

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе
А. А. Воронов
15 июня 2021 года

ПРОГРАММА

по дисциплине: **Общая физика: электричество и магнетизм**
по направлению подготовки: **03.03.01 «Прикладные математика и физика»**
физтех-школа: **для всех физтех-школ**
кафедра: **общей физики**
курс: 2
семестр: 3

Трудоёмкость:

теор. курс: базовая часть – 5 зачет. ед.;

физ. практикум: базовая часть – 3 зачет. ед.;

лекции – 60 часов

Экзамен – 3 семестр

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 60 часов

Диф. зачёт – 3 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 150

Самостоятельная работа:

теор. курс – 105 часов

физ. практикум – 75 часов

Программу и задание составили:

д.ф.-м.н., проф. А. В. Гавриков

к.ф.-м.н., доц. К. Л. Клименок

д.ф.-м.н., проф. Г. Р. Локшин

к.т.н., доц. В. А. Овчинкин

к.ф.-м.н., проф. В. А. Петухов

к.ф.-м.н., доц. П. В. Попов

к.ф.-м.н., доц. Ю. Н. Филатов

Программа принята на заседании кафедры общей физики 15 мая 2021 года

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

А. В. Максимычев

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

1. Электрические заряды и электрическое поле. Закон сохранения заряда. Напряжённость электрического поля. Закон Кулона. Система единиц СГСЭ. Принцип суперпозиции. Электрическое поле диполя. Теорема Гаусса для электрического поля в вакууме в интегральной и дифференциальной формах. Её применение для нахождения электростатических полей.
2. Потенциальный характер электростатического поля. Теорема о циркуляции электростатического поля. Потенциал и разность потенциалов. Связь напряжённости поля с градиентом потенциала. Граничные условия для вектора E . Уравнения Пуассона и Лапласа. Проводники в электрическом поле. Граничные условия на поверхности проводника. Единственность решения электростатической задачи. Метод изображений.
3. Электрическое поле в веществе. Поляризация диэлектриков. Свободные и связанные заряды. Вектор поляризации и вектор электрической индукции. Поляризуемость частиц среды. Диэлектрическая проницаемость среды. Теорема Гаусса в диэлектриках. Граничные условия на границе двух диэлектриков.
4. Электрическая ёмкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля и её локализация в пространстве. Объёмная плотность энергии. Взаимная энергия зарядов. Энергия диполя во внешнем поле. Энергия в системе заряженных проводников. Силы в электрическом поле. Энергетический метод вычисления сил (метод виртуальных перемещений).
5. Постоянный ток. Сила тока. Объёмная и поверхностная плотности тока. Закон Ома в интегральной и дифференциальной формах. Уравнение непрерывности для плотности заряда. Электродвижущая сила. Правила Кирхгофа для электрических цепей. Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля–Ленца. Токи в неограниченных средах.
6. Магнитное поле постоянного тока в вакууме. Вектор магнитной индукции. Сила Лоренца. Сила Ампера. Закон Био–Савара. Теорема Гаусса для магнитного поля. Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме в интегральной форме. Магнитное поле прямого провода, тороидальной катушки и соленоида.
7. Магнитный момент тока. Точечный магнитный диполь. Сила и момент сил, действующие на виток с током в магнитном поле. Эквивалентность витка с током и магнитного листка. Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме в дифференциальной форме.
8. Магнитное поле в веществе. Магнитная индукция и напряжённость поля. Вектор намагниченности. Токи проводимости и молекулярные токи. Теорема о циркуляции магнитного поля в веществе. Граничные условия на границе двух магнетиков.
9. Электромагнитная индукция. Поток магнитного поля. ЭДС индукции в

