 4-вектора определяется так:

$$\vec{A}_4^2 = (A^0)^2 - (A^1)^2 - (A^2)^2 - (A^3)^2. \quad (13.2)$$

Квадрат 4-вектора инвариантен относительно преобразований Лоренца.

Интервалом между двумя событиями с координатами (ct_1, x_1, y_1, z_1) и (ct_2, x_2, y_2, z_2) называется величина

$$s_{12} = \sqrt{c^2(t_1 - t_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2}. \quad (13.3)$$

Интервал инвариантен относительно преобразований Лоренца.

Ниже перечислены некоторые 4-векторы, используемые в задачах. Используются обозначения \vec{V}_4 , \vec{P}_4 , \vec{F}_4 , \vec{K}_4 для 4-векторов и \vec{v} , \vec{p} , \vec{f} , \vec{k} – для трехмерных векторов скорости, импульса, силы и волнового вектора, соответственно. В левой колонке приводится основное определение 4-вектора, в правой – компоненты векторов:

4-вектор скорости –

$$\vec{V}_4 = \frac{d\vec{R}_4}{d\tau}, \quad \vec{V}_4(\gamma c, \gamma \vec{v}); \quad (13.4)$$

4-вектор силы –

$$\vec{F}_4 = \frac{d\vec{P}_4}{d\tau}, \quad \vec{F}_4\left(\frac{\gamma}{c}(\vec{f}\vec{v}), \gamma \vec{f}\right); \quad (13.5)$$

4-вектор энергии-импульса –

$$\vec{P}_4 = m\vec{V}_4, \quad \vec{P}_4\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right); \quad (13.6)$$

4-волновой вектор (для электромагнитных волн) –

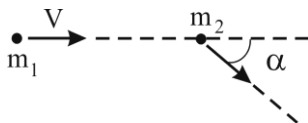
$$\vec{K}_4 = \frac{1}{\hbar}\vec{P}_4, \quad \vec{K}_4\left(\frac{\omega}{c}, \vec{k}\right), \quad (13.7)$$

где $\vec{k} = \frac{\omega}{c}n\vec{s}$; ω – круговая частота волны; n – показатель преломления среды (в вакууме $n=1$); \vec{s} – единичный вектор в направлении распространения волны; \vec{v} – скорость частицы, $\gamma = \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{-1/2}$.

13.1. Определить 4-векторы: координаты – время, скорость, импульс – энергия, сила, ускорение. Найти «длины» этих 4-векторов. Выписать формулы преобразования компонент для K и K' -систем.

13.2. Релятивистский протон с кинетической энергией T упруго рассеялся на покоящемся протоне, в результате оба протона разлетелись симметрично относительно начального направления. Найти угол разлета ψ . Массу покоя m_p считать известной.

13.3. Шарик m_1 с кинетической энергией T_{10} налетает на неподвижный шарик m_2 . Определить кинетическую энергию шарика m_2 после упругого нецентрального удара шариком m_1 . Шарик m_2 отскакивает под углом α к исходному курсу m_1 . При каком соотношении m_2/m_1 передача энергии наибольшая?



13.4. Определить энергию частиц m_1 и m_2 в \mathcal{C} -системе, если в K -системе частицы движутся навстречу друг другу с энергиями E_1 и E_2 .

13.5. Одинаковые частицы m в неподвижной K -системе движутся навстречу друг другу со скоростями V_0 (встречные пучки). Определить энергию частиц в системе, где одна из частиц покоится. Выразить для этой системы кинетическую энергию частиц T_i через энергию T_0 в K -системе.

Семинар 14. РАСПАД И РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

Заряд электрона $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл; масса электрона $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг.

В таблице приведены данные для тех частиц, которые входят в условия задач этого сборника.

частица	символ	Масса, МэВ ($E = mc^2$)	Заряд, e	Время жизни, с
протон	p	938	+1	∞
антипротон	\bar{p}	938	-1	∞
нейтрон	n^0	939	0	880
электрон	e^-	0.511	-1	∞
позитрон	e^+	0.511	+1	∞
пион (пи-мезон)	π^+	139.5	+1	$2.6 \cdot 10^{-8}$
	π^-	139.5	-1	$2.6 \cdot 10^{-8}$
	π^0	135	0	$0.83 \cdot 10^{-16}$
мюон (мю-мезон)	μ^-	105	-1	$2.2 \cdot 10^{-6}$

Гамма-квант (γ) – фотон большой энергии (условно $> 10^5$ эВ).

14.1. Найти максимальную энергию γ -кванта, образующегося при распаде неподвижного π^0 -мезона на четыре γ -кванта (масса покоя π^0 -мезона равна 135 МэВ).

14.2. Протон налетает на мишень (массивная стенка) под углом 45° . При какой минимальной энергии протона E_{min} в результате «удара» о мишень возможно рождение протон-антипротонной пары?

14.3. Релятивистский π^0 -мезон распался на лету на два γ -кванта с энергиями E_1 и E_2 . Найти угол разлета θ относительно неподвижной K -системы.

14.4. Оценить порог рождения π^0 -мезона при столкновении быстрого протона с покоящимся. Массы покоя частиц m_π и m_p .

14.5. π^0 -мезон распадается на два γ -кванта, причем γ -квант, летящий вперед, обладает энергией $E_1 = 270$ МэВ. Определить энергию π^0 -мезона ($m_\pi = 135$ МэВ).

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

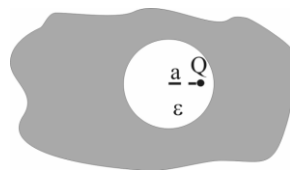
Вариант 1

Часть 1

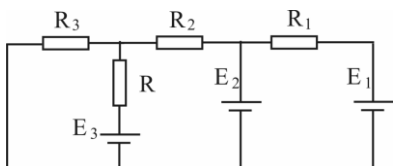
1. Какому распределению заряда соответствует потенциал $\varphi(r) = \frac{Q}{r} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$?

2. Заряд q помещен между двумя проводящими сферами радиусами R_1 и R_2 на расстоянии d ($R_1 < d < R_2$) от общего центра. Определить величины индуцированных зарядов на сферах. Сферы заземлены.

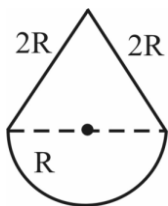
3. Определить поле в шаровой полости радиуса R , заполненной диэлектриком с проницаемостью ε , если в полости на расстоянии a от центра помещен точечный заряд Q . Полость



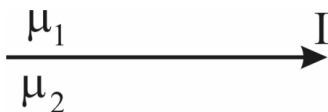
сделана в проводящей среде, находящейся под потенциалом φ_0 .



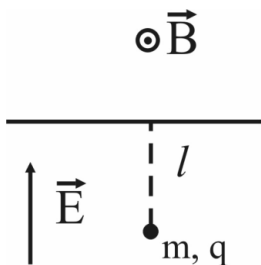
4. В цепь с эдс E_1 последовательно включены сопротивления R_1 , R_2 и R_3 . К точке контакта R_1 и R_2 параллельно E_1 подключена E_2 , а к точке $R_2 - R_3$ параллельно E_1 подключена E_3 и сопротивление R . При какой эдс E_2 ток через сопротивление R не идет? Определить при этом ток через E_1 .



5. Проводник изогнут в виде полуокружности радиуса R и двух линейных отрезков длиной $2R$, представляющих боковые стороны треугольника. Определить напряженность магнитного поля в центре полукольца.



6. Ток I течет по плоскости вдоль границы раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 . Определить магнитные поля в этих средах. Как они изменятся, если ток течет по прямолинейному проводнику, расположенному на плоской границе раздела магнетиков?

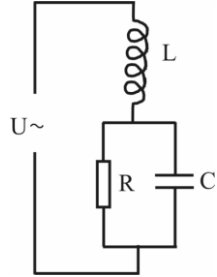


7. Проницаемая плоскость разделяет однородные взаимно перпендикулярные друг другу электрическое \vec{E} и магнитное \vec{B} поля. Поле \vec{E} считать направленным к плоскости раздела. Частица m с зарядом q помещена в область с \vec{E} на расстоянии l от границы. Определить скорость дрейфа частицы вдоль плоскости.

Часть 2

8. Провод, имеющий форму $y = k \exp|x|$, помещен в магнитное поле \vec{B} , перпендикулярное плоскости xOy . Из вершины провода начинают двигать прямолинейную переключку из этого же провода с постоянным ускорением a . Определить временную зависимость эдс индукции, возникающей в контуре.

9. Схема из индуктивности L и параллельно соединенных между собой конденсатора C и сопротивления R подключена к источнику $U = U_0 \cos \omega t$, причем $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Определить ток через резистор.



10. Даны три системы отсчета с осями, параллельными друг другу: неподвижная K и движущиеся вдоль осей ox и $o'x'$ системы K' и K'' . Скорость системы K' относительно K равна V , а скорость K'' относительно K' равна W . Получить формулы преобразования для систем K и K'' .

11. Луч света в системе K падает в отрицательном направлении оси oy . Тогда в системе K' , движущейся относительно K со скоростью V вдоль оси ox , свет будет падать под некоторым углом α к оси $o'y'$, который называют углом аберрации. Найти этот угол.

12. При столкновении фотона с неподвижным электроном фотон рассеялся назад, а полная энергия электрона удвоилась. Найти начальную энергию фотона.

13. Сколько времени тратит фотон на перелет через Галактику с размером 10^5 световых лет с точки зрения протона с энергией 10^{10} Гэв, летящего ему навстречу.

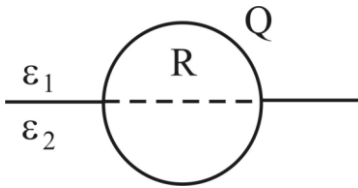
14. π^0 -мезон с кинетической энергией T_1 пролетает от места своего рождения до точки распада расстояние L (в K -системе). Сколько времени прошло между этими событиями в системе протона с кинетической энергией T_2 , летящего вслед за π^0 -мезоном.

Вариант 2

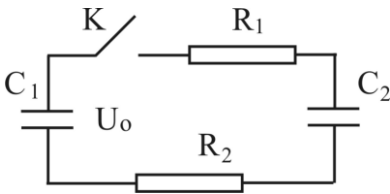
Часть 1

1. Заряд Q равномерно распределен по объему шара радиуса R . Определить энергию заряженного шара и распределение ее между шаром и окружающим шар пространством.

2. Заряд q находится на расстоянии L от центра изолированного проводящего шара с радиусом $R < L$. Чему равен потенциал шара, если его полный заряд равен нулю? Как при этом будут взаимодействовать заряд и сфера?

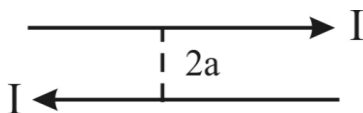


3. Металлический шар радиуса R с зарядом Q расположен симметрично на плоской границе двух диэлектриков ϵ_1 и ϵ_2 . Определить распределение заряда на шаре. Найти поля в диэлектриках, если шар уменьшить до точечного заряда.

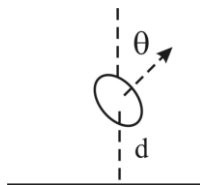


4. К заряженному до напряжения U_0 конденсатору емкостью C_1 с помощью ключа K через сопротивление R_1 подсоединяется незаряженный конденсатор C_2 , цепь $C_1 - C_2$ замыкается через сопротивление R_2 . Найти зависимость разрядного тока от времени. Определить количество теплоты, выделившейся за время разряда на каждом из сопротивлений R_1 и R_2 .

5. Определить поле и векторный потенциал, создаваемые двумя прямолинейными параллельными токами I текущими в противоположных направлениях. Расстояние между токами равно $2a$.



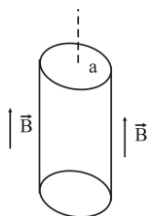
6. Рамка с током помещена в вакууме на расстоянии d от плоской границы сверхпроводника. Магнитный момент m рамки образует угол θ с нормалью к поверхности сверхпроводника. Определить силу взаимодействия рамки и сверхпроводника.



