

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Теория поля
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составили:

А.В. Дорофеев, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент

С.В. Фомичев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

А.А. Зябловский, канд. физ.-мат. наук, доцент

Е.С. Андрианов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Э.Т. Мусаев, phd (к.ф.-м.н.), ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау 23.05.2020

## Аннотация

Программа предназначена для студентов 3 курса. Она включает в себя план лекций, рекомендуемую литературу, сводку основных формул, а также задачи для рассмотрения на семинарах и для самостоятельного решения студентами.

В курсе рассматриваются основы специальной теории относительности и теории электромагнитных полей в свободном пространстве. В первой части курса дается аксиоматика теории относительности, откуда выводятся основные следствия: релятивистское сокращение длины, замедление времени, относительность одновременности, абберация света. Излагаются основы теории тензоров, необходимые для четырехмерного описания релятивистских явлений. Далее рассматривается релятивистская частица в свободном пространстве и в электромагнитном поле. Формулируется теория электромагнитного поля, из действия выводятся уравнения Максвелла как трехмерном, так и в четырехмерном виде. Решается ряд принципиальных задач теории поля: распространение плоских волн, мультипольное разложение в электростатике и магнитостатике, излучение электромагнитных волн в дипольном приближении и релятивистскими зарядами, рассеяние электромагнитных волн.

Курс основывается на общих знаниях математического анализа (теория функций одной и нескольких переменных, вектор-функций, дифференцирование и интегрирование этих функций, векторные дифференциальные операции) и теории дифференциальных уравнений (умение решать основные типы дифференциальных уравнений), и во многом опирается на представления и навыки, привитые студентам кафедрой общей физики (общие знания релятивистской теории и теории электромагнитного поля). Изложенные результаты используются в других курсах теоретической физики: в квантовой механике и статистической физике, а также в ряде курсов по выбору.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам знания необходимые для описания различных физических явлений в области приложений специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроскопической электродинамики, и методы построения соответствующих математических моделей, показать соответствие системы постулатов, положенных в основу теории относительности и классической электродинамики, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять, как адекватность теоретической модели соответствующему физическому явлению, так и её пределы применимости.

### Задачи дисциплины

- Изучение математического аппарата специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроскопической электродинамики;
- изучение методов решения задач релятивистской кинематики и динамики и классической микроскопической электродинамики;
- изучение методов описания систем заряженных частиц и создаваемых ими электромагнитных полей, в том числе систем взаимодействующих с внешним электромагнитным полем;
- овладение студентами методов релятивистской механики и классической микроскопической электродинамики для описания свойств различных конкретных физических систем.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных

ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- Постулаты и принципы специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроскопической электродинамики, методы описания релятивистских частиц и систем заряженных частиц, а также электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами и взаимодействующего с ними;
- основные уравнения и свойства электромагнитного поля;
- основные методы математического аппарата специальной теории относительности, релятивистской механики и классической электродинамики: трехмерную тензорную алгебру, векторный анализ и аппарат четырехмерных векторов и тензоров;
- основные методы решения задач релятивистской кинематики и динамики и классической микроскопической электродинамики, включая движение заряженных частиц в электромагнитном поле и создание поля системами заряженных частиц;
- методы и способы описания излучения электромагнитных волн системами заряженных частиц;
- методы описания рассеяния электромагнитных волн заряженными частицами.

уметь:

- Пользоваться аппаратом трехмерного векторного анализа;
- пользоваться аппаратом трехмерной тензорной алгебры;
- пользоваться аппаратом четырехмерных векторов и тензоров;
- решать кинематические задачи с участием релятивистских частиц;
- решать задачи о движении релятивистских заряженных частиц в заданном внешнем электромагнитном поле различной конфигурации;
- применять метод мультипольных моментов для решения задач электростатики и магнитостатики;
- решать задачи про излучение электромагнитных волн системами нерелятивистски движущихся заряженных частиц, используя мультипольные моменты;
- решать задачи про излучение электромагнитных волн релятивистски движущимися заряженными частицами.