- движущихся проводниках. Вихревое электрическое поле. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах.
10. Коэффициенты само- и взаимной индукции. Установление тока в цепи, содержащей индуктивность. Теорема взаимности. Магнитная энергия токов. Локализация магнитной энергии в пространстве, объёмная плотность магнитной энергии. Энергетический метод вычисления сил в магнитном поле. Магнитные цепи. Подъёмная сила электромагнита.
 11. Магнитные свойства вещества. Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков. Понятие о ферромагнетиках. Ферромагнитный гистерезис. Магнитные свойства сверхпроводников I рода.
 12. Относительный характер электрического и магнитного полей. Сила Лоренца. Преобразование \vec{E} и \vec{B} при смене системы отсчёта (при $v \ll c$). Поле равномерно движущегося точечного заряда. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Дрейф в скрещенных однородных полях. Эффект Холла, влияние магнитного поля на проводящие свойства сред.
 13. Квазистационарные процессы в электрических цепях. Колебания в линейных системах. Колебательный контур. Свободные затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент и добротность. Энергетический смысл добротности.
 14. Вынужденные колебания под действием синусоидальной силы. Амплитудная и фазовая характеристики. Резонанс. Процесс установления стационарных колебаний.
 15. Установившиеся колебания в цепи переменного тока. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Комплексное сопротивление (импеданс). Правила Кирхгофа для переменных токов. Работа и мощность переменного тока.
 16. Понятие о спектральном разложении. Спектр одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности импульсов. Соотношение неопределённостей. Вынужденные колебания под действием произвольной силы.
 17. Спектральный анализ линейных систем. Частотная характеристика и импульсный отклик системы. Колебательный контур как спектральный прибор. Интегрирующая и дифференцирующая цепочки как высокочастотный и низкочастотный фильтры. Модуляция и детектирование сигналов. Амплитудная и фазовая модуляции. Квадратичное детектирование сигналов.
 18. Электрические флуктуации. Тепловой шум, формула Найквиста. Дробовой шум, формула Шоттки. Флуктуационный предел измерения слабых сигналов.

19. Параметрическое возбуждение колебаний. Параметрический резонанс. Автоколебания в электрических цепях. Положительная обратная связь. Условие самовозбуждения. Роль нелинейности.
20. Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме. Граничные условия. Ток смещения. Материальные уравнения.
21. Энергия переменного электромагнитного поля. Поток электромагнитной энергии, теорема Пойнтинга.
22. Волновое уравнение. Электромагнитные волны в однородном диэлектрике, их поперечность и скорость распространения. Электромагнитная природа света. Монохроматические волны. Комплексная амплитуда. Уравнение Гельмгольца. Плоская электромагнитная волна. Приближение сферической волны.
23. Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Явление Брюстера. Поток энергии в электромагнитной волне. Давление излучения. Электромагнитный импульс. Понятие о механизме излучения электромагнитных волн.
24. Понятие о линиях передачи энергии. Двухпроводная линия. Коэффициент стоячей волны. Согласованная нагрузка.
25. Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе. Дисперсионное уравнение. Критическая частота. Объёмные резонаторы.
26. Элементы физики плазмы. Дебаевский радиус экранирования. Плазменные колебания, плазменная частота. Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы. Проникновение электромагнитных волн в плазму.
27. Квазистационарное проникновение поля в проводящую среду, скин-эффект. Сжатие плазменного шнура под действием протекающего в нем тока, пинч-эффект.

Литература

Основная

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. — Москва : Физматлит, 2004.
2. *Кингсеп А.С., Локишин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. / под ред. А.С. Кингсеп. — Москва : Физматлит, 2007.
3. *Кириченко Н.А.* Электричество и магнетизм. — Москва : МФТИ, 2011.

Дополнительная

1. *Калашиников С.Г.* Электричество. — Москва : Наука, 1997.
2. *Калашиников Н.П., Смондырев М.А.* Основы физики. Т.1. — Москва : Лаборатория знаний, 2017
3. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. — Москва : Физматлит, 2003.
4. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм. — Москва : Наука, 1983.
5. *Фейнман Р.П.* Фейнмановские лекции по физике. Выпуски 5, 6, 7. — Москва : Мир, 1977.
6. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. — Москва : Физматлит, 2006.

7. Козел С.М., Локишин Г.Р. Модулированные колебания, спектральный анализ, линейная фильтрация. — Москва : МФТИ, 2009.

Электронные ресурсы: http://physics.mipt.ru/S_III/

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ
для студентов 2-го курса на осенний семестр
2021/22 учебного года

Дата	№ нед.	Тема семинарских занятий	Задачи		
			0	I	II
1–7 сен.	1	Электростатическое поле в вакууме. Поле диполя. Теорема Гаусса.	⁰ 1.1 ⁰ 1.2 ⁰ 1.3	1.7 1.14 1.19 1.22/23	1.10 1.16 1.17 T1
8–14 сен.	2	Потенциал. Проводники в электрическом поле. Метод изображений.	⁰ 2.1 ⁰ 2.2 ⁰ 2.3	1.24 2.3 2.20 2.22	1.26 2.11 2.15 2.48 T2
15–21 сен.	3	Электрическое поле в веществе.	⁰ 3.1 ⁰ 3.2 3.1	3.8 3.26 3.39 3.77	T3 3.30 T4 3.79
22–28 сен.	4	Энергия и силы в электрическом поле. Токи в неограниченных средах.	⁰ 4.1 3.50 ⁰ 4.2	1.5 3.44 3.67 4.23	3.61 3.73 4.36 T5
29 сен – 5 окт	5	Магнитное поле постоянного тока. Магнитный момент.	⁰ 5.1 ⁰ 5.2 ⁰ 5.3	5.5 5.10 5.18 5.26	5.12 5.14 5.23 T6
6–12 окт.	6	Магнитное поле в веществе.	6.3/4 T7 ⁰ 6.1	6.7 6.17 6.12 6.52	6.5 6.9 6.18 T8