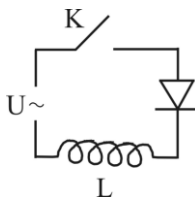
7. Однородные поля \vec{E} и \vec{B} перпендикулярны друг другу. Каков характер движения нерелятивистской частицы, влетающей со скоростью \vec{v}_0 в эти поля? Может ли частица двигаться прямолинейно?

Часть 2

8. На поверхности длинного сплошного диэлектрического цилиндра с плотностью вещества ρ и радиусом a равномерно распределен заряд, поверхностная плотность которого равна σ . Определить угловую скорость вращения цилиндра после выключения внешнего магнитного поля \vec{B} , параллельного его оси.



9. В момент $t = 0$ ключ K подключает схему из последовательно соединенных диода и индуктивности L к генератору $U = U_0 \cos \omega t$. Определить ток в цепи как функцию времени.



10. В системе K' стержень длиной l_0 , опираясь одним краем в начало координат, наклонен под углом α' к оси $o'x'$. На концах стержня одновременно вспыхивают две лампочки. Как воспримет эти

события наблюдатель, находящийся в начале координат неподвижной системы K ? K' движется вдоль ox со скоростью V .

11. Пучок света в системе K образует телесный угол $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$. Как изменится этот угол при переходе к системе K' ?

12. Какую часть энергии первичного фотона с длиной волны, равной комптоновской длине волны, получает электрон отдачи?

13. Вычислить скалярное произведение 4-векторов скорости и ускорения.

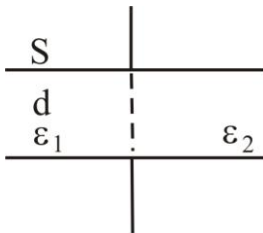
14. Доказать, что законами сохранения запрещена аннигиляция пары электрон-позитрон с испусканием одного γ -кванта.

Вариант 3

Часть 1

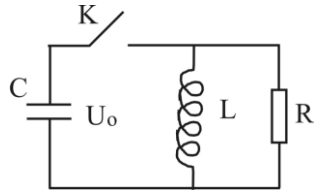
1. Проводящая сфера радиусом R составлена из полусфер. Определить силу взаимодействия полусфер, если полный заряд равен Q . Какой минимальный заряд нужно поместить в центр сферы, чтобы удержать систему как целое?

2. Плоский конденсатор образован двумя лентами размером $a \times b$, расстояние между лентами d . Ленты сворачиваются в многовитковый рулон, наматывая его на цилиндр радиуса $R \gg d$. Определить емкость такого конденсатора.



3. Определить емкость плоского конденсатора (площадь пластин – S и расстояние между ними – d), заполненного двумя диэлектриками ϵ_1 и ϵ_2 одинакового объема (толщина диэлектриков равна d). Как изменится емкость конденсатора, если убрать диэлектрик ϵ_2 .

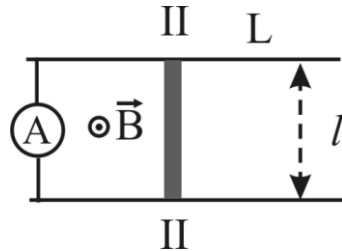
4. К параллельно соединенным сопротивлению R и индуктивности L с помощью ключа K подсоединяется конденсатор C , первоначально заряженный до напряжения U_0 . Найти заряды, протекающие через элементы цепи после замыкания ключа.



5. По плоской петле радиуса a течет ток I . Определить векторный потенциал \vec{A} и напряженность магнитного поля \vec{B} в точках, где $r \gg a$.

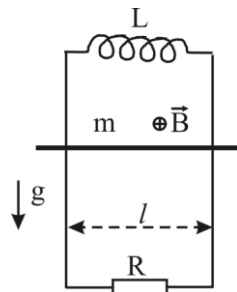
6. Ток I течет по жиле радиуса r_1 коаксиального кабеля и возвращается по толстой проводящей оплетке с радиусами r_2 и r_3 . Определить напряженность магнитного поля $\vec{B}(r)$. Определить индуктивность L и емкость C такого кабеля на единицу длины.

7. Укоритель плазмы (рельсотрон) помещен в магнитное поле \vec{B} , перпендикулярное плоскости электродов. Длина электродов рельсотрона равна L , расстояние между ними $-l$. Плазма создается в межэлектродном пространстве в некотором сечении Π при разряде, ток которого $I_0 = const$. Определить скорость плазменного сгустка массой m на вылете из рельсотрона.

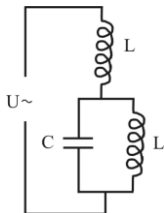


Часть 2

8. Две параллельные вертикальные шины с расстоянием l между ними соединены на краях индуктивностью L (вверху) и сопротивлением R (внизу). Поле \vec{B} перпендикулярно плоскости контура. Перемычка массой m может скользить вдоль верти-



кальных шин (вдоль \vec{g}). Вначале она удерживается в некотором положении и затем плавно отпускается. Найти новое равновесное положение переключки.



9. Схема из индуктивности L и параллельно соединенных между собой конденсатора C и второй такой же L подключена к источнику $U = U_0 \cos \omega t$. Определить ток I в цепи. Как изменится I , если катушки индуктивности L обладают взаимной индуктивностью L_{12} ?

10. Собственное время жизни μ -мезона равно $2 \cdot 10^{-6}$ с. При какой скорости μ -мезон успеет долететь от Солнца до Земли? Свет проходит это расстояние за 500 с.

11. Источник излучения движется со скоростью \vec{V} и излучает плоскую электромагнитную волну в направлении $\vec{k} \perp \vec{V}$. Частота собственного излучения равна ω_0 . Найти частоту, принимаемую приемником, расположенным в направлении $\vec{k} \perp \vec{V}$ (поперечный эффект Доплера).

12. Неподвижная частица с массой M распадается на три осколка с массами m_1, m_2, m_3 . Найти наибольшую полную энергию, которую может иметь один из осколков, например m_1 .

13. Какова должна быть кинетическая энергия движущегося протона, налетающего на неподвижный протон, чтобы в C -системе его полная энергия составила 400 ГэВ?

14. Определить энергию фотона, налетающего на неподвижный протон, необходимую для рождения электрон-позитронной пары.

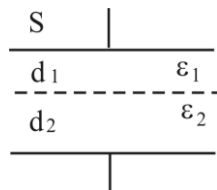
Вариант 4

Часть 1

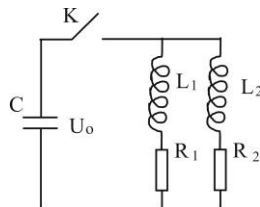
1. Кольцо радиусом R состоит из двух равномерно заряженных полуколец с зарядами $+Q$ и $-Q$. Определить напряженность электрического поля \vec{E} и его потенциал φ на оси кольца.

2. Как изменится емкость плоского конденсатора, если его поместить в металлическую коробку? Начальная емкость C_0 . Расстояние от обкладок до стенок коробки равно расстоянию между обкладками. Как изменится емкость, если коробку соединить с одной из обкладок?

3. Определить емкость плоского конденсатора (площадь пластин $-S$ и расстояние между ними $-d$) со слоями диэлектрика ε_1 и ε_2 толщиной d_1 и d_2 соответственно. Определить заряд на границе раздела диэлектриков, если на обкладках конденсатора поместить заряд q .

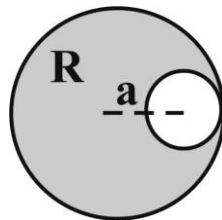


4. К параллельно соединенным участкам цепи из последовательно соединенных R_1, L_1 и R_2, L_2 с помощью ключа K подсоединяется конденсатор C , первоначально заряженный до напряжения U_0 . Определить заряды, протекающие через индуктивности L_1 и L_2 после замыкания ключа.



5. Определить картину силовых линий электрического поля, создаваемого зарядом Q , если его движение началось в момент $t = 0$ в точке $x = 0$ и затем продолжалось с постоянной скоростью \vec{v} . Найти закон изменения наклона силовых линий для неподвижного и движущегося зарядов.

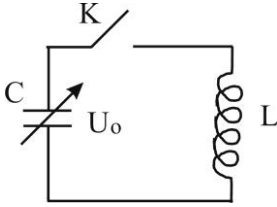
6. Внутри длинного цилиндрического проводника радиуса R находится цилиндрическая полость радиуса $r_0 < R/2$, ось которой сдвинута на расстояние a от оси проводника. Найти зависимость напряженности магнитного поля от расстояния при протекании по проводнику тока плотности j_0 .



7. За какое время электрон от катода долетит до анода (ось z), если расстояние между ними равно l , а распределение потенциала между электродами задано в виде: $\varphi(z) = \varphi_0 (z/l)^{4/3}$?

Часть 2

8. Определить установившуюся скорость переключки (см. вариант 3, задача 8) в случае, когда сопротивление R отключили от нижних клемм и подключили к верхним последовательно с индуктивностью L . Сопротивление переключки и шин не учитывать.



9. Ключ K замыкает заряженный до напряжения U_0 конденсатор переменной емкости на индуктивность L . По какому закону следует менять емкость конденсатора $C(t)$, чтобы ток в цепи нарастал прямо пропорционально времени?

10. В спектре галактики линия излучения одного из элементов оказалась сдвинутой на 10 % в сторону длинных волн по сравнению с величиной, полученной в лабораторных условиях. Определить скорость галактики и характер движения (сближение или удаление).

11. Ось ox представляет плоскую границу двух сред. Тело в среде 1 может двигаться со скоростью \vec{v}_1 , а в среде 2 со скоростью \vec{v}_2 ($v_1, v_2 \ll c$). Как наиболее быстро из $A(0, 0)$ попасть в $B(b, a)$?

12. На оси бесконечного клина, движущегося со скоростью \vec{V} , происходит распад тела с образованием множества осколков, разлетающихся равномерно по всем направлениям со скоростью \vec{u} . Каким должен быть угол клина, чтобы на его боковую поверхность упала половина осколков?

13. В системе K' (движение с V вдоль оси ox неподвижной системы K) частица вылетает со скоростью \vec{u}' под углом θ' к оси $o'x'$. Определить связь углов вылета частицы θ и θ' в системах K и K' .

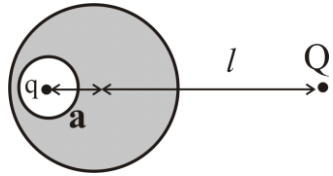
14. Определить порог рождения протон-антипротонной пары при столкновении позитрона с покоящимся электроном.

Вариант 5

Часть 1

1. Шар радиусом R с объемной плотностью заряда $\rho(r) = \frac{k}{r^2}$ имеет полость радиуса r_0 , центр которой совпадает с центром шара. Определить $\vec{E}(r)$ и $\varphi(r)$.

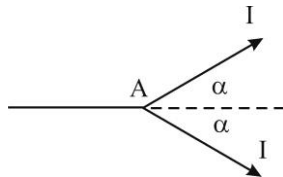
2. В металлическом шаре радиусом R_1 есть сферическая полость радиуса $R_2 < R_1 / 2$, центр которой смещен на расстояние a . Заряд q расположен в центре полости, вне шара помещен заряд Q на расстоянии $l > R_1$ от центра шара на оси, проходящей по центрам шара и полости. Определить силы, действующие на заряды.



3. Однородный диэлектрик с $\varepsilon = const$ граничит с бесконечной проводящей плоскостью. В диэлектрик помещен диполь с моментом \vec{p} на удалении z от плоскости, ориентированный под углом α к нормали. Определить силу взаимодействия диполя с индуцированными зарядами и его потенциальную энергию.

4. Определить эквивалентное сопротивление R мостовой схемы (см. рисунок к задаче 4.1, семинар 1), если сопротивления плеч моста и его диагонали равны соответственно: $R_1 = 2r$, $R_2 = r$, $R_3 = r$, $R_4 = 2r$, $R_5 = r$.

5. Доказать, что поля \vec{E} и \vec{B} удовлетворяют соотношению $(\vec{E} \cdot \vec{B}) = inv$.