владеть:

- Основными методами математического аппарата специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроскопической электродинамики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами систем заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем, так и со свойствами самого электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Принцип относительности	2	2		3

2	Четырехмерное псевдоевклидово пространство Минковского.	2	2		4
3	Описание движения свободной релятивистской точечной частицы.	4	4		3
4	Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем.	2	2		4
5	Тензор электромагнитного поля.	2	2		3
6	Движение заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле.	4	2		4
7	Уравнения электромагнитного поля.		2		3
8	Энергия и импульс электромагнитного поля. Уравнения для потенциалов.		2		4
9	Электро- и магнитостатика.	2	2		3
10	Свободное поле. Неоднородные волновые уравнения.	2	2		4
11	Запаздывающие потенциалы. Излучение в дипольном приближении.	4	2		3
12	Излучение движущихся зарядов вне дипольного приближения.	4	2		4
13	Реакция излучения и рассеяние электромагнитных волн.	2	4		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 5 (Осенний)

##### 1. Принцип относительности

Однородность пространства и однородность времени, изотропия пространства, инерциальные системы отсчёта. Ньютонова механика и принцип относительности Галилея. Потенциальность сил и дальное действие. Постоянство скорости света. Несовместимость конечности скорости распространения взаимодействий с принципом относительности Галилея. Принцип относительности Эйнштейна. Изменение представлений о свойствах пространства и времени в результате опытов со светом. Преобразования Лоренца, их вывод и следствия из них. Относительность одновременности и промежутков времени. Мысленные опыты по измерению длин, промежутков времени и синхронизации часов. Сокращение длин, замедление времени и собственное время. Релятивистское сложение скоростей и преобразование направлений. Эффект прожектора. Аберрация света.

##### 2. Четырехмерное псевдоевклидово пространство Минковского.

Декартовы координаты. Мировая точка (событие) и мировая линия. Интервалы между событиями как мера расстояния в пространстве Минковского. Пространственно-подобные, временно-подобные и нулевые интервалы. Световой конус. Принцип причинности. Инвариантность интервала и геометрическая интерпретация преобразований Лоренца. Аффинные преобразования. Понятие 4-вектора. Скалярное произведение. Метрика четырехмерного пространства. Контра- и ковариантное представление. 4-градиент и 4-дивергенция. 4-векторы скорости и ускорения. Ковариантность физических законов относительно преобразования Лоренца как переформулировка принципа относительности. Векторы и тензоры в трехмерном пространстве.

##### 3. Описание движения свободной релятивистской точечной частицы.

Понятие точечной элементарной частицы, её 4-координата и мировая линия. Ковариантная формулировка принципа наименьшего действия в пространстве Минковского, функция Лагранжа свободной частицы. Принцип соответствия. Энергия, импульс и гамильтониан свободной релятивистской частицы. 4-вектор импульса. Частицы с нулевой массой. Ультрарелятивистское движение. Закон сохранения 4-импульса замкнутой системы как следствие однородности пространства-времени. Лабораторная система и система центра масс. Применение закона сохранения 4-импульса для описания упругих столкновений частиц. Эффективная масса системы. Неупругие столкновения и распады с образованием новых частиц. Дефект массы для составных систем. Порог реакции. Волновой 4-вектор. Эффект Доплера.

#### 4. Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем.

Понятия заряда точечной элементарной частицы и электромагнитного поля. 4-вектор потенциал электромагнитного поля. Действие и лагранжиан для точечной частицы во внешнем векторном поле. Энергия, обобщенный и кинематический импульсы. Уравнение Лагранжа и сила Лоренца. Функция Гамильтона. Градиентная (калибровочная) инвариантность. Ковариантный вывод уравнения движения заряженной частицы в четырехмерном виде. 4-вектор силы.

#### 5. Тензор электромагнитного поля.

Понятие тензора. 4-тензоры и их свойства. Абсолютно антисимметричный и метрический тензоры. Инвариантность 4-объема. Электрическое и магнитное поля как компоненты антисимметричного 4-тензора электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для потенциалов ( $\varphi$ ,  $A$ ) и напряженностей ( $E$ ,  $H$ ) из одной системы отсчета в другую. Инварианты поля и их следствия. Дуальный тензор поля.

#### 6. Движение заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле.

Движение заряженной частицы в постоянных однородных электрическом и магнитном полях. Дрейф в скрещенных полях. Средняя сила и средний момент силы для системы частиц во внешних слабонеоднородных электрическом и магнитном полях. Электрический и магнитный дипольные моменты. Энергия магнитного момента во внешнем магнитном поле. Гиромагнитное отношение. Прецессия магнитного момента во внешнем поле и теорема Лармора. Адиабатический инвариант и движение заряженной частицы в слабопеременном магнитном поле. Движение ведущего центра орбиты и поперечный дрейф заряженной частицы в слабонеоднородном магнитном поле. Магнитные зеркала и примеры осуществления их в природе и технике.