13–19 окт.	7	Электромагнитная индукция. Теорема взаимности. Магнитная энергия.	10.1 7.1 ⁰ 7.1	5.29 7.31 7.64 T9	5.33 5.28 7.58 6.50 8.47
20–26 окт.	8	Сверхпроводники в магнитном поле. Эффект Холла. Движение заряженных частиц.	6.35 8.9 ⁰ 8.1	6.37 8.30 8.69 T10	7.83 8.34 8.100 T11
27 окт. – 2 ноя.	9	Сдача 1-го задания			
3–9 нояб.	10	Переходные процессы и свободные колебания в электрических цепях.	9.4 ⁰ 10.1 9.33	9.8 9.48 9.27 T12	9.36 9.54 9.15 T13
10–16 нояб.	11	Вынужденные колебания.	⁰ 11.1 ⁰ 11.2	10.6 10.22 10.40 10.92	10.20 10.26 10.82 T14
17–23 нояб.	12	Спектральный анализ. Модуляция. Параметрические колебания. Автоколебания.	11.1 11.3 (а,б) ⁰ 12.1	T15 T16 11.35 11.37	11.10 11.13 T17 10.70 11.36
24–30 нояб.	13	Уравнения Максвелла. Вектор Пойнтинга.	⁰ 13.1 ⁰ 13.2	8.51 12.3 12.5/8 12.9	12.22 12.27 12.81 T18
1–7 дек.	14	Электромагнитные волны. Линии передачи энергии. Волноводы. Резонаторы.	⁰ 14.1 ⁰ 14.2 ⁰ 14.3	12.25/40 12.46 12.52 8.101	12.42 12.67 12.48 T19
8–14 дек.	15	Элементы физики плазмы. Скин-эффект.	⁰ 15.1 ⁰ 15.2 ⁰ 15.3	12.55 12.58 12.96 T20	12.53 12.61 T21 T22
15–21 дек.		Сдача 2-го задания			

Примечания

Номера задач указаны по «Сборнику задач по общему курсу физики. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Оптика / под ред. В.А. Овчинкина (4-е изд., испр. и доп.). — Москва .: Физматкнига, 2017».

В каждой теме семинара задачи разбиты на 3 группы:

- 0** — задачи, которые студент должен решать в течение недели для подготовки к семинару;
- I** — задачи, рекомендованные для разбора на семинаре (преподаватель может разбирать на семинарах и другие равноценные задачи по своему выбору);
- II** — задачи для самостоятельного решения; их решения должны быть оформлены студентами в отдельных тетрадях и сданы преподавателю на проверку.

Решение всех задач обязательно для сдачи задания.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К СЕМИНАРАМ

(задачи группы 0)

Семинар 1

01.1. Вычислить отношение сил электростатического отталкивания и гравитационного притяжения двух протонов.

Ответ: $1,24 \cdot 10^{36}$.

01.2. Оцените среднюю концентрацию электрических зарядов в атмосфере, если известно, что напряжённость электрического поля на поверхности Земли равна 100 В/м, а на высоте $h = 1,5$ км она падает до 25 В/м. Вектор E направлен к центру Земли. Ответ выразить в элементарных зарядах на см³.

01.3. Используя формулу для напряжённости поля точечного диполя с дипольным моментом \vec{p} , найдите напряжённость поля на оси диполя ($\alpha = 0$) и в перпендикулярном направлении ($\alpha = \pi/2$).

Ответ: $\vec{E}_1 = \frac{2\vec{p}}{r^3}$, $\vec{E}_1 = -\frac{\vec{p}}{r^3}$.

Семинар 2

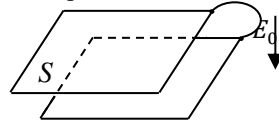
02.1. Незаряженный проводящий шар вносится в электрическое поле с известным распределением потенциала $\varphi(\vec{r})$. Каким будет потенциал шара?

02.2. В опытах Резерфорда золотая фольга бомбардировалась α -частицами ${}^4_2\text{He}$ с кинетической энергией $W = 5$ МэВ. На какое минимальное расстояние может приблизиться α -частица к ядру золота ${}^{197}_{79}\text{Au}$? (заряд электрона $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГС; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг).

Ответ: $r_{\min} = 2 \cdot 79 \cdot \frac{e^2}{W} \left(1 + \frac{4}{197}\right) = 4,6 \cdot 10^{-12}$ см.