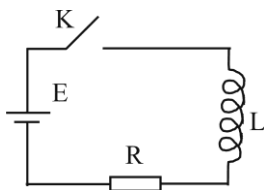
6. Тонкий провод в точке А разветвляется на два проводника, расположенных симметрично (под углом α) относительно оси,

являющейся продолжением провода. Проводники прямолинейны и лежат в одной плоскости. Определить магнитное поле на оси, проходящей через т. А перпендикулярно плоскости проводников, если по ответвлениям текут токи I .

7. Два заряда поместили на расстоянии l друг от друга и отпустили. Расстояние между ними удвоилось через время τ . Затем эти же заряды поместили на расстояние $3l$. Через какое время удвоится расстояние между зарядами в этом случае?

Часть 2

8. Два проводящих кольца радиусами r и R ($r \ll R$) лежат в одной плоскости concentрично друг другу. По внутреннему кольцу протекает ток частоты ω . Найти ток во внешнем кольце, если сопротивление единицы длины кольца равно ρ .



9. Батарея с эдс E с помощью ключа K подключается к последовательно соединенным индуктивности L и сопротивлению R . Определить ток в цепи $I(t)$ после замыкания ключа K . Что произойдет, если затем, в момент времени t^* замкнуть источник E ?

10. Космонавт, двигаясь к неизвестной планете по прямой, посылает зондирующий сигнал с частотой ν_0 . Отраженный сигнал оказывается сдвинут на $\Delta\nu = 10^{-4} \nu_0$. Определить скорость ракеты относительно планеты.

11. Две свободные частицы движутся со скоростями \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно. Найти скорость относительного движения частиц. Рассмотреть, в частности, следующие случаи: а) скорости частиц параллельны друг другу; б) скорости частиц перпендикулярны.

12. При распаде частицы появляются две с массами m_1 и m_2 . По импульсам \vec{p}_1 и \vec{p}_2 этих частиц и углу θ между направлением их разлета найти массу исходной частицы.

13. Фотон с энергией E_0 рассеялся на неподвижном электроне на угол θ . Определить энергию фотона после рассеяния.

14. Определить порог рождения протон-антипротонной пары при столкновении летящих навстречу друг другу электрона и позитрона, обладающих одинаковыми импульсами.

Вариант 6

Часть 1

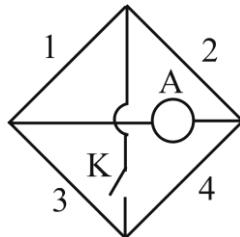
1. В бесконечной пластине толщиной $2R$ вырезана сферическая полость радиуса R . Определить напряженность поля $\vec{E}(r)$, если объемная плотность заряда в пластине равна ρ .



2. Определить дипольный момент проводящей сферы радиуса R , помещенной в однородное электрическое поле \vec{E} .

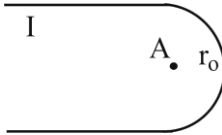
3. Металлическому шару радиусом a сообщен заряд Q . Шар окружен шаровым слоем диэлектрика ϵ . Определить наведенные заряды на внутренней и внешней (радиусы a и b соответственно) поверхностях диэлектрика. Какова емкость шара?

4. В боковые стороны и диагонали моста включены источники тока с произвольными эдс. Сопротивления сторон и диагоналей, включая внутренние сопротивления эдс, равны R_1, R_2, \dots . При каком условии показания амперметра A , включенного в одну из диагоналей моста, не зависят от положения

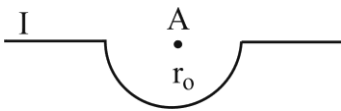


ключа K (замкнут – разомкнут), включенного в другую диагональ?

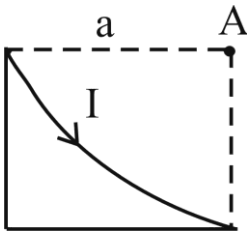
5. Доказать, что для полей \vec{E} и \vec{B} справедливо $E^2 - B^2 = inv$.



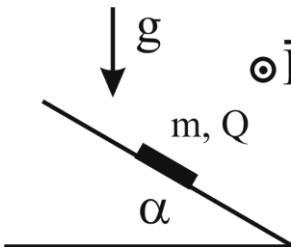
6а. Прямолинейный проводник с током I разворачивается по дуге окружности радиуса r_0 на 180° . Определить \vec{B} в центре полуокружности.



6б. Участок длинного прямолинейного проводника с током I изогнут в виде полуокружности радиуса r_0 с центром на оси проводника. Определить \vec{B} в центре полуокружности.



6в. Проводник представляет две смежных стороны квадрата (пересечение в точке В) и дугу окружности, проведенной из противоположного В угла квадрата (точка А). Найти \vec{B}_A при пропускании по проводнику тока I .

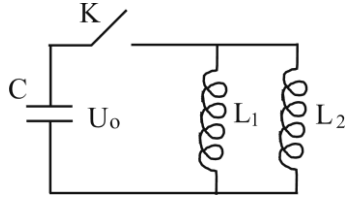


7. Какую максимальную скорость разовьет тело массой m с зарядом Q при скольжении вдоль шероховатой (коэффициент трения μ) наклонной (угол α) плоскости, если параллельно плоскости действует магнитное поле \vec{B} , перпендикулярное полю тяжести \vec{g} ?

Часть 2

8. Соленоид длиной l (радиус витка $-r_1$, число витков $-N_1$) с током I_1 вставлен внутрь соленоида с током I_2 (r_2 и N_2 соответственно) той же длины. Определить магнитное поле на оси соленоидов.

9. Определить максимальные токи в параллельно соединенных индуктивностях L_1 и L_2 после подключения их с помощью ключа K к заряженному до напряжения U_0 конденсатору C .



10. Кольцо радиусом a движется со скоростью \vec{V} мимо неподвижного наблюдателя. Что он скажет о площади кольца?

11. Один из двух одинаковых, расположенных параллельно друг друга, стержней покоится (его длина l_0), а второй движется вдоль первого со скоростью \vec{V} . В какой системе отсчета длины стержней будут одинаковыми?

12. Движущаяся частица с массой покоя m_1 поглощается неподвижной с массой m_2 . Определить массу и скорость образовавшейся частицы, если:
а) задана скорость налетающей частицы \vec{V}_1 ; б) задана кинетическая энергия T_1 .

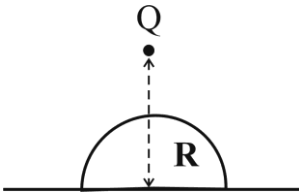
13. В движущейся системе K' сила имеет компоненты $\vec{F}'(0, F'_y, 0)$. Скорость системы K' относительно K направлена вдоль оси ox и равна V . Найти компоненты силы в неподвижной системе K .

14. Определить порог рождения протон-антипротонной пары при столкновении электрона и позитрона, скорости которых \vec{v} в K -системе равны по величине и направлены под прямым углом друг к другу.

Вариант 7

Часть 1

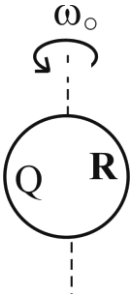
1. Бесконечный плоский лист заряжен равномерно с плотностью σ на единицу поверхности. В листе просверлено отверстие радиуса a . Найти поле и потенциал на оси отверстия.



2. Заряд Q находится на расстоянии $2R$ от проводящей плоскости. Во сколько раз изменится сила взаимодействия заряда с плоскостью, если на плоскость положить проводящую полусферу радиуса R так, чтобы ось полусферы проходила через заряд?

3. Поверхности мыльного пузыря сообщили заряд Q^* . Каким должен быть заряд Q^* , чтобы радиус пузыря увеличился вдвое? Какой заряд Q_0 нужно поместить в центре, чтобы вернуть пузырек к исходному радиусу?

4. Найти закон преломления линий тока на гладкой поверхности раздела двух сред с проводимостями λ_1 и λ_2 .

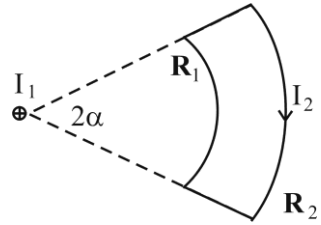


5. Плоская спираль представляет собой N -витковую систему, простирающуюся от R_1 до R_2 . Определить магнитное поле в центре спирали, если по виткам идет ток I . Определить магнитный момент \vec{m} спирали при данном токе.

6. Сфера радиусом R с зарядом Q вращается с ω_0 вокруг оси, проходящей через диаметр. Определить напряженность магнитного поля $\vec{B}(r)$.

7. В поле прямолинейного проводника с током I_1 расположен контур с током I_2 , плоскость которого перпендикулярна проводу. Контур представ-

ляет две дуги с радиусами R_1 и R_2 и два радиальных участка, пересекающихся в общем их центре – в точке I_1 – под углом 2α друг к другу. Найти момент сил, действующих на этот контур.



Часть 2

8. Определить коэффициент взаимной индукции L_{12} и силу взаимодействия кольца с током I_2 и прямого провода с током I_1 , лежащих в одной плоскости. Радиус кольца равен a , провод проходит на расстоянии b от оси кольца.

9. Цепь состоит из двух последовательно соединенных катушек индуктивности L_1 и L_2 , их взаимная индуктивность – L_{12} . Определить полную индуктивность цепи. Изменится ли результат, если направление катушки во второй катушке сменить на противоположное?

10. Система K'' движется вдоль оси ou неподвижной системы K со скоростью V . Получить формулы преобразования пространственных компонент и времени для K'' и K систем (соответствующие оси систем параллельны друг другу).

11. Две одинаковых линейки с собственной длиной l_0 движутся с одинаковыми скоростями \vec{V} во взаимно перпендикулярных направлениях. Определить длину одной линейки в системе другой (линейки параллельны осям ox и ou).

12. Во сколько раз отличаются кинетические энергии протона и электрона, имеющих одинаковые импульсы $p = \frac{200 \text{ МэВ}}{c}$, где c – скорость света.

13. Движущаяся со скоростью V частица распадается на два одинаковых осколка с массой m_0 . Определить максимальную и минимальную энергию осколков.

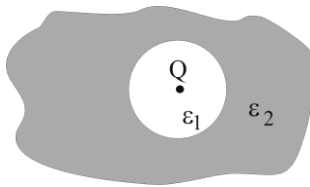
14. Найти угол симметричного разлета фотонов, получившихся при аннигиляции покоящегося электрона и движущегося с энергией E_0 позитрона.

Вариант 8

Часть 1

1. На плоскости $z = 0$ расположен заряд, распределенный по плоскости согласно закону $\sigma = \sigma_0 \sin(ax) \sin(by)$. Определить потенциал φ этой системы зарядов.

2. Заряд Q помещен между двумя параллельными проводящими плоскостями таким образом, что от ближайшей плоскости он находится на расстоянии a . Плоскости расположены на расстоянии $3a$ друг от друга. Определить величины зарядов, наведенных на каждой из плоскостей.



3. Заряд Q помещен в центре диэлектрического шара радиусом R (диэлектрическая постоянная шара ϵ_1), который, в свою очередь, окружен диэлектриком с ϵ_2 . Определить напряженность и потенциал электрического поля как функцию r .

4. Источники с эдс E_1 и E_2 и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 подсоединены параллельно к сопротивлению R . Определить параметры E, r эквивалентного источника. Как изменятся E, r при смене полярности одного из источников?

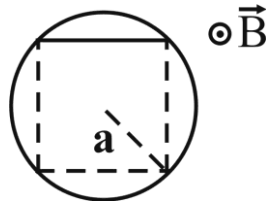
5. По плоскому кольцу радиуса a течет ток I_1 . По диаметру кольца на высоте b над ним проходит прямолинейный провод с током I_2 . Определить напряженность магнитного поля в центре кольца.

6. Ток I из длинного прямолинейного тонкого провода растекается по плоскости, перпендикулярной проводу. Определить напряженность магнитного поля $\vec{B}(r)$. Как изменится результат, если плоскость представляет поверхность полубезграничного проводника?

7. Определить положение равновесия рамки (в виде прямоугольного уступа) с током I , если вертикальные стороны уступа длиной a имеют массу m_1 , а перемычка длины $b - m_2$. Однородное магнитное поле \vec{B} направлено против поля тяготения \vec{g} .