#### 7. Уравнения электромагнитного поля.

Уравнения Максвелла как обобщение опытных фактов и их вывод из первых принципов. Первая пара уравнений Максвелла. Распределенные заряды. Переход от точечных зарядов к распределенной системе зарядов и токов при помощи  $\delta$ -функции. Плотности заряда и тока системы точечных частиц. Закон сохранения электрического заряда и 3 уравнение непрерывности. 4-вектор плотности тока. Функционал действия и плотность функции Лагранжа для электромагнитного поля. Получение второй пары уравнений Максвелла из вариационного принципа. Уравнения Максвелла в трехмерной и четырехмерной формах. Единственность решений уравнений Максвелла. Свойства симметрии уравнений Максвелла.

#### 8. Энергия и импульс электромагнитного поля. Уравнения для потенциалов.

Плотность энергии поля и вектор плотности потока энергии (вектор Пойнтинга). Баланс энергии системы заряженных частиц и электромагнитного поля. Плотность импульса поля, тензор плотности потока импульса и тензор напряжений Максвелла. Баланс импульса системы заряженных частиц и электромагнитного поля. Плотность силы Лоренца. 4-тензор энергии-импульса. Калибровочная инвариантность уравнений электродинамики. Уравнения для потенциалов. Вид уравнений для 4-потенциалов в кулоновской калибровке и в калибровке Лоренца. Оператор Д'Аламбера. Основные уравнения электро-и магнитостатики. Электростатический потенциал точечного заряда.

#### 9. Электро- и магнитостатика.

Уравнение Пуассона и его решение. Функция Грина уравнения Пуассона. Электрическое поле системы неподвижных зарядов на больших расстояниях. Мультипольное разложение потенциалов. Электрический квадрупольный момент. Энергия электростатического взаимодействия и устранение самодействия точечных частиц. Выражение энергии системы зарядов во внешнем слабонеоднородном электрическом поле через мультипольные моменты. Решение уравнения Пуассона для векторного потенциала стационарной системы токов. Закон Био–Савара. Магнитное поле усредненного по времени стационарного движения зарядов на больших расстояниях.

#### 10. Свободное поле. Неоднородные волновые уравнения.

Однородные волновые уравнения для потенциалов свободного электромагнитного поля в пустом пространстве и их решения. Плоские монохроматические электромагнитные волны и их поляризация. Линейная, круговая и эллиптическая поляризации. Усреднение по времени и по поляризации. Решение неоднородных волновых уравнений с помощью функции Грина. Функция Грина в фурье-представлении по времени. Функция Грина волнового уравнения и принцип причинности. Определение запаздывающей функции Грина.

#### 11. Запаздывающие потенциалы. Излучение в дипольном приближении.

Запаздывающая и опережающая функции Грина волнового уравнения. Запаздывающие потенциалы. Дипольное приближение, его физический смысл и критерии применимости. Потенциалы поля излучения в дипольном приближении. Поля  $E$  и  $H$  в волновой и квазистационарной зонах. Интенсивность излучения в дипольном приближении. Угловое и спектральное распределения дипольного излучения и его поляризация.

#### 12. Излучение движущихся зарядов вне дипольного приближения.

Поле в волновой зоне колеблющихся магнитного диполя и электрического квадруполь. Интенсивность излучения магнитного диполя и электрического квадруполь. Излучение релятивистски-движущихся частиц. Потенциалы Лиенара–Вихерта. Формула Лармора. Синхротронное излучение и его полная интенсивность. Оценка длины формирования, углового и спектрального распределения синхротронного излучения в ультрарелятивистском случае.

#### 13. Реакция излучения и рассеяние электромагнитных волн.

Сила радиационного трения. Затухание, вызываемое излучением. Естественная (классическая) ширина спектральной линии. Пределы применимости классической электродинамики на малых расстояниях и в сильных полях. Постановка задачи о рассеянии. Дифференциальное и полное сечение рассеяния монохроматической волны на заряде. Рассеяние света на свободном электроны. Томсоновское сечение рассеяния и классический радиус электрона. Поляризация рассеянного света. Рассеяние электромагнитных волн на связанном электроны как на осцилляторе с затуханием. Резонансное рассеяние.