02.3. Напряжённость электрического поля Земли $E_0 = 130$ В/м, причём вектор $\vec{E}_0 \uparrow \uparrow \vec{g}$. Какой заряд приобретёт горизонтально расположенный короткозамкнутый плоский конденсатор с площадью пластин $S = 1 \text{ м}^2$?

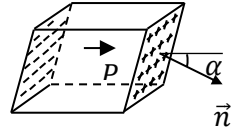
Ответ: $Q = 3,4$ ед. СГС.



Семинар 3

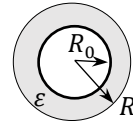
03.1. Найдите плотность поляризационных зарядов на торцах однородно поляризованного параллелепипеда.

Ответ: $\sigma_{\text{пол}} = P \cos \alpha$.



03.2. Проводящий шар радиуса R_0 несёт заряд q и окружён шаровым слоем диэлектрика с проницаемостью ϵ , вплотную прилегающим к поверхности шара. Внешний радиус равен R . Определить потенциал проводящего шара.

Ответ: $\varphi = \frac{q}{R} \left(1 + \frac{R-R_0}{\epsilon R_0}\right)$.



Семинар 4

04.1. Поверхностная плотность заряда на пластинах плоского конденсатора, заполненного твёрдым диэлектриком с проницаемостью ϵ , равна $\pm \sigma$. Определите объёмную плотность электрической энергии w в конденсаторе, а также силу f , действующую на единицу площади обкладок.

Ответ: $w = \frac{2\pi\sigma^2}{\epsilon}$, $f = 2\pi\sigma^2$.

04.2. Конденсатор ёмкостью $C = 20$ см заполнен однородной слабопроводящей средой, имеющей малую проводимость $\lambda = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 2$. Определить электрическое сопротивление между обкладками.

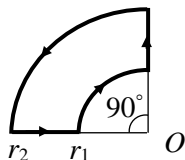
Ответ: $R \approx 8 \text{ кОм}$.

Семинар 5

5.1. Определите индукцию магнитного поля в центре крайнего витка длинного соленоида с плотностью намотки n витков/см. По виткам соленоида протекает постоянный ток I .

Ответ: $B = \frac{2\pi n I}{c}$.

5.2. Проводящий контур, по которому течёт постоянный ток I , состоит из отрезков дуг и радиусов (см. рис.). Определите индукцию магнитного поля в точке O .



Ответ: $B = \frac{\pi I}{2c} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$.

5.3. Плоский конденсатор с обкладками в виде круглых дисков радиуса R заполнен немагнитной слабо проводящей средой. Через конденсатор протекает постоянный ток I . Найдите индукцию магнитного поля на расстоянии $r \leq R$ от оси конденсатора.

Ответ: $B = \frac{2I}{c} \cdot \frac{r}{R^2}$.

Семинар 6

6.1. Постоянный магнит длиной L с однородной намагниченностью I согнут в кольцо так, что между полюсами остался маленький зазор $\ell \ll L$. Определите магнитную индукцию в зазоре.

Ответ: $B = 4\pi I \frac{L}{L+\ell} \approx 4\pi I$.

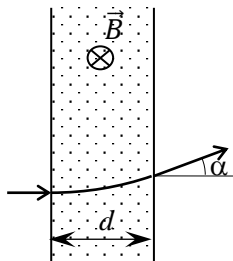
Семинар 7

7.1. Определить давление магнитного поля на стенки длинного соленоида кругового сечения, в котором создано магнитное поле $B = 10$ Тл. Какова при этом должна быть поверхностная плотность тока i ?

Ответ: $P \approx 400$ атм, $i = 80$ кА/см.

Семинар 8

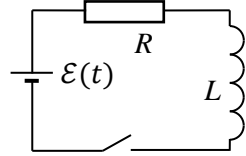
8.1. Протон влетает в область поперечного магнитного поля $B = 5$ Тл со скоростью $v = 2,4 \cdot 10^{10}$ см/с. Толщина области, занятой полем, $d = 50$ см (см. рис.). Найти угол отклонения протона α от первоначального направления движения. Излучением пренебречь.



Ответ: $\alpha \approx \arcsin \frac{3}{5} \approx 37^\circ$.

Семинар 10

10.1. Найти зависимость тока в цепи $I(t)$ от времени в схеме на рис., если после замыкания ключа в момент $t = 0$ напряжение источника меняется по закону $\mathcal{E}(t) = At$. Рассмотреть случай $t \ll L/R$.



Ответ: $I(t) \approx \frac{At^2}{2L}$.