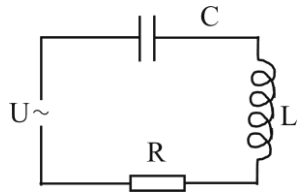
Часть 2

8. Кольцо радиусом a с сопротивлением ρ единицы длины имеет прямолинейную «закоротку» из того же материала, представляющую собой одну из сторон вписанного в окружность квадрата. Магнитное поле, перпендикулярное плоскости кольца, меняется по закону $B = B_0 \frac{t}{\tau}$.



Определить токи в цепи.

9. Определить установившийся ток и сопротивление цепи из последовательно соединенных RCL -элементов, подключенных к источнику $U = U_0 \cos \omega t$. Каково условие резонанса? Начертить векторную диаграмму тока и напряжения.



10. Получить формулы преобразования для

\vec{r} и t в случае, если скорость \vec{V} не параллельна оси ox .

11. Одна частица в начальный момент находится в начале координат системы K , вторая – в точке $x = L$. Обе частицы начинают одновременно двигаться со скоростью \vec{V} вдоль осей: первая – в положительном направлении оси oy , вторая – вдоль ox в отрицательном направлении. Определить минимальное расстояние между частицами в системе, связанной с одной из частиц, и в K -системе.

12. Доказать, что свободный электрон не может полностью поглотить фотон.

13. Получить формулы Доплера $\Delta\lambda = f(V, \alpha)$, когда излучатель I движется под углом α . Оценить поперечный эффект Доплера ($\alpha = \pi/2$) при $V = \frac{24}{25}c$.

14. Антипротон с энергией E_0 при столкновении с неподвижным протоном рождает электрон-позитронную пару. Определить энергию образовавшегося электрона, если он движется перпендикулярно направлению движения антипротона.

Сроки сдачи контрольных заданий:

I семестр, часть 1 – до 25 октября,
I семестр, часть 2 – до 15 декабря.

ОТВЕТЫ К ОСНОВНЫМ ЗАДАЧАМ

Семинар №1

1.1 $\vec{E}(0) = -\frac{3}{4} \frac{Q}{R^2} \vec{e}_z$, где oz – ось симметрии полусферы ;

$$1.2 \quad E_x = E_y = 0; E_z(z) = 2\pi\sigma \left(\frac{z}{|z|} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right);$$

$$\varphi(z) = 2\pi\sigma \left(\sqrt{z^2 + R^2} - |z| \right);$$

$$\varphi(a) = 4\sigma R, \text{ где } a - \text{ точка на краю диска; } \varphi(0) = 2\pi\sigma R;$$

$$1.3 \quad 1). r \leq R_1; \vec{E}_1(r) = 0; \varphi_1(r) = 0;$$

$$2). R_1 \leq r \leq R_2; \vec{E}_2(r) = -Q \frac{R_1 (R_3 - R_2)}{R_2 (R_3 - R_1)} \frac{\vec{r}}{r^3};$$

$$\varphi_2(r) = Q \frac{1 (R_3 - R_2)}{R_2 (R_3 - R_1)} \left(1 - \frac{R_1}{r} \right);$$

$$3). R_2 \leq r \leq R_3; \vec{E}_3(r) = Q \frac{R_3 (R_2 - R_1)}{R_2 (R_3 - R_1)} \frac{\vec{r}}{r^3};$$

$$\varphi_3(r) = Q \frac{1 (R_2 - R_1)}{R_2 (R_3 - R_1)} \left(\frac{R_3}{r} - 1 \right);$$

$$4). r > R_3; \vec{E}_4(r) = 0; \varphi_4(r) = 0;$$

$$1.4 \quad \vec{F} = -6 \frac{(\vec{p}_1 \vec{p}_2) \vec{r}}{r^5}; W = -2 \frac{(\vec{p}_1 \vec{p}_2)}{r^3};$$

$$1.5 \quad \text{Да. Условие равновесия сил: } \frac{Q^2}{8R^2} + (P_1 - P_0)\pi R^2 = 4\pi\alpha R, \text{ где } P_0 - \text{ атмосферное давление, } P_1 - \text{ давление воздуха внутри пузыря;}$$

Семинар №2.

$$2.1 \quad \sigma(x, z) = \frac{Qb}{2\pi} \left\{ \left[(x-a)^2 + b^2 + z^2 \right]^{-3/2} - \left[(x+a)^2 + b^2 + z^2 \right]^{-3/2} \right\};$$

$$\sigma(y, z) = \frac{Qa}{2\pi} \left\{ \left[a^2 + (y-b)^2 + z^2 \right]^{-3/2} - \left[a^2 + (y+b)^2 + z^2 \right]^{-3/2} \right\};$$

$$2.2 \quad \vec{F} = -\frac{3Q^2}{4a^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1+2n)}{(1+3n)^2 (2+3n)^2} \right] \vec{e}_x, \text{ ось } ox \text{ направлена от}$$

заряда перпендикулярно поверхности пластин в направлении дальней плоскости;

$$2.3 \quad \sigma(\theta) = -\frac{QR}{4\pi} \left(\frac{l^2}{R^2} - 1 \right) \left(R^2 + l^2 - 2Rl \cos \theta \right)^{-3/2}, \text{ где } \theta \text{ угол между}$$

осью oz и радиус-вектором точки наблюдения, ось oz соединяет центр сферы (начало координат) и заряд Q ;

$$2.4 \quad \text{а) } C = C_0 = \frac{S}{4\pi d}; \text{ б) } C = C_0 \frac{d}{d-a}; \text{ в) } C = C_0 \frac{d^2}{a(d-a)};$$

Семинар №3.

$$3.1 \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{q}{r}; \quad E_1 = E_2 = \frac{2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{q\vec{r}}{r^3};$$

$$D_1 = \frac{2\varepsilon_1}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{q\vec{r}}{r^3}; \quad D_2 = \frac{2\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{q\vec{r}}{r^3};$$

$$3.2 \quad \text{В среде 1 } (\varepsilon_1, z \geq 0): \vec{E}_1 = \frac{Q}{\varepsilon_1} \frac{\vec{r}_1}{r_1^3} + \frac{Q(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{\vec{r}_2}{r_2^3}; \text{ в среде 2 } (\varepsilon_2,$$

$$z \leq 0): \vec{E}_1 = \frac{2Q}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{\vec{r}_1}{r_1^3}; \text{ ось } oz \text{ проведена через заряд } Q \text{ и через за-}$$

ряд зеркально отраженный в плоскости раздела двух диэлектриков, начало координат в точке разделяющей два диэлектрика, Радиус векторы \vec{r}_1 и \vec{r}_2 проведены из точек $(0,0,a)$ и $(0,0,-a)$ в точку наблюде-

$$\text{ния; } F = \frac{Q^2}{4a^2} \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)};$$

$$3.3 \quad \sigma(x, y) = -\frac{aQ}{2\pi\varepsilon} \frac{1}{(a^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}; \text{ ось } oz \text{ направлена вдоль линии}$$

соединяющей заряд Q и зеркально отраженный заряд, начало координат находится в точке пересечения оси oz с поверхностью проводящей

плоскости. Точечный заряд испытывает силу притяжения к плоско-

сти: $F = \frac{Q^2}{4a^2 \varepsilon}$;

3.4 $C = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) \right]^{-1}$; связанные заряды находятся в

местах неоднородности диэлектрика, т.е. на сферах радиусов a , b , и c :

$$\sigma_{ce}(a) = -\frac{q}{4\pi a^2} \frac{(\varepsilon_1 - 1)}{\varepsilon_1} ; \sigma_{ce}(b) = \frac{q}{4\pi b^2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} \right) ;$$

$$\sigma_{ce}(c) = \frac{q}{4\pi c^2} \frac{(\varepsilon_2 - 1)}{\varepsilon_2} , \text{ где } q \text{ – заряд конденсатора;}$$

3.5 $U(\vec{a}) = -\frac{p^2 R^3}{\varepsilon(a^2 - R^2)^3}$; $\vec{F}(\vec{a}) = -\nabla_a U(\vec{a}) = -\frac{6p^2 R^3 a}{\varepsilon(a^2 - R^2)^4} \frac{\vec{a}}{a}$,

притяжение; $\vec{N} = 0$;

Семинар 4

4.1. $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$;

$$R = \frac{(RR_1R_2 + RR_1R_3 + RR_1R_4 + RR_2R_3 + RR_2R_4 + RR_3R_4 + R_1R_2R_3 + R_1R_2R_4 + R_1R_3R_4 + R_2R_3R_4)}{(R_1R_2 + R_1R_3 + R_1R_4 + R_2R_3 + R_2R_4 + R_3R_4 + R_4R_5)}$$
 ;

4.2. $z = \sqrt{z_1 z_2 + \frac{z_1^2}{4}}$;

4.3. $U_R = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$; $U_C = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right]$;

4.4. $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$;

Семинар 5

$$5.1 \quad \vec{E} = \frac{Q(1-\beta^2)\vec{r}}{r^3(1-\beta^2\sin^2\theta)^{3/2}}, \quad \vec{B} = \frac{1}{c}[\vec{V} \times \vec{E}] = \frac{Q(1-\beta^2)[\vec{V} \times \vec{r}]}{cr^3(1-\beta^2\sin^2\theta)^{3/2}},$$

где θ – угол между радиус-вектором \vec{r} (от заряда до точки наблюдения) и вектором \vec{V} (вдоль оси ox); $\beta = \frac{V}{c}$;

$$5.2 \quad F_z = \frac{q_1 q_2}{d^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ заряды отталкиваются;}$$

5.3 В момент времени $t = \tau > 0$ внутри сферы радиуса $R = c\tau$ поле \vec{E}_1 совпадает с полем заряда, движущегося со скоростью \vec{v} в положительном направлении оси ox (см. ответ к задаче 5.1); вне сферы поле \vec{E}_2 совпадает с полем заряда, движущегося со скоростью \vec{v} в отрицательном направлении оси ox ;

$$5.4 \quad \vec{B}(z) = \frac{2\pi r_0^2 I}{c(r_0^2 + z^2)^{3/2}} \vec{e}_z; \text{ } oz - \text{ ось симметрии кольца; изменится:}$$

$$\vec{B}(0) = \frac{\pi I}{cr_0} (\vec{e}_x + \vec{e}_z), \text{ диаметр изгиба кольца направлен по оси } oy;$$

$$5.5 \quad \vec{A}(r) = -\frac{2I}{c} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \vec{e}_z; \quad \vec{B}(r) = \frac{2I}{cr} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r] = \frac{2I}{cr} \vec{e}_\varphi; \quad \vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z -$$

орты цилиндрической системы координат; r – расстояние от провода до точки наблюдения; r_0 – расстояние от провода до точки, в которой потенциал принят за нулевой;

Семинар №6

$$6.1 \text{ а) цилиндрический проводник, } r < R, \quad \vec{B}(r) = \frac{2Ir}{cR^2} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r];$$

$$r > R, \quad \vec{B}(r) = \frac{2I}{cr} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r];$$

труба, $r \leq R_1$, $\vec{B} = 0$; $R_1 < r < R_2$,

$$\vec{B}(r) = \frac{2I}{cr} \frac{(r^2 - R_1^2)}{(R_2^2 - R_1^2)} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r]; \quad r > R_2, \quad \vec{B}(r) = \frac{2I}{cr} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r]; \quad \text{ось}$$

oz направлена вдоль тока; $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – орты цилиндрической системы координат; r – расстояние от провода до точки наблюдения;

б) полоса, ось oz направлена вдоль тока; ось oy перпендикулярна полосе и проходит через ее середину,

$$B_x = \frac{2I}{ac} \left(\arctg \frac{a+2x}{2y} + \arctg \frac{a-2x}{2y} \right),$$

$$B_y = \frac{I}{ac} \ln \left[\frac{(x - a/2)^2 + y^2}{(x + a/2)^2 + y^2} \right], \quad B_z = 0;$$

в) ток течет в плоскости xoz параллельно оси oz , $B_x = \pm \frac{2\pi j}{c}$,

$B_y = 0$, $B_z = 0$; вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно току и параллельно токонесущей плоскости.