Стандартная аудитория, желательно с мультимедийным проектором.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.
2. Задачи по теоретической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Белоусов, С. Н. Бурмистров, А. И. Тернов .— Долгопрудный : Интеллект, 2013 .— 584 с.
3. Батыгин, В. В. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин. - 4-е изд., перераб. - СПб. ; М. : Лань, 2010.

### Дополнительная литература

1. Краткий курс теоретической физики [Текст]. Кн. 1 : Механика. Электродинамика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Наука, 1969 .— 271 с.
2. Классическая электродинамика [Текст] : учеб. пособие для вузов / М. М. Бредов, В. В. Румянцев, И. Н. Топтыгин ; под ред. И. Н. Топтыгина .— СПб. : Лань, 2003 .— 400 с.
3. Катехизис. Руководство по математике для начинающих изучать теоретическую физику [Текст] / Ю. М. Белоусов, В. П. Кузнецов, В. П. Смилга ; М-во образования и науки РФ, МФТИ - М.Изд-во МФТИ,2005
4. Тензорное исчисление [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. В. Корнев ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 1990, 1996, 2000 .— 240 с.
5. Практическая математика. Руководство для начинающих изучать теоретическую физику [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Ю. М. Белоусов, В. П. Кузнецов, В. П. Смилга .— 2-е изд. — Долгопрудный : Интеллект, 2009 .— 176 с.
6. Квантовая нанооптика [Текст] : [учебное пособие] / Е. С. Андрианов [и др.] .— Долгопрудный : Изд. дом "Интеллект", 2015 .— 368 с.
7. Алексеев, А. И. Сборник задач по классической электродинамике [Электронный ресурс] : уч. пособие для вузов / А. И. Алексеев. - СПб. ; М. : Лань, 2008.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Ссылка страницы кафедры на официальном сайте университета  
[http://mipt.ru/education/chair/theoretical\\_physics//](http://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics//)

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Для выполнения учебной программы необходимо посещать лекции, семинары и использовать указанную литературу.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	<u>3</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Экзамен

**Разработчики:**

А.В. Дорофеев, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент  
С.В. Фомичев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент  
А.А. Зябловский, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Е.С. Андрианов, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Э.Т. Мусаев, phd (к.ф.-м.н.), ассистент



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теория поля» обучающийся должен:

### знать:

- Постулаты и принципы специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроэлектродинамики, методы описания релятивистских частиц и систем заряженных частиц, а также электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами и взаимодействующего с ними;
- основные уравнения и свойства электромагнитного поля;
- основные методы математического аппарата специальной теории относительности, релятивистской механики и классической электродинамики: трехмерную тензорную алгебру, векторный анализ и аппарат четырехмерных векторов и тензоров;
- основные методы решения задач релятивистской кинематики и динамики и классической микроэлектродинамики, включая движение заряженных частиц в электромагнитном поле и создание поля системами заряженных частиц;
- методы и способы описания излучения электромагнитных волн системами заряженных частиц;
- методы описания рассеяния электромагнитных волн заряженными частицами.

### уметь:

- Пользоваться аппаратом трехмерного векторного анализа;
- пользоваться аппаратом трехмерной тензорной алгебры;
- пользоваться аппаратом четырехмерных векторов и тензоров;
- решать кинематические задачи с участием релятивистских частиц;
- решать задачи о движении релятивистских заряженных частиц в заданном внешнем электромагнитном поле различной конфигурации;
- применять метод мультипольных моментов для решения задач электростатики и магнитостатики;
- решать задачи про излучение электромагнитных волн системами нерелятивистски движущихся заряженных частиц, используя мультипольные моменты;
- решать задачи про излучение электромагнитных волн релятивистски движущимися заряженными частицами.

### владеть:

- Основными методами математического аппарата специальной теории относительности, релятивистской механики и классической микроэлектродинамики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами систем заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем, так и со свойствами самого электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Допуск к экзамену проводится преподавателем по итогам работы студента в семестре в случае успешного освоения дисциплины. В случае если студент не усвоил дисциплину, и результаты его работы в семестре оказались неудовлетворительными, проводится дополнительный опрос на предмет выявления знаний. Дополнительный опрос проводится в виде тестов, содержание которых полностью соответствует содержанию тестовых опросов студентов в течение семестра.

Оценка уровня студентов для допуска к экзамену складывается из оценок трех позиций: знаний, умений и навыков.