Семинар 11

11.1. К последовательно соединенным резистору с сопротивлением $R = 3,2$ кОм и конденсатору ёмкостью $C = 1$ мкФ приложено сетевое напряжение с частотой $f = 50$ Гц. Найдите сдвиг фаз $\Delta\varphi$ между напряжением в сети и напряжением на резисторе.

Ответ: $\Delta\varphi \approx -45^\circ$.

11.2. Некоторый двухполюсник, имеющий импеданс $Z = 3 + i\sqrt{3}$ [Ом], подключён к идеальному источнику переменной ЭДС с амплитудой $\mathcal{E}_0 = 2$ В. Найдите среднюю мощность, потребляемую двухполюсником.

Ответ: $P = 0,5$ Вт.

Семинар 12

12.1. Спектр сигнала $f(t)$ равен $F(\omega)$. Найти спектр сигнала

$$g(t) = f(t) \cdot \sin \omega_0 t.$$

Ответ: $\frac{1}{2}(F(\omega + \omega_0) - F(\omega - \omega_0))$.

Семинар 13

13.1. Напряжение в плоском конденсаторе меняется по гармоническому закону $U = U_0 \sin \omega t$. Пластины имеют форму дисков радиуса R , расстояние между которыми $h \ll R$, между пластин — среда с проницаемостью ε . Пренебрегая краевыми искажениями поля, найдите магнитное поле на краю конденсатора (на расстоянии R от оси). Частоту считать малой: $\omega \ll c/R$.

Ответ: $B = \frac{\omega R}{2c} \cdot \frac{\varepsilon U_0}{h} \cos \omega t$.

13.2. Используя выражение для вектора Пойнтинга S , в условиях предыдущей задачи найдите полный поток электромагнитной энергии из конденсатора и сравните его с выражением для скорости изменения энергии, запасённой в конденсаторе dW/dt .

Ответ: $S \cdot 2\pi R h = \frac{dW}{dt} = \frac{\varepsilon \pi R^2}{h} \sin 2\omega t$.

Семинар 14

14.1. Плоская электромагнитная волна бежит в однородной среде в направлении оси z и имеет компоненты поля $E_x(z, t)$ и $B_y(z, t)$. Фазовая скорость волны равна v . Показать, что в любой момент времени $E_x = \frac{v}{c} B_y$.

14.2. При какой длине кабеля его нельзя при расчётах заменить эквивалентным точечным сопротивлением, если частота в цепи $\nu = 50$ Гц?

Ответ: $\ell \gtrsim 6 \cdot 10^3$ км.

14.3. Найти минимальную частоту электромагнитных колебаний в объёмном прямоугольном резонаторе со сторонами $1 \times 2 \times 3$ см, выполненном из идеального проводника.

Ответ: 9 ГГц.

Семинар 15

15.1. Температура электронов в плазме тлеющего разряда $T_e \sim 10^4$ К, концентрация $n_e \sim 10^9$ см $^{-3}$. При каком радиусе трубки разряд можно считать квазинейтральным?

Ответ: $r \gg 0,2$ мм.

15.2. В условиях предыдущей задачи оцените кулоновскую энергию взаимодействия заряженных частиц в плазме (в расчёте на одну частицу). Можно ли считать такую плазму идеальным газом?

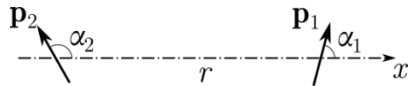
Ответ: $w_{\text{кул}} \sim 10^{-4}$ эВ; да, можно.

15.3. Радиосигнал с частотой $\nu = 4$ МГц посылается вертикально вверх и отражается от ионосферы на некоторой высоте. Определить концентрацию электронов в точке отражения.

Ответ: $n_e = 2 \cdot 10^5$ см $^{-3}$.

Текстовые задачи

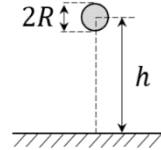
Т1. Молекула воды обладает постоянным электрическим дипольным моментом $p = 1,84$ Д (1 Д = 10^{-18} ед. СГС — «дебай», внесистемная единица дипольного момента). Две молекулы воды находятся на расстоянии $r = 35$ Å друг от друга так, что векторы их дипольных моментов \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 лежат в одной плоскости под углами α_1 и α_2 к линии, соединяющей их центры (ось x , см. рис.). Определите 1) проекцию F_x силы их взаимодействия; 2) момент сил, действующий на молекулу; 3) для случаев $\alpha_1 = \pi/2$, $\alpha_2 = \pm\pi/2$, рассчитайте величину и



направление вектора \mathbf{F} , а также оцените ускорение a , с которым будут двигаться молекулы при отсутствии других компенсирующих сил.