г) oz – ось соленоида, $B_z = \frac{4\pi ni}{c}$ внутри соленоида; $\vec{B} = 0$ вне соленоида;

д) $B_\varphi = \frac{2NI}{cr}$ внутри тороида, r – расстояние от оси; $\vec{B} = 0$ вне тороида;

$$6.2. \quad B(O) = \frac{2I}{cr_0} (1 + \pi - \alpha + \operatorname{tg} \alpha);$$

$$6.3. \quad B_{\max} = \frac{cF_0}{Ir_0};$$

$$6.4. \quad B = B_0 \sqrt{\mu^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha};$$

Семинар №7

$$7.1 \quad v_x = \frac{p_0 c^2}{\sqrt{U_0^2 + (qcEt)^2}}, \quad v_y = \frac{qEc^2 t}{\sqrt{U_0^2 + (qcEt)^2}}, \quad \text{где } U_0 = \gamma_0 mc^2 \text{ и}$$

$p_0 = \gamma_0 mv_0$ – начальные энергия и импульс частицы, соответствен-

$$\text{но, } \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}; \quad y(x) = \frac{U_0}{qE} \left[ch \left(\frac{xqE}{p_0 c} \right) - 1 \right], \quad \text{цепная линия,}$$

ось ox направлена вдоль \vec{v}_0 , ось oy – вдоль \vec{E} ;

$$7.2 \quad \text{Вращательное движение по винтовой линии радиуса } R = \frac{mv_0 c \sin \alpha}{qB}$$

с шагом $\Delta z = \frac{2\pi mc v_0 \cos \alpha}{qB}$, поле \vec{B} направлено вдоль оси oz ; при

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{вращение по окружности радиуса } R = \frac{mv_0 c}{qB} \quad \text{в плоскости } xoy$$

с частотой $\omega = \frac{qB}{mc}$;

$$7.3 \quad u_{dr} = \frac{2v_0}{\pi} \frac{(B_1 - B_2)}{(B_1 + B_2)};$$

$$7.4 \quad \text{а) равноускоренное движение вдоль оси } oy: \quad y(t) = v_0 t + \frac{eE_y}{2m} t^2;$$

б) частица участвует в двух независимых движениях: равноускорен-

ное движение вдоль оси oy : $y(t) = \frac{eE}{2m} t^2$; вращение в плоскости xoz :

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t, \quad z(t) = \frac{v_0}{\omega} \cos \omega t;$$

Семинар №8

8.1 Ток по перемычке $I_{br} = 0$, ток по кольцу

$$I(t) = \frac{\pi R^2 \omega B_0}{c \sqrt{(2\pi\rho)^2 + \left(\frac{\omega L}{c^2}\right)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \exp\left(-\frac{2\pi\rho c^2}{L} t\right) \right],$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{c^2 2\pi\rho}$;

8.2 $q_1 = -\frac{\pi a^2 B_0}{2c\tau} \frac{C_1(2C_3 + C_2)}{(C_2 + C_3 + C_1)}$; $q_2 = \frac{\pi a^2 B_0}{2c\tau} \frac{C_2(C_3 - C_1)}{(C_2 + C_3 + C_1)}$;

$q_3 = \frac{\pi a^2 B_0}{2c\tau} \frac{C_3(2C_1 + C_2)}{(C_2 + C_3 + C_1)}$; знаки зарядов верхних пластин C_1 и

C_3 противоположны; знак заряда на верхней пластине C_2 зависит от отношения величин C_1 и C_3 ; при $C_1 = C_3$ $q_2 = 0$;

8.3 $E = \frac{\pi r_0^2 n B_0 \omega}{3c} \sin \omega t$;

8.4 $I = \frac{\pi a^2 c^2 B}{L}$;

8.5 $U = \frac{vbB}{c}$; $\sigma = \frac{vB}{4\pi c}$;

Семинар №9

9.1 $I_{\max} = Q_1 \sqrt{\frac{C_2}{LC_1(C_1 + C_2)}}$; $Q_{\max} = \frac{2Q_1 C_2}{(C_1 + C_2)}$;

9.2 $I_1 = \frac{E}{r} \frac{L_2}{(L_1 + L_2)}$; $I_2 = \frac{E}{r} \frac{L_1}{(L_1 + L_2)}$;

$$9.3 \quad U_R = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \left[\cos \delta \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) - \omega CR \sin(\omega t - \delta) \right];$$

$$U_C = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \left[\cos(\omega t - \delta) - \cos \delta \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right], \text{ где}$$

$$\operatorname{tg} \delta = R\omega C;$$

$$9.4 \quad \text{a) } U_R = \frac{U_0 R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\cos(\omega t - \delta) - \cos \delta \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right];$$

$$U_L = \frac{U_0 L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\frac{R}{L} \cos \delta \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) - \omega \sin(\omega t - \delta) \right]; \text{ где}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L}{R};$$

$$\text{б) } U_C = \frac{U_0}{(1 - \omega^2 LC)} \left[\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t) \right];$$

$$U_L = \frac{U_0}{(1 - \omega^2 LC)} \left[\omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - \omega^2 \cos(\omega t) \right], \text{ где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$9.5 \quad I_L = \frac{U_0}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad I_C = U_0 \omega C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$I_R = \frac{U_0}{R} \cos(\omega t); \quad I = I_L + I_C + I_R = \frac{U_0 \cos(\omega t - \delta)}{Z}; \text{ где}$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + R^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}}, \quad \operatorname{tg} \delta = R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right); \text{ резонанс при}$$

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$9.6 \quad \delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}; \quad \delta(50 \text{ Гц}) = 28 \text{ мм}; \quad \delta(10^6 \text{ Гц}) = 0.2 \text{ мм};$$

Семинар №10

$$10.1 \text{ а) } V = c^2 \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}; \text{ б) } V = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1};$$

$$10.2 \quad x'' = \frac{(x - Vt)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad y'' = \frac{\left(y \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} + \frac{VWx}{c^2} - Wt \right)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}};$$

$$t'' = \frac{\left(t - \frac{Vx}{c^2} - \frac{Wy}{c^2} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}}; \quad z'' = z;$$

$$10.3 \quad \Delta t = t_1 - t_2 = -\frac{VL}{c^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)} = -2 \cdot 10^{-7} \text{ с, где } t_1 \text{ и } t_2 - \text{ моменты}$$

вспышек лампочек на левом и правом концах стержня в системе K ;

$$10.4 \quad \operatorname{tg} \theta' = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad \theta' = 64^\circ; \quad L' = L \sqrt{1 - \frac{V^2 \cos^2 \theta}{c^2}},$$

$$L' = 0.556 \text{ м};$$

$$10.5 \quad v' = v \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} - \text{удаление}; \quad v' = v \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - \text{приближение}, \quad \beta = \frac{V}{c};$$

Семинар №11

$$11.1 \quad \operatorname{tg} \theta' = \frac{u \sin \theta \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{u \cos \theta - V};$$

$$u'^2 = \frac{u^2(1 - \beta^2 \sin^2 \theta) - 2uV \cos \theta + V^2}{\left(1 - \beta \frac{u}{c} \cos \theta\right)^2}, \text{ где } \beta = \frac{V}{c}; u' \rightarrow c$$

при $u \rightarrow c$ или $V \rightarrow c$;

$$11.2 \quad \text{Стержень наклонен к оси } ox' \text{ под углом } \alpha': \operatorname{tg} \alpha' = \frac{VW}{c^2 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \text{ и}$$

движется со скоростью $u' = \sqrt{V^2 + W^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}$ под углом θ' к оси

$$ox': \operatorname{tg} \theta' = -\frac{W \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{V};$$

$$11.3 \quad t = \gamma(u) \frac{h}{W} \sqrt{1 - \frac{u^2 W^2}{c^4}}, \text{ где } \gamma(u) = \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

$$11.4 \quad T = 2 \left[\frac{L}{c} + \frac{l_0(n-1)}{c \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \right]; \text{ время, затрачиваемое световым импульсом}$$

на прохождение пути от излучателя до зеркала, больше, чем время на движение светового импульса в обратном направлении. Суммарное время не зависит от направления движения пластины.

Семинар №12

$$12.1 \quad T_1 = \frac{c^2}{2M} \left[(M - m_1)^2 - m_2^2 \right]; \quad T_2 = \frac{c^2}{2M} \left[(M - m_2)^2 - m_1^2 \right];$$

$$12.2 \quad T_1 = T_0 \left(\frac{2mc^2 \cos^2 \theta}{2mc^2 + T_0 \sin^2 \theta} \right); \quad T_2 = T_0 \left[\frac{\sin^2 \theta (T_0 + 2mc^2)}{2mc^2 + T_0 \sin^2 \theta} \right];$$

$$\sin \psi = \frac{\sin^2 \theta \sqrt{T_0 (T_0 + 4mc^2) + 4m^2 c^4}}{A} + \frac{2mc^2 \cos^2 \theta}{A}, \text{ где}$$

$$A = \sqrt{T_0 \sin^2 \theta (T_0 + 4mc^2) + 4m^2 c^4}, \text{ при } T_0 \ll mc^2 \quad \psi \rightarrow \pi/2;$$

$$12.3 \quad \Delta t_p' = \frac{L}{c} \frac{1}{m_p c^2} \left[(T_0 + m_p c^2) - \sqrt{T_0 (T_0 + 2m_p c^2)} \right] \approx 140 \text{ с};$$

$$\frac{V}{c} = \frac{\sqrt{T_0 (T_0 + 2m_p c^2)}}{T_0 + m_p c^2} \approx \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$12.4 \quad \Delta \lambda = 2 \frac{h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2}; \quad \lambda_c = \frac{h}{m_e c} \approx 2.42 \cdot 10^{-12} \text{ м} - \text{КОМПТОНОВСКАЯ}$$

длина волны для электрона;

Семинар №13

$$13.1 \quad \vec{R}_4(ct, \vec{r}); \quad \vec{V}_4(\gamma c, \gamma \vec{v}); \quad \vec{P}_4\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right); \quad \vec{F}_4\left(\frac{\gamma}{c}(\vec{f} \cdot \vec{v}), \gamma \vec{f}\right);$$

$$\vec{W}_4\left(\gamma \frac{d(\gamma c)}{dt}, \gamma \frac{d(\gamma \vec{v})}{dt}\right); \text{ где } \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad \vec{v} - \text{трехмерная}$$

скорость частицы; $|d\vec{R}_4|^2 = dS^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ - квадрат

интервала; $|\vec{V}_4|^2 = c^2$; $|\vec{P}_4|^2 = m^2 c^2$; преобразования Лоренца для 4-вектора энергии-импульса:

$$p_x' = \Gamma \left(p_x - \frac{B}{c} E \right), p_y' = p_y, p_z' = p_z, E' = \Gamma (E - V p_x);$$

преобразования Лоренца для 4-вектора силы:

$$f_x' = \frac{f_x - \frac{B}{c} (\vec{f} \cdot \vec{v})}{1 - \frac{V}{c^2} v_x}, f_y' = \frac{f_y \sqrt{1 - B^2}}{1 - \frac{V}{c^2} v_x}, f_z' = \frac{f_z \sqrt{1 - B^2}}{1 - \frac{V}{c^2} v_x},$$

$$(\vec{f}' \cdot \vec{v}') = \frac{(\vec{f} \cdot \vec{v}) - V f_x}{1 - \frac{V}{c^2} v_x},$$

где $B = \frac{V}{c}$, $\Gamma = (1 - B^2)^{-1/2}$, скорость V системы K' относительно

системы K направлена вдоль оси ox .