Знания студентов оцениваются в результате проведения еженедельного опроса пройденного материала. Опрос проводится в письменной форме в виде тестовых вопросов. Пример тестовых вопросов приведен ниже.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашних заданий. Всего студентам предлагается два домашних задания. Задание содержит три типа задач и упражнений. Типовые задачи и упражнения разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Кроме того, студентам предлагаются специально помеченные задачи повышенной сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Навыки студентов проверяются в результате решения контрольных работ, которые проводятся во время аудиторных занятий. Задачи аналогичны типовым задачам, включенным в домашние задания, как рассматриваемым на семинарских (практических) занятиях, так и предлагаемым для самостоятельного решения. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

Вопросы, включенные в тестовые опросы, охватывают основные понятия, рассмотренные на предыдущей лекции.

Пример вопросов тестового задания:

1. Как определяется дуальный тензор электромагнитного поля? Как он выражается через поля **E** и **H**?
2. Какие инварианты можно составить из тензора электромагнитного поля? Запишите их в четырехмерной и трехмерной формах.
3. При каких условиях выбором подходящей системы отсчета можно занулить магнитное поле (в заданной точке)? Чему равна скорость этой системы отсчета относительно исходной системы отсчета, в которой в этой точке имеются поля **E** и **H**?
4. При каких условиях выбором подходящей системы отсчета можно занулить электрическое поле (в заданной точке)? Чему равна скорость этой системы отсчета относительно исходной системы отсчета, в которой в этой точке имеются поля **E** и **H**?
5. Чему равны частота вращения и радиус орбиты при движении релятивистской заряженной частицы с заданной энергией в постоянном во времени и однородном магнитном поле?
6. Чему равна скорость дрейфа нерелятивистской заряженной частицы в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях?
7. Дайте определение электрического дипольного момента системы зарядов.

8. Запишите силу и момент силы, действующие на нейтральную систему заряженных частиц в слабонеоднородном электрическом поле.
9. Дайте определение магнитного момента системы зарядов, совершающих квазистационарное финитное движение.
10. Запишите среднюю силу и средний момент силы, действующие на систему заряженных частиц в слабонеоднородном магнитном поле.

Пример контрольной работы:

**Задача 1** (8). Пользуясь *тензорной* алгеброй, вычислить  $\text{rot} \left[ \vec{a} \times \frac{\vec{r}}{r^2} \right]$ , где  $\vec{a}$  – постоянный вектор и  $\vec{r}$  – радиус-вектор.

**Задача 2** (7). Определить пороговую энергию реакции  $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$  в системе отсчета, где один из начальных протонов покоится.

**Задача 3** (10). Релятивистская частица движется в параллельных и постоянных электрическом и магнитном полях  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , причем  $(\mathbf{E} \parallel \mathbf{H} \parallel \text{оси } y)$ . При  $t = 0$  частица находилась в начале координат, обладая импульсом  $\mathbf{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z})$ . Выписать тензор электромагнитного поля в рассматриваемой геометрии и, пользуясь ковариантным уравнением движения частицы, определить зависимость  $t(\tau)$  времени  $t$  в лабораторной системе отсчета от собственного времени частицы  $\tau$ , считая  $t(0) = 0$ .

**Задача 4** (25). В системе  $K'$  имеется однородное электрическое поле  $\vec{E}' = (E, 0, 0)$ , направленное по оси  $x'$ , описываемое скалярным и векторным потенциалами

$\phi'(t', x', y', z') = 0$ ,  $\vec{A}'(t', x', y', z') = (-cEt', 0, 0)$ . Система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $V$  вдоль оси  $x$ , совпадающей с осью  $x'$ . Определить

(а) (6) потенциалы  $\phi(t, x, y, z)$  и  $\vec{A}(t, x, y, z)$  в системе  $K$  через переменные  $(t, x, y, z)$  системы  $K$ ,

(b) (7) электрическое и магнитное поле в системе  $K$ ,

(с) (12) а также показать, что штрихованные  $[\phi'(t, x, y, z) = 0, \vec{A}'(t, x, y, z) =$

$= (-cEt, 0, 0)]$  и нештрихованные  $[\phi(t, x, y, z) \text{ и } \vec{A}(t, x, y, z)]$  потенциалы, рассматриваемые теперь как функции одних и тех же переменных  $(t, x, y, z)$  единой системы отсчета, связаны между собой калибровочным преобразованием, и найти функцию  $\chi(t, x, y, z)$  калибровочного преобразования от штрихованных потенциалов к нештрихованным.