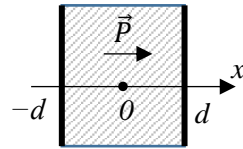
Ответ: 3) $|F_x| \sim 7 \cdot 10^{-15}$ Н, $F_y = 0$, $a \sim 2,3 \cdot 10^{10}$ г, где g – ускорение свободного падения на Земле.

T2. (2019-1Б) Напряжённость поля на поверхности земли под одиночным заряженным бесконечным проводом радиуса $R = 1$ см, расположенным параллельно поверхности, равна $E_0 = 750$ В/м. Расстояние от поверхности до оси провода $h = 4$ м. Определите потенциал провода, считая потенциал поверхности земли равным нулю.



Ответ: $\varphi = \frac{hE_0}{2} \ln \frac{2h}{R} \approx 10$ кВ.

T3. (2015-1А) Плоскопараллельная пластина изготовлена из диэлектрика с «замороженной» поляризацией, направленной вдоль оси x , перпендикулярной поверхностям пластины. Пластина поляризована неоднородно: $\vec{P}(x) = \vec{P}_0 \cdot (1 + x^2/d^2)$, где $2d$ — толщина пластины. Найти: 1) распределение плотности $\rho_{\text{пол}}$ поляризационных зарядов; 2) распределение полей \vec{E} и \vec{D} внутри и вне пластины; 3) разность потенциалов U между поверхностями пластины. Краевыми эффектами пренебречь.

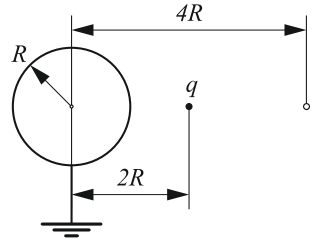


Ответ: 1) $\rho_{\text{пол}}(x) = -2P_0x/d^2$; 2) $\vec{E}_{\text{in}} = -4\pi\vec{P}_0(1 + x^2/d^2)$, $\vec{D}_{\text{in}} = 0$, $\vec{E}_{\text{out}} = 0$, $\vec{D}_{\text{out}} = 0$; 3) $U = \frac{32}{3}\pi P_0d$.

T4. На обкладках плоского конденсатора размещены заряды q и $-q$. Зазор между обкладками заполнен веществом, диэлектрическая проницаемость которого меняется по закону $\varepsilon = \frac{2}{1+x/h}$, где x – расстояние до положительной пластины, h – расстояние между пластинами. Найдите распределение объёмной плотности поляризационного заряда $\rho_{\text{пол}}$ в конденсаторе, а также его ёмкость C . Площадь каждой пластины S .

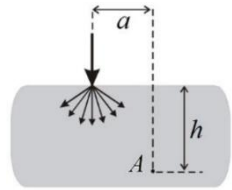
Ответ: $\rho_{\text{пол}} = +\frac{q}{2Sh} = \text{const}$, $C = \frac{S}{3\pi h}$.

T5. (2018-1Б) На расстоянии $2R$ от центра заземленного проводящего шара радиуса R находится точечный заряд q . Заряд перемещают на расстояние $4R$ от центра шара. Чему равна работа по перемещению точечного заряда q ? Чему равно изменение энергии взаимодействия индуцированных зарядов между собой?



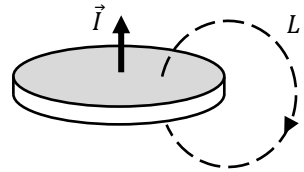
Ответ: $A = \frac{2q^2}{15R}$, $\Delta W_{\text{инд}} = -\frac{2q^2}{15R}$

T6. (2019-3Б) Постоянный ток силы I подводится по вертикальному кабелю к полусферическому небольшому заземлителю и равномерно растекается в однородном грунте. Пренебрегая проводимостью окружающего воздуха, определить напряженность магнитного поля в грунте в точке А, расположенной на расстоянии a от оси провода на глубине $h = a/\sqrt{3}$.

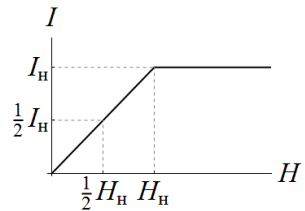


Ответ: $H = \frac{I}{ca}$.

T7. (2017-1А) Постоянный магнит изготовлен из однородно намагниченного материала и имеет форму тонкого диска толщиной d и площадью S . Вектор намагниченности \vec{I} направлен по нормали к плоскости диска. Найти циркуляцию векторов индукции и напряжённости магнитного поля \vec{B} и \vec{H} по контуру L , показанному на рисунке штриховой линией.