$$13.2 \cos \psi = \frac{T}{T + 4m_p c^2};$$

$$13.3 T_2 = \frac{2T_{10} (T_{10} + 2m_1 c^2) m_2 c^2 \cos^2 \alpha}{[T_{10} + (m_1 + m_2) c^2]^2 - T_{10} (T_{10} + 2m_1 c^2) \cos^2 \alpha}; \text{ где}$$

$$T_{10} = m_1 c^2 (\gamma - 1), \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}; \frac{m_2}{m_1} = \sqrt{\cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

$$13.4 E_1' = \frac{E_1 E_2 + m_1^2 c^4 - A}{[2E_1 E_2 + (m_1^2 + m_2^2) c^4 - 2A]^{1/2}},$$

$$E_2' = \frac{E_1 E_2 + m_2^2 c^4 - A}{[2E_1 E_2 + (m_1^2 + m_2^2) c^4 - 2A]^{1/2}}, \text{ где}$$

$$A = \sqrt{(E_1^2 - m_1^2 c^4)(E_2^2 - m_2^2 c^4)};$$

$$13.5 \quad E_1' = mc^2; \quad E_2' = mc^2 \frac{\left(1 + \frac{V_0^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{V_0^2}{c^2}\right)}; \quad T_1' = 0; \quad T_2' = \frac{2T_0(T_0 + 2mc^2)}{mc^2};$$

Семинар №14

$$14.1 \quad h\nu = \frac{m_\pi c^2}{2} \approx 67.5 \text{ МэВ};$$

$$14.2 \quad E_{\min} = \sqrt{17} m_p c^2 \approx 3867 \text{ МэВ};$$

$$14.3 \quad \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{2} \frac{m_\pi c^2}{\sqrt{E_1 E_2}};$$

$$14.4 \quad E_{\min} = m_p c^2 \left(1 + 2 \frac{m_\pi}{m_p} + \frac{m_\pi^2}{2m_p^2}\right) \approx 1218 \text{ МэВ};$$

$$14.5 \quad E_\pi = E_1 + \frac{m_\pi^2 c^4}{4E_1} \approx 287 \text{ МэВ};$$

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Вариант 1

1. Точечный заряд Q в начале координат и сферически симметрично распределенный объемный заряд:

$$\rho(\vec{r}) = Q\delta(\vec{r}) - \frac{Q}{4\pi\alpha^2 r} \exp\left(-\frac{r}{\alpha}\right);$$

2. $Q_1 = -Q \frac{R_1(R_2 - d)}{d(R_2 - R_1)}; \quad Q_2 = -Q \frac{R_2(d - R_1)}{d(R_2 - R_1)};$

$$3. \quad \varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{\varepsilon|\vec{r}-\vec{a}|} + \frac{Q'}{\varepsilon|\vec{r}-\vec{l}|} + \varphi_0, \quad \vec{E} = -\nabla\varphi, \quad \text{где } Q' = -Q\frac{R}{a},$$

$l = \frac{R^2}{a}$, начало координат расположено в центре шаровой полости,

\vec{a} – радиус-вектор точки, в которую помещен заряд Q , заряд-изображение Q' помещен в точку с радиусом-вектором \vec{l} , начало координат, заряд Q и заряд-изображение Q' расположены на одной прямой;

$$4. \quad E_2 = E_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right), \quad I_1 = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_3}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right);$$

$$5. \quad B(0) = \frac{I}{cr} \left(\pi + 2 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right)$$

$$6. \quad a) \quad \vec{B}_1 = \frac{2\pi\mu_1}{c} [\vec{n} \times \vec{I}]; \quad \vec{B}_2 = -\frac{2\pi\mu_2}{c} [\vec{n} \times \vec{I}], \quad \text{нормаль } \vec{n} \text{ к границе}$$

раздела двух сред направлена из среды 1 в среду 2;

$$b) \quad \vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \frac{4\mu_1\mu_2}{(\mu_1 + \mu_2)} \frac{I}{cr} [\vec{e}_z \times \vec{e}_r], \quad \vec{H}_1 = \frac{1}{\mu_1} \vec{B}_1, \quad \vec{H}_2 = \frac{1}{\mu_2} \vec{B}_2;$$

ток I направлен вдоль оси oz , \vec{e}_z и \vec{e}_r – единичные орты цилиндрической системы координат;

$$7. \quad u_{dr} = \frac{cE\sqrt{8ql}}{(\pi c\sqrt{mE} + \sqrt{8ql} \cdot B)};$$

$$8. \quad \varepsilon(t) = -\frac{2aB}{c} t \cdot \ln \left(\frac{at^2}{2k} + 1 \right);$$

$$9. \quad I_R = \frac{U_0}{\sqrt{L/C}} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$10. \quad x'' = \gamma(x - ut), \quad y'' = y, \quad z'' = z, \quad t'' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right); \text{ где}$$

$$u = \frac{V+W}{1 + \frac{VW}{c^2}}, \quad \gamma(u) = \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-1/2};$$

$$11. \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{\sqrt{1-B^2}}, \text{ где } B = \frac{V}{c};$$

$$12. \quad E_0 = m_e c^2 \left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2}\right) \approx 0.625 \text{ МэВ};$$

$$13. \quad \Delta t' = \frac{L}{c} \frac{E_p}{m_p c^2} \left(1 - \frac{\sqrt{E_p^2 - m_p^2 c^4}}{E_p}\right) \approx \frac{L}{c} \frac{m_p c^2}{2E_p} \approx 150 \text{ с};$$

$$14. \quad \Delta t' = \frac{L}{c} \frac{(T_p + m_p c^2)}{m_p c^2} \left[\frac{T_\pi + m_\pi c^2}{\sqrt{T_\pi^2 + 2T_\pi m_\pi c^2}} - \frac{\sqrt{T_p^2 + 2T_p m_p c^2}}{T_p + m_p c^2} \right]$$

Вариант 2

$$1. \quad W_{\text{int}} = \frac{Q^2}{10R}; \quad W_{\text{ext}} = \frac{Q^2}{2R}; \quad W_{\text{tot}} = \frac{3}{5} \frac{Q^2}{R};$$

$$2. \quad \varphi(R) = \frac{q}{L}; \quad F = -\frac{q^2 R^3 (2L^2 - R^2)}{L^3 (L^2 - R^2)^2};$$

$$3. \quad \sigma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{Q}{R^2}; \quad \sigma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{Q}{R^2};$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \frac{2Q}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{\vec{r}}{r^3};$$

$$4. \quad I(t) = -\frac{U_0}{(R_1 + R_2)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \text{ где } I(t) = \frac{dQ_1}{dt},$$

$$\tau = \frac{(R_1 + R_2)C_1C_2}{(C_1 + C_2)}; \quad W(R_1) = \frac{R_1U_0^2C_1C_2}{2(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)};$$

$$W(R_1) = \frac{R_2U_0^2C_1C_2}{2(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)};$$

$$5. \quad A_z = \frac{2I}{c} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{I}{c} \ln \frac{(a+x)^2 + y^2}{(a-x)^2 + y^2}, \quad B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = -\frac{8Iaxy}{cr_1^2r_2^2},$$

$$B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x} = -\frac{2I}{c} \left(\frac{a-x}{r_1^2} + \frac{a+x}{r_2^2} \right); \text{ координаты проводников с током}$$

ком в перпендикулярной к ним плоскости равны $(a, 0)$ для тока $+I$ и $(-a, 0)$ для тока $-I$; r_1 и r_2 – расстояния от точек $(a, 0)$ и $(-a, 0)$ до точки наблюдения;

$$6. \quad F = \frac{3m^2 [1 + \cos^2 \theta]}{32d^4}, \text{ отталкивание};$$

$$7. \quad x(t) = \frac{v_{0z}}{\omega} [\cos(\omega t) - 1] + (v_{0x} + c \frac{E}{B}) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} - c \frac{E}{B} t; ;$$

$$y(t) = v_{0y} t;$$

$$z(t) = \frac{v_{0z}}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{1}{\omega} (v_{0x} + c \frac{E}{B}) [1 - \cos(\omega t)];$$

поле \vec{E} направлено вдоль оси oz , поле \vec{B} – вдоль оси oy :

$$\vec{E}(0, 0, E); \quad \vec{B}(0, B, 0);$$

$v_{0x} = v_0 \sin \theta \cos \varphi$; $v_{0y} = v_0 \sin \theta \sin \varphi$; $v_{0z} = v_0 \cos \theta$; θ – угол между \vec{v}_0 и осью oz , φ – угол между проекцией \vec{v}_0 на плоскость xoy и осью oy ; движение прямолинейно при $\vec{v} = \frac{c[\vec{E} \times \vec{B}]}{B^2}$;

8. $\omega = \frac{2B\sigma c}{a(\rho c^2 + 8\pi\sigma^2)}$;
9. при $0 < t < \frac{T}{2}$, $I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \sin(\omega t)$; при $\frac{T}{2} < t < \frac{3}{4}T$, $I(t) = 0$;
 при $t > \frac{3}{4}T$, $I(t) = \frac{U_0}{\omega L} [1 + \sin(\omega t)]$;
10. наблюдатель увидит вспышку на правом конце стержня через время:
 $T = \frac{\gamma l_0}{c} \left(\frac{V}{c} \cos \alpha' + \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2} \sin^2 \alpha'} \right)$, где $\gamma = \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$;
11. $d\Omega' = \sin \theta' d\theta' d\varphi = \frac{1 - B^2}{(1 - B \cos \theta)^2} d\Omega$, где $B = \frac{V}{c}$;
12. $\frac{\Delta E}{p_{ph} c} = \frac{2h}{mc} \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left[\lambda + \frac{2h}{mc} \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{-1}$, где $p_{ph} = \frac{h}{\lambda}$ – импульс фотона, λ – длина волны фотона, h – постоянная Планка;
 $\frac{\Delta E}{p_{ph} c} = 2 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left[1 + 2 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{-1}$ при $\lambda = \lambda_c = \frac{h}{mc}$;
13. $\vec{V}_4 \vec{W}_4 = 0$, где \vec{V}_4 и \vec{W}_4 – 4-векторы скорости и ускорения, соответственно;
14. Указание: рассмотреть процесс в Ц-системе;

Вариант 3

1. $F = \frac{Q^2}{8R^2}$, $q_{\min} = -\frac{Q}{2}$;
2. $C = \frac{ab}{2\pi d} \left(1 + \frac{bd}{2\pi R^2} \right)$;
3. $C = \frac{S(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{8\pi d}$, $C = \frac{S(\varepsilon_1 + 1)}{8\pi d}$;

4. $Q_R = 0, Q_L = CU_0;$

5. $\vec{A} = \frac{[\vec{m} \times \vec{r}]}{r^3}, \vec{B} = -\frac{\vec{m}}{r^3} + \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5},$ где $\vec{m} = \frac{\pi a^2 I}{c} \vec{e}_z$ – магнит-

ный момент петли с током, петля расположена в плоскости xoy, \vec{e}_z – орт в направлении оси $oz;$

6. $r < r_1, B_{1\varphi}(r) = \frac{2Ir}{cr_1^2};$

$$r_1 < r < r_2, B_{2\varphi}(r) = \frac{2I}{cr}; r_2 < r < r_3, B_{3\varphi}(r) = \frac{2I(r_3^2 - r^2)}{c(r_3^2 - r_2^2)};$$

$r > r_3, B_4 = 0;$

$$L = \frac{1}{2} + 2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{2r_3^4}{(r_3^2 - r_2^2)} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) - \frac{3r_3^2 - r_2^2}{(r_3^2 - r_2^2)}, C = \left[2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right]^{-1};$$

где $B_{1\varphi}, B_{2\varphi}, B_{3\varphi}$ – φ – компоненты поля в соответствующих областях;

7. $V = \sqrt{\frac{2I_0 BL}{mc}};$

8. $x_{equ} = \frac{mgL}{B^2 l^2};$

9. а) $I(t) = \frac{U_0(1 - \omega^2 LC)}{L\omega(2 - \omega^2 LC)} \sin(\omega t);$

б) $I(t) = \frac{U_0(1 - \omega^2 LC)}{\omega(L + L_{12})[2 - \omega^2 C(L - L_{12})]} \sin(\omega t);$

$$10. \quad v = c \left(1 + \frac{\tau^2}{T^2} \right)^{-1/2} \approx c \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-18}), \text{ где } \tau - \text{ время жизни } \mu\text{-}$$