Каждая задача контрольной работы оценена в определенную сумму баллов в зависимости от сложности и уровня (знания, умения и навыки). Полная сумма баллов примера контрольной работы равна 50.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре могут зависеть от лекционного потока и определяются лектором. Общим остается следующее правило.

В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

Оценка за работу в семестре выставляется в соответствии со схемой, приведенной в следующем разделе. Студент допускается к экзамену при условии сдачи двух заданий и оценки за работу в семестре равной или большей 3 (по десятибалльной шкале)

Итоговая экзаменационная оценка выставляется студенту с учетом оценки его работы в семестре. Экзамен проводится в устной форме. Экзаменационные билеты могут содержать наряду с теоретическими вопросами также и задачи. Форма билета определяется лектором и зависит от лекционного потока. Типовые задачи могут даваться также и в форме дополнительных вопросов к билету. Ответ студента оценивается по 10-балльной шкале.

Типичная форма билета содержит 3 теоретических вопроса. Пример типичной формы билета из трех вопросов приведен ниже:

1. Тензор электромагнитного поля. Инварианты поля и их следствия. Дуальный тензор.
2. Баланс энергии системы заряженных частиц и электромагнитного поля. Плотность и поток энергии электромагнитного поля.
3. Сила радиационного трения. Пределы применимости классической электродинамики на малых расстояниях и в сильных полях.

#### 4. Критерии оценивания

##### 4а. Критерии оценивания (оценка за работу в семестре)

Оценка	Набранные баллы
отлично (10)	более 90%
отлично (9)	от 80% до 90% включительно
хорошо (8)	от 70% до 80% включительно
хорошо (7)	от 60% до 70% включительно
хорошо (6)	от 50% до 60% включительно
удовлетворительно (5)	от 40% до 50% включительно
удовлетворительно (4)	от 30% до 40% включительно
удовлетворительно (3)	от 20% до 30% включительно
неудовлетворительно (2)	Не получена удовлетворительная оценка в период зачетной сессии. Требуется дополнительное тестирование

Студенты, получившие за работу в семестре к началу экзаменационной сессии оценку «неудовлетворительно» (менее 20% усвоения материала), или не сдавшие оба задания, считаются не усвоившими материал и не выполнившими задания курса, поэтому к экзамену не допускаются.

##### 4б. Критерии оценивания (экзамен)

Итоговая оценка на экзамене выставляется в соответствии со схемой:

Оценка	Баллы	Критерии
Отлично	10	10 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8. 9 баллов за экзамен и 10 баллов за работу в семестре
	9	9 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8.
	8	8 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 6. 7 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре

Хорошо	7	7 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 6 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре
	6	6 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 5 баллов за экзамен и более 7 баллов за работу в семестре
	5	5 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
удовлетворительно	4	4 балла за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
	3	3 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
неудовлетворительно	2	2 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
	1	1 балл за экзамен и оценка за работу в семестре 3.

### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Студенты, допущенные к экзамену, отвечают на вопросы билета, имея возможность на подготовку не менее 1 часа. Ответы представляются в письменном виде, по которым проводится устное собеседование.

Оценка за ответ на билет выставляется в соответствии со следующим критериями:

Студент, не ответивший правильно ни на один вопрос, получает оценку неудовлетворительно (1 или 2)

Студент, ответивший правильно

только на 1 вопрос, получает оценку «удовлетворительно» (3 или 4 балла), в зависимости от полноты правильного ответа и ответов на другие дополнительные вопросы;

на 2 вопроса, получает оценку «хорошо» (5, 6 или 7 баллов), в зависимости от полноты правильных ответов и ответов на другие вопросы;

на все 3 вопроса, получает 8 баллов («отлично») и возможность ответа на дополнительные вопросы повышенной сложности для получения оценки «отлично» с баллами 9 или 10.

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий. Учебной, учебно-методической и справочной литературой пользоваться во время экзамена не допускается. Во время экзамена должны быть также выключены мобильные телефоны.

Перед началом экзаменационной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи экзамена. Формулировки вопросов в билетах студенты узнают во время консультаций.

Студенты, получившие итоговую оценку «отлично» (10) и решившие и защитившие задачи повышенной сложности домашнего задания, могут получить дополнительные зачетные единицы по курсу.