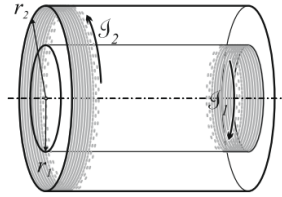


T8. (2018-2А) Сердечник тонкой тороидальной катушки изготовлен из магнетика, зависимость намагниченности $I(H)$ которого показана на рисунке. При некотором токе через катушку поле в сердечнике оказывается равным $\frac{1}{2}H_n$. При увеличении тока в три раза магнитная индукция B в сердечнике увеличивается в 2,1 раза. Определите магнитную проницаемость магнетика μ на участке линейного роста зависимости $I(H)$.



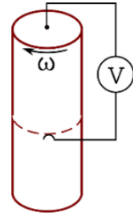
Ответ: $\mu = 10$.

T9. (2018-3Б) Длинный соленоид № 1 радиусом r_1 соосно вставлен в соленоид № 2 радиусом r_2 . Плотности намотки соленоидов одинаковые и равны n . По соленоиду № 1 течет постоянный ток J_1 , а по соленоиду № 2 — ток J_2 . Направления токов противоположны. Оценить магнитное давление, действующее на соленоид № 1.



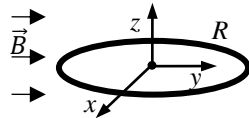
Ответ: $P = \frac{2\pi n^2}{c^2} (2J_1J_2 - J_1^2)$

T10. (2020-4А) Длинный однородный проводящий цилиндр радиусом $r = 30$ см несёт на себе некоторый заряд, так что напряжённость поля на его поверхности равна $E_0 = 30$ кВ/см. Цилиндр подключили к идеальному вольтметру как показано на рис.: одним контактом к оси, а другим скользящим контактом — к боковой поверхности в середине цилиндра. Какую разность потенциалов $\Delta\varphi$ покажет вольтметр при вращении цилиндра вокруг оси с угловой скоростью $\omega = 10^3$ рад/с? Центробежные эффекты не учитывать.



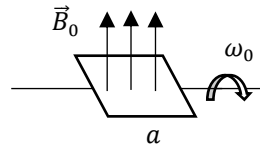
Ответ: $\Delta\varphi = 0,45$ мкВ.

T11. (2016-2А) В однородном магнитном поле \vec{B} , направленном вдоль оси y , находится сверхпроводящее кольцо, лежащее в плоскости xz . Масса кольца M , коэффициент самоиндукции L , радиус R . Найти период малых колебаний кольца при вращении вокруг оси x . Начало координат совпадает с центром кольца.



Ответ: $T = \frac{\sqrt{2LM}}{RB}$.

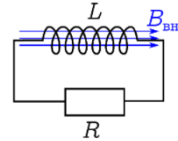
T12. (2017-5А) Квадратная рамка из тонкой медной проволоки быстро вращается вокруг оси, перпендикулярной к однородному магнитному полю с индукцией \vec{B}_0 . Ось вращения проходит через центр рамки параллельно двум её рёбрам. Частота вращения рамки, начальное значение ко-



торой ω_0 , уменьшается в e раз за время $\tau = 3,8$ с. Считая, что энергия расходуется на джоулево тепло, найдите магнитную индукцию \vec{B}_0 (проводимость меди $\sigma = 5 \cdot 10^{17}$ СГСЭ, плотность — $\rho = 8,9$ г/см³).

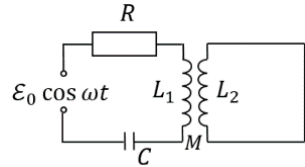
Ответ: $B_0 = \sqrt{\frac{16 \rho c^2}{3 \sigma \tau}} \approx 150$ Гс.

T13. (2020-3A) Переменное однородное внешнее магнитное поле $B_{\text{вн}}(t) = B_0 \cos \omega t$ пронизывает катушку индуктивности вдоль её оси (см. рис.). Катушка имеет индуктивность L и замкнута на сопротивление $R = \omega L$. Найдите амплитуду и сдвиг фазы (относительно $B_{\text{вн}}$) установившихся колебаний суммарного магнитного поля внутри катушки.



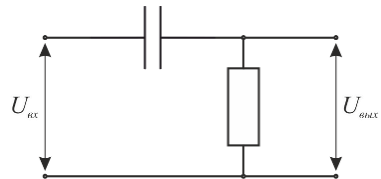
Ответ: $|B| = 1/\sqrt{2} B_0$, $\varphi = -\pi/4$.

T14. (2019-4B) Определите коэффициент взаимной индукции катушек M в схеме, изображённой на рисунке, если ток в колебательном контуре отстаёт от входного напряжения по фазе на $\pi/4$. При расчетах принять, что $L_1 = 20$ мГн, $L_2 = 5$ мГн, $R = 5$ Ом, $C = 100$ мкФ, $\omega = 10^3$ рад/с.