мезона, $T = 500 \text{ с}$;

$$11. \quad \omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}};$$

$$12. \quad E_{1\max} = \frac{[M^2 + m_1^2 - (m_1 + m_2)^2] c^2}{2M}$$

$$13. \quad T = \frac{2}{m_p c^2} (E'^2 - m_p^2 c^4) \approx 3.2 \cdot 10^5 \text{ ГэВ};$$

$$14. \quad E = 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_p} \right) \approx 1 \text{ МэВ};$$

Вариант 4

$$1. \quad \vec{E}(z) = \frac{4QR}{\pi(z^2 + R^2)^{3/2}} \vec{e}_y, \quad \varphi(z) = 0, \text{ кольцо лежит в плоскости}$$

xoy , разрез на два полукольца направлен вдоль оси ox , вектор \vec{E} лежит в плоскости параллельной плоскости кольца, \vec{e}_y – орт оси oy ;

$$2. \quad \text{а) } C = \frac{3}{2} C_0; \quad \text{б) } C = 2C_0;$$

$$3. \quad C = \frac{S \varepsilon_1 \varepsilon_2}{4\pi(d_1 \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_2)}, \quad q_p = q \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right);$$

$$4. \quad Q_1 = \frac{CU_0 R_2}{(R_1 + R_2)}, \quad Q_2 = \frac{CU_0 R_1}{(R_1 + R_2)};$$

5. Внутри сферы радиуса $R = ct$ электрическое поле является полем равномерно движущегося со скоростью \vec{v} точечного заряда:

$$\vec{E}'(\vec{r}') = \frac{Q(1-\beta^2)\vec{r}'}{r'^3(1-\beta^2\sin^2\theta')^{3/2}}, \text{ где } \theta' - \text{ угол между радиус-}$$

вектором \vec{r}' (от заряда до точки наблюдения) и вектором \vec{v} (вдоль оси ox); $\beta = \frac{v}{c}$; во всех точках вне сферы электрическое поле является

полем заряда покоящегося в начале координат: $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q\vec{r}}{r^3}$, где

\vec{r} – радиус вектор проведенный из начала координат в точку наблюдения. Наклон силовых линий поля меняется на сфере по зако-

ну: $\cos\theta_0 = \frac{\cos\varphi_0}{\sqrt{1-\beta^2\sin^2\varphi_0}}$, где θ_0 и φ_0 – наклоны силовых линий к

оси ox для неподвижного и движущегося зарядов;

6. Искомое поле ищем в виде суперпозиции двух полей: поля от тока плотностью j_0 , текущего по сплошному цилиндру радиуса R , и поля от тока плотностью $-j_0$, текущего по малому цилиндру радиуса r_0 .

Введем декартову систему координат xoy в плоскости перпендикулярной оси проводника с началом координат на оси проводника; ось ox направим вдоль линии, соединяющей оси проводника и полости; направление тока совпадает с направлением оси oz ; обозначим \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из центра проводника до точки наблюдения, \vec{r}' – радиус-вектор, проведенный из центра полости до точки наблюдения.

При

$$r > R, \quad \vec{B}(x, y) = \frac{2\pi j_0}{c} \left\{ \left[\frac{yR^2}{r^2} - \frac{yr_0^2}{(r')^2} \right] \vec{e}_x - \left[\frac{xR^2}{r^2} - \frac{(x-a)r_0^2}{(r')^2} \right] \vec{e}_y \right\}; \text{ где}$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad (r')^2 = (x-a)^2 + y^2;$$

при

$$r < R, \quad r' > r_0,$$

$$\vec{B}(x, y) = \frac{2\pi j_0}{c} \left\{ \left[y - \frac{yr_0^2}{(r')^2} \right] \vec{e}_x - \left[x - \frac{(x-a)r_0^2}{(r')^2} \right] \vec{e}_y \right\};$$

при $r < R$, $r' < r_0$, $\vec{B}(x, y) = -\frac{2\pi j_0 a}{c} \vec{e}_y$ – однородное поле.

$$7. \quad t = 3l \sqrt{\frac{m}{2e\varphi_0}};$$

$$8. \quad v_{st} = \frac{c^2 mgR}{(Bl)^2};$$

$$9. \quad C(t) = C_0 \left(1 - \frac{t^2}{2LC_0} \right);$$

$$10. \quad V = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ М/с}, \text{ удаление};$$

11. если $v_1 \leq v_2 \sqrt{1 + (a/b)^2}$, то траектория движения направлена по прямому отрезку AB ; если $v_1 > v_2 \sqrt{1 + (a/b)^2}$, то траектория проходит вдоль ox до точки $C(z, 0)$ и по далее по прямому отрезку CD .

$$z = b - \frac{v_2 a}{\sqrt{v_1^2 - v_2^2}};$$

$$12. \quad \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{u}{V} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}};$$

$$13. \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{u \sin \theta' \sqrt{1 + B^2}}{u \cos \theta' + V}, \quad B = \frac{V}{c};$$

$$14. \quad E_0 = \frac{c^2}{m_e} (2m_p^2 - m_e^2) \approx 3.44 \cdot 10^3 \text{ ГэВ};$$

Вариант 5

$$1. \quad \text{При } r > R, \quad E_{1r}(r) = \frac{4\pi k(R - r_0)}{r^2}, \quad \varphi_1(r) = \frac{4\pi k(R - r_0)}{r};$$

при

$$R > r > r_0,$$

$$E_{2r}(r) = \frac{4\pi k(r - r_0)}{r^2}, \quad \varphi_2(r) = -4\pi k \ln\left(\frac{r}{R}\right) + 4\pi k\left(1 - \frac{r_0}{r}\right);$$

при $r < r_0$, $E_{3r} = 0$, $\varphi_3(r) = 4\pi k \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)$, где E_{1r} , E_{2r} , E_{3r} – радиальные компоненты электрического поля;

$$2. \quad F_Q = \frac{Q(ql + QR_1)}{l^3} - \frac{Q^2 R_1 l}{(l^2 - R_1^2)^2}, \quad F_q = 0;$$

$$3. \quad F = \frac{3P^2}{16\varepsilon z^4} (1 + \cos^2 \alpha); \quad W = -\frac{P^2}{16\varepsilon z^3} (1 + \cos^2 \alpha);$$

$$4. \quad R_{13} = 1.4r;$$

5. Указание: воспользоваться формулами преобразования полей при переходе от инерциальной системы отсчета K к системе K' ;

$$6. \quad B_\varphi(x) = \frac{4I}{cx} \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad \text{где } x \text{ – расстояние от точки } A \text{ до точки}$$

наблюдения вдоль оси перпендикулярной плоскости проводников,

B_φ – φ -я компонента вектора магнитной индукции в цилиндрической системе координат с осью oz направленной вдоль исходного провода;

$$7. \quad T = \sqrt{27}\tau;$$

$$8. \quad I_R = \frac{I_r \omega \pi r^2}{\rho R c^2};$$

$$9. \quad \text{а) } I(t) = \frac{E}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad \text{где } \tau = \frac{L}{R}$$

$$\text{б) при } t > t^*, \quad I(t) = \frac{E}{R} \left[\exp\left(\frac{t^*}{\tau}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right);$$

$$10. \quad v = \frac{c}{2} \frac{\Delta v}{v_0} \approx 15 \text{ км/с};$$

$$11. \quad v^2 = \left\{ (\vec{V}_1 - \vec{V}_2)^2 - \frac{[\vec{V}_1 \times \vec{V}_2]^2}{c^2} \right\} \left(1 - \frac{\vec{V}_1 \vec{V}_2}{c^2} \right)^{-2};$$

$$a) \vec{V}_1 \parallel \vec{V}_2, \vec{v} = \frac{\vec{V}_1 - \vec{V}_2}{1 - \frac{\vec{V}_1 \vec{V}_2}{c^2}}; \quad б) \vec{V}_1 \perp \vec{V}_2, v^2 = V_1^2 + V_2^2 - \frac{(\vec{V}_1 \vec{V}_2)^2}{c^2};$$

$$12. \quad M^2 c^4 = (m_1^2 + m_2^2) c^4 + 2A - 2\vec{p}_1 \vec{p}_2 c^2 \cos \theta; \text{ где}$$

$$A = \sqrt{(p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4)(p_2^2 c^2 + m_2^2 c^4)}$$

$$13. \quad E = \frac{E_0}{1 + \frac{2E_0}{mc^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}};$$

$$14. \quad E = m_p c^2 \approx 938 \text{ МэВ};$$

Вариант 6

1. Искомое поле ищем в виде суперпозиции двух полей: поля пластины с плотностью заряда ρ и шара с плотностью заряда $-\rho$.

$$r < R, E(r, \alpha) = \frac{4\pi\rho r}{3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha};$$

$$R < r < \frac{R}{\cos \alpha}, E(r, \alpha) = \frac{4\pi\rho}{3r^2} \sqrt{R^6 + (9r^6 - 6R^3 r^3) \cos^2 \alpha};$$

$$r > \frac{R}{\cos \alpha}, E(r, \alpha) = \frac{4\pi\rho R}{3r^2} \sqrt{R^4 + 9r^4 - 6R^2 r^2 \cos^2 \alpha}, \text{ где } r -$$

расстояние от центра шара до точки наблюдения, α – угол между нормалью к плоскости, проведенной из центра шара, и радиус-вектором, проведенным в точку измерения;

$$2. \quad \vec{p} = \vec{E} \cdot R^3;$$

$$3. \quad \sigma(a) = -\frac{Q(\varepsilon - 1)}{4\pi\varepsilon a^2}, \quad \sigma(b) = \frac{Q(\varepsilon - 1)}{4\pi\varepsilon b^2}, \quad C = \frac{\varepsilon ab}{b + a(\varepsilon - 1)};$$

$$4. \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3};$$

5. Указание: воспользоваться формулами преобразования полей при переходе от инерциальной системы отсчета K к системе K' ;

$$6. \quad \text{а) } \vec{B}(A) = \frac{I(2+\pi)}{cr_0} \vec{n}; \quad \text{б) } \vec{B}(A) = \frac{\pi I}{cr_0} \vec{n};$$

$$\text{в) } \vec{B}(A) = \frac{I}{ca} \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \right) \vec{n},$$

где \vec{n} – нормаль к плоскости, в которой расположен проводник; направление вектора магнитной индукции определяется по правилу правого винта;

$$7. \quad v_{\max} = \frac{mgc(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{qB\mu} \text{ при } \mu \leq \operatorname{tg} \alpha; \quad v = 0 \text{ при } \mu \geq \operatorname{tg} \alpha;$$

$$8. \quad B_z = \frac{2\pi I_1 N_1}{lc} \left[\frac{(l/2 - z)}{a} + \frac{(l/2 + z)}{b} \right] \pm \frac{2\pi I_2 N_2}{lc} \left[\frac{(l/2 - z)}{c} + \frac{(l/2 + z)}{d} \right];$$

здесь oz – расстояние вдоль оси от центра соленоида;

$$a = \sqrt{(l/2 - z)^2 + r_1^2}; \quad b = \sqrt{(l/2 + z)^2 + r_1^2};$$

$$d = \sqrt{(l/2 + z)^2 + r_2^2}; \quad c = \sqrt{(l/2 - z)^2 + r_2^2};$$

$$9. \quad I_{1\max} = U_0 \sqrt{\frac{L_2 C}{L_1(L_1 + L_2)}}, \quad \frac{I_{1\max}}{I_{2\max}} = \frac{L_2}{L_1};$$

$$10. \quad S = \pi a^2 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}};$$

11. В системе отсчета K'' , скорость которой относительно системы K

$$\text{направлена вдоль стержня и равна } W = \frac{c^2}{V} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \right);$$

12. а) $M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2\gamma m_1 m_2$, $W = \frac{V_1 \gamma m_1}{(\gamma m_1 + m_2)}$, где

$$\gamma = \left(1 - \frac{V_1^2}{c^2}\right)^{-1/2};$$

б) $M^2 = (m_1 + m_2)^2 + \frac{2T_1 m_2}{c^2}$, $W = c \frac{\sqrt{T_1 (T_1 + 2m_1 c^2)}}{(m_1 + m_2)c^2 + T_1}$;

13. $\vec{F} \left(0, \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} F_y', 0\right)$;

14. $E_{\min} = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{2c^2}}}$;

Вариант 7

1. $\vec{E}(z) = \frac{2\pi\sigma z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \vec{e}_z$, $\varphi(z) = -2\pi z \sqrt{a^2 + z^2} + C$, где ось oz

перпендикулярна плоскости листа и проходит через центр отверстия, начало координат расположено в центре отверстия;

2. $\frac{F_2}{F_1} = 3.28$;

3. $(Q^*)^2 = 16\pi R^3 (12\alpha + 7p_0 R)$, $Q_0 = -\frac{Q^*}{2}$, где α – коэффициент

поверхностного натяжения, p_0 – атмосферное давление;

4. $\frac{tg\theta_1}{tg\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$;

5. $B = \frac{2\pi NI}{(R_2 - R_1)} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$, $\vec{m} = \frac{\pi NI}{3c} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \vec{n}$, где \vec{n} –

нормаль к плоскости спирали;

6. при $r < R$, $\vec{B} = \frac{2Q}{3Rc} \vec{\omega}$; при
 $r > R$, $\vec{B}(\vec{r}) = \frac{3(\vec{m}\vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3}$, $\vec{m} = \frac{R^2Q}{3c} \vec{\omega}$;
7. $M = \frac{4I_1I_2}{c^2} \sin \alpha (R_2 - R_1)$;
8. $L_{12} = 4\pi \left(b - \sqrt{b^2 - a^2} \right)$, $F = \frac{4\pi I_1 I_2}{c^2} \left(1 - \frac{b}{\sqrt{b^2 - a^2}} \right)$;
9. $L = L_1 + L_2 + 2L_{12}$, изменится $L = L_1 + L_2 - 2L_{12}$;
10. $x'' = x$, $y'' = \gamma(y - Wt)$, $z'' = z$, $t'' = \gamma \left(t - \frac{W}{c^2} y \right)$, $\gamma = \left(1 - \frac{W^2}{c^2} \right)^{-1/2}$;
11. $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$;
12. $\frac{T_e}{T_p} \approx \frac{2m_p c}{p} \approx 10$;
13. $E_{\max} = m_0 c^2 \frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2}$, $E_{\min} = m_0 c^2$, $\beta = \frac{V}{c}$;
14. $\cos \frac{\theta}{2} = \frac{\sqrt{E_0^2 - m^2 c^4}}{E_0 + m c^2}$;

Вариант 8

1. При $z > 0$,

$$\varphi(x, y, z) = \frac{2\pi\sigma_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin(\alpha x) \sin(\beta y) \exp\left(-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot z\right),$$

при $z < 0$,

$$\varphi(x, y, z) = \frac{2\pi\sigma_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin(\alpha x) \sin(\beta y) \exp\left(\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot z\right);$$

2. $q_1 = -\frac{2}{3}Q$, $q_2 = -\frac{1}{3}Q$; где q_1 – заряд на плоскости ближайшей к заряду Q ;

3. при $r < R$, $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q\vec{r}}{\varepsilon_1 r^3}$, $\varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{\varepsilon_1 r} + \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} \right)$;

при $r > R$, $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q\vec{r}}{\varepsilon_2 r^3}$, $\varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{\varepsilon_2 r}$;

4. $E_{equ} = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2}$, $r_{equ} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$;

5. $B(a, b) = \frac{2}{abc} \sqrt{\pi^2 b^2 I_1^2 + a^2 I_2^2}$;

6. а) над плоскостью $B_\varphi(r) = \frac{2I}{cr}$, под плоскостью $B = 0$;

б) в полубезграничном проводнике $B_\varphi = \frac{2I}{cr} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right)$, где β – угол

между осью провода и радиус-вектором, проведенным из точки контакта провода с поверхностью полубезграничного проводника в точку наблюдения;

7. $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1 b}{c g (m_1 + m_2)}$, где α – угол между плоскостью рамки и вертикалью;

8. $I_1 = \frac{4aB_0}{\rho\tau(\sqrt{128+3\pi})}$, $I_2 = \frac{aB_0(\sqrt{128+3\pi}-6)}{2\rho\tau(\sqrt{128+3\pi})}$,

$I = I_1 + I_2 = \frac{aB_0(\sqrt{128+3\pi}+2)}{2\rho\tau(\sqrt{128+3\pi})}$;

$$9. \quad I(t) = \frac{U_0 \cos(\omega t - \delta)}{|Z|}, \quad |Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

резонанс при $\omega^2 = \frac{1}{LC}$;

$$10. \quad \vec{r}' = \gamma(\vec{r} - \vec{V}t) + (\gamma - 1) \frac{[[\vec{r} \times \vec{V}] \times \vec{V}]}{V^2};$$

$t' = \gamma \left(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{V}}{c^2} \right), \quad \gamma = \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)^{-1/2}$; указание: разложить \vec{r} на продольную и поперечную относительно \vec{V} компоненты;

11. В системе связанной с одной из частиц: $r_{\min} = \frac{L}{\sqrt{2}}$, в K -системе:

$$r_{\min} = L \cdot \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right) \left(2 - \frac{V^2}{c^2} \right)^{-1/2};$$

12. Указание: воспользоваться законами сохранения энергии и импульса;

$$13. \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{V}{c} \cos \alpha \right) \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1, \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0; \quad \text{при}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \frac{V}{c} = \frac{24}{25}, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 2.57$$

$$14. \quad E_e = m_p c^2;$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ

(механико-математический факультет НГУ, 4-й курс)

I семестр

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.

ПРЕДМЕТ ФИЗИКИ ([2, т. 1, гл. 1–5, 10, 12–17; Т. 5, гл. 12])

1. Частицы. Поля. Волны. Фундаментальные взаимодействия. Состояния вещества.

2. Пространство и время. Законы сохранения.
3. Эксперимент и теория. Физические величины. Системы единиц и эталоны.

Роль математики в физике.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА ([1, т. 2, гл. 1–3; 2, т. 1, гл. 13–14, 18; Т. 5, гл. 1, 4–8; 3, гл. 1; 5, т. 3, гл. 1])

4. Закон Кулона. Электрическое поле заряда. Принцип суперпозиции.
5. Потенциал. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности.
6. Теорема Гаусса. Уравнения Максвелла для электростатики.
7. Проводники в электрическом поле. Метод изображений.
8. Поле и потенциал диполя.
9. Конденсаторы. Энергия электрического поля.

ДИЭЛЕКТРИКИ ([1, т. 2, гл. 1–3, 9; 2, т. 5, гл. 10–11; 3, гл. 2; 5, т. 3, гл. 1])

10. Диполь во внешнем поле. Наведенная поляризация. Поляризуемость.
11. Поле в среде. Векторы поляризации и электростатической индукции.
12. Диэлектрическая проницаемость. Уравнения электростатики в присутствии диэлектриков. Условия на границе двух сред. Энергия поля в среде.

ПОСТОЯННЫЙ ТОК ([1, т. 2, гл. 4; 2, т. 5, гл. 13; 3, гл. 3; 5, т. 3, гл. 2])

13. Электрический ток. Сопротивление. Закон Ома.
14. Сторонняя эдс. Источники тока. Правила Кирхгофа.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ([1, т. 2, гл. 5–6, 10; 2, т. 5, гл. 13–14; Т. 6, гл. 15–17; 3, гл. 4–6; 5, т. 3, гл. 3])

15. Сила Лоренца.
16. Закон Био – Савара. Векторный потенциал магнитного поля.
17. Взаимодействие токов. Формула Ампера.
18. Теорема Стокса. Уравнения Максвелла для магнитостатики.
19. Магнитный момент.
20. Магнитное поле в среде. Намагниченность. Вектор магнитной индукции. Условия на границе двух сред.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ([1, т. 2, гл. 7; 2, т. 6, гл. 15, 17–18, 20, 21–22, 29; 3, гл. 6–7; 5, т. 3, гл. 4])

21. Закон Фарадея.

22. Энергия магнитного поля. Индуктивность.
23. Цепи переменного тока. Импеданс. Простейшие импульсные цепи.
24. Ток смещения. Полная система уравнений Максвелла.
25. Электромагнитные волны. Дипольное излучение.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ([1, т. 1, гл. 10–13; 2, т. 2, гл. 15–17; Т. 6, гл. 25])

26. Инвариантность скорости света в теории Максвелла. Принцип относительности Эйнштейна. Предельная скорость. Относительность одновременности.
27. Преобразования Лоренца. Сокращение масштаба и замедление времени. Интервал. Релятивистская динамика.
28. Четырехвекторы. Сохранение энергии – импульса.

II семестр

ВОЛНЫ. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.

ВОЛНОВАЯ ФИЗИКА И ОПТИКА ([1, т. 3, гл. 9; 2, т. 7, гл. 32–33; 5, т. 4, гл. 1–5])

1. Интенсивность волны. Сложение волн. Интерференция.
2. Интерференция света. Принцип Гюйгенса.
3. Дифракция от двух щелей. Дифракционная решетка.
4. Преломление и отражение света. Показатель преломления.
5. Освещенность, световой поток, сила света.
6. Дисперсия. Фазовая и групповая скорость волны. Спектры.
7. Геометрическая оптика. Принцип Ферма.
8. Оптические приборы. Фотография, голография, томография.

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА ([1, т. 4, гл. 1, 2, 5–9; 2, т. 3, гл. 37–38])

9. Постоянная Планка. Кванты. Распределение Бозе – Эйнштейна. Фотонный газ. Вращательная и колебательная энергия молекул.
10. Атом Бора. Волны де Бройля. Принцип неопределенности Гейзенберга.
11. Волновая функция. Уравнение Шредингера.
12. Строение атома. Принцип Паули.
13. Распределение Ферми – Дирака. Электроны в металлах.
14. Атомное ядро. Ядерные силы. Реакции деления. Цепная реакция.
15. Атомная энергетика. Термоядерные реакции. Элементарные частицы.

ТЕРМОДИНАМИКА ([1, т. 5, гл. 2, 4–6; 2, т. 4, гл. 44–45; 4, гл. 1; 5, т. 2, гл. 1–2])

16. Уравнение состояния идеального газа. Температура. Внутренняя энергия газа. Степени свободы.

17. P – V –диаграмма. Работа расширения. Первый закон термодинамики. Теплоемкость при разных процессах.

18. Адиабатический процесс. Тепловые машины. Работа и КПД цикла.

19. Второй закон термодинамики. Энтропия.

20. Термодинамические потенциалы.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ ([4, гл. 2; 5, т. 2, гл. 8–10; 6, гл. 12])

21. Потенциальная энергия молекул. Фазовые переходы. Кривые фазового равновесия. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

22. Уравнение Ван-дер-Ваальса.

23. Поверхностный слой. Капиллярные явления.

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ([2, т. 1, гл. 39–43; 6, гл. 14–15; 5, т. 2, гл. 4, 7, 9])

24. Столкновения молекул. Длина свободного пробега.

25. Диффузия. Теплопроводность и вязкость.

СТАТИСТИКА ([1, т. 5, гл. 6; [2, т. 1, гл. 6; 6, гл. 11])

26. Равновесие атмосферы. Распределение Больцмана.

27. Распределение Максвелла. Установление равновесия. Скорость химической реакции.

Программу составили:

профессор А. А. Васильев,

профессор А. П. Ершов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берклеевский курс физики. М.: Наука, 1971–1974. Т. 1–6.

2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1977–1978. Т. 1–9.

3. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003.

4. Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1972.

5. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2005–2007. Т. 1–5.

6. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1965.
7. Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. Сборник задач по электродинамике. М.: Наука, 1970.
8. Векштейн Е. Г. Сборник задач по электродинамике. М.: Высшая школа, 1966.
9. Гречко Л. Г., Сугаков В. И., Томасевич О. Ф., Федорченко А. М. Сборник задач по теоретической физике. М.: Высшая школа, 1984.
10. Угаров В. А. Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977.

СОДЕРЖАНИЕ

Основные задачи	3
Контрольные задания.....	29
Ответы к основным задачам.....	48
Ответы к задачам контрольных заданий	61
Приложение. Программа по физике.	76
Список литературы.	79