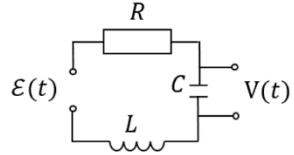
Ответ: $M = 5$ мГн.

T15. (2018-6B) На рисунке представлен RC-фильтр. Известно, что при подключении к генератору синусоидального сигнала с частотой $f_0 = 1,0$ кГц напряжение на его выходе опережает входное на $\pi/3$ рад. 1) Найти ёмкость конденсатора, если известно, что $R = 100$ Ом. 2) На вход этого фильтра подается напряжение $V_{\text{вх}} = V_0 \cdot \cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t)$, где $f_1 = 1,0$ МГц, $f_2 = f_1 + 15$ Гц, а $V_0 = 10$ В. Определить среднюю мощность, выделяемую на сопротивлении.



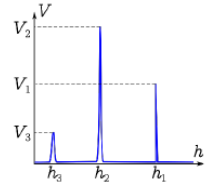
Ответ: 1) $C \approx 0,92$ мкФ; 2) $P = 125$ мВт.

T16. (2019-5A) Вынужденные колебания напряжения на конденсаторе высокодобротного колебательного контура возбуждаются внешней ЭДС $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$, где частота модуляции $\Omega = \omega_0/2$, $m < 1$. При резонансной частоте контура $\omega_p = \omega_0/2$ оказалось, что две гармоники из спектра колебаний напряжения на конденсаторе $V(t)$ имеют одинаковые амплитуды. Определите глубину модуляции m , если добротность контура $Q = 25$.



Ответ: $m = \frac{2}{3Q} = \frac{2}{75}$.

T17. (2020-1Б) Вынужденные колебания в высокодобротном RLC -контуре возбуждаются последовательно включённой внешней ЭДС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$ с законом фазовой модуляции $\varphi(t) = m \cos \Omega t$, где $m = \frac{1}{9}$ и $\Omega = \frac{4}{5} \omega_0$. Зависимость амплитуды напряжения V на конденсаторе от его ёмкости C схематично показана на рисунке. Найдите отношения V_2/V_1 и V_3/V_1 .



Ответ: $\frac{V_2}{V_1} = 10$, $\frac{V_3}{V_1} = 9$.

T18. (2016-6Б) В вакууме распространяются две плоские электромагнитные волны одинаковой частоты и амплитуды: одна вдоль оси x , а другая — вдоль оси y . Вектор \mathbf{E} обеих волн направлен по оси z . Найдите среднее по времени значение вектора плотности потока энергии $\langle \mathbf{S} \rangle$ во всех точках пространства. Укажите плоскости, через которые средний поток энергии максимален.

Ответ: $\langle \vec{S} \rangle = \frac{c}{4\pi} E_0^2 \cos^2 \left[\frac{k}{2} (x - y) \right] (\vec{e}_x + \vec{e}_y)$,

$|\langle \vec{S} \rangle|_{max} = \sqrt{2} \frac{c}{4\pi} E_0^2$ при $y = x + \lambda m$.

T19. (2018-4A) В прямоугольном резонаторе размерами $a \times a \times b$, где $a > b$, с хорошо проводящими стенками две наименьшие резонансные частоты равны $\nu_1 = 10$ ГГц и $\nu_2 = 11$ ГГц соответственно. Найдите следующую разрешенную частоту резонатора.

Ответ: $\nu_3 \approx 13$ ГГц.

T20. Оценить омические потери в медном проводе длиной $L = 1$ м и сечением $S = 4$ мм² при протекании через него синусоидального тока с амплитудой $I_0 = 20$ А и частотой $\nu = 13,56$ МГц (магнитная проницаемость меди $\mu = 0,999912$ ед. СГС). Удельную проводимость меди считать равной $\lambda = 5 \cdot 10^{17}$ с⁻¹.

T21. Оценить относительное уменьшение амплитуды сигнала из-за скин-эффекта в телевизионном коаксиальном кабеле длиной $L = 10$ м на частоте $f = 1$ ГГц (приблизительно верхняя граница дециметрового диапазона). Считать, что потери обусловлены в основном токами в центральном проводнике диаметром $D = 0,6$ мм, а потери в экране малы ввиду его большой площади. Удельная проводимость меди $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м, волновое сопротивление кабеля $\rho = 75$ Ом.

Ответ: $\Delta U/U \sim 0,4$.

T22. Плазма имеет проводимость $\sigma \sim 10^{14}$ с⁻¹. Оценить коэффициент диффузии магнитного поля в плазме и глубину проникновения магнитного поля за время $\tau = 1$ мкс.

Ответ: $D_M \approx 70$ м²/с, $\delta \sim 1$ см.