

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)  
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника и Положением «Об УМКД РАУ».

**УТВЕРЖДАЮ:**

 Директор  
**А.А. Саркисян**  
**«21» июля 2023г.**

**Инженерно-физический институт**

**Кафедра: Общей физики и квантовых наноструктур**

*Автор(ы): д.ф.-м.н., доцент Акопян Тигран Степанович*

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**

**Дисциплина: Б1.О.11 «Теоретическая механика и электродинамика»**

**Направление: 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»**

## **1. Аннотация**

1.1. **Выписка из ФГОС ВО РФ по минимальным требованиям к дисциплине** – данный курс является специальным и не включен в ФГОС ВО РФ.

1.2. Программа разделов «Теоретическая механика и Электродинамика» предназначена для подготовки студентов физико-технических специальностей ВУЗ-ов, для которых курс «Теоретическая механика» представляет собой первый из разделов дисциплины «Теоретическая механика и Электродинамика». В нем вводятся многие из основных понятий и методов, которые находят затем свое дальнейшее развитие в последующих разделах теоретической физики: Квантовая механика, Статистическая физика.

1.3. Для прохождения данного курса студент должен:

**Знать:** математический анализ, аналитическую геометрия и высшую алгебру, основы векторного и тензорного анализа, дифференциальные и интегральные уравнения, методы математической физики, основные принципы классической механики в рамках курса Физика I, молекулярной физики, электромагнетизма и оптики.

**Уметь:** применять эти знания при решении задач.

**Владеть:** методами физического мышления.

## ***2. Содержание***

2.1. Цели и задачи дисциплины.

Цели изучения раздела «Теоретическая механика и Электродинамика» – на базе сравнительно простых физических систем сформировать у будущих физиков представления об основных идеях и методах теоретической физики, научить студентов применять эти методы к решению задач о поведении сложных механических систем, электромагнитных полей и частиц в таких полях.

Задачи раздела «Теоретическая механика и Электродинамика» – внести вклад в подготовку современного специалиста, способного к пониманию и освоению сложной и быстроизменяющейся науки, развить у него творческую интуицию и необходимый кругозор.

2.2. *После прохождения дисциплины студент должен:*

**Знать:** Лагранжеву и гамильтонову формулировки уравнений движения и основных уравнений электродинамики, электродинамику различных сред – диэлектриков, металлов.

**Уметь:** находить функцию Лагранжа для частиц в различных полях, в том числе – в электромагнитном поле, строить функцию Гамильтона при заданной функции Лагранжа, решать однородное и неоднородное волновое уравнение, вычислять спектр излучения различных классических (неквантовых) систем.

**Владеть:** методами анализа и моделирования различных неквантовых физических систем.

2.3 *Взаимосвязь с другими дисциплинами специальности:*

Механика и молекулярная физика, Электричество и магнетизм, Оптика, Атомная физика, Квантовая механика, Математический анализ, Аналитическая геометрия и линейная алгебра, Методы математической физики.

### **3. Объем дисциплины и виды учебной работы**

<b>Виды учебной работы</b>	<b>Всего, в акад. часах</b>
<b>1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:</b>	<b>216 / 6 кр.</b>
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	<b>102</b>
1.1.1. Лекции	68
1.1.2. Практические занятия, в т. ч.	34
1.1.2.1. Контрольные работы	
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	<b>60</b>
1.2.1. Подготовка к экзаменам	
1.2.1.1. Письменные домашние задания	
1.3. Консультации	
Итоговый контроль ( <b>экзамен</b> , зачет, диф. зачет - указать)	<b>Экзамен 54</b>

#### 4. Распределение весов по модулям и формам контроля

Веса и формы контролей	Веса форм текущих контролей в результирующей оценке текущего контроля			Веса форм промежуточных контролей и результирующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Веса итоговых оценок промежуточных контролей в результирующей оценке промежуточного контроля	Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
<b>Вид учебной работы/контроля</b>								
<b>Контрольная работа</b>				0	0,5	0,5		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
<b>Письменные домашние задания</b>	0	0,5	0,5					
Эссе								
<b>Устный опрос</b>	0	0,5	0,5					
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках соответствующих промежуточных контролей				0	0,5	0,5		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0,5	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей т.д.							0,5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0,4
<b>Экзамен/зачет (оценка итогового контроля)</b>								0,6
	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

## 5.1 Тематический план и трудоемкости аудиторных занятий

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции(ак. часов)	Практ. занятия (ак. часов)	Семина-ры (ак. часов)	Лабор. (ак. часов)	Другие виды занятий (ак. часов)
1	2=3 +4+ 5+6 +7	3	4	5	6	7
<b>МОДУЛЬ 1. МЕХАНИКА</b>						
<b>Введение</b>						
<b>Раздел 1. Лагранжева механика</b>	<b>17</b>	<b>11</b>	<b>6</b>			
Тема 1. Обобщенные координаты и скорости. Уравнения Лагранжа	5	3	2			
Тема 2. Законы сохранения.	2	2				
Тема 3. Применения законов сохранения.	4	2	2			
Тема 4. Принцип наименьшего действия.	2	2				
Тема 5. Система двух частиц.	1	1				
Тема 6. Система центра масс.	3	1	2			
<b>Раздел 2. Гамильтонова механика.</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>4</b>			
Тема 7. Уравнения Гамильтона.	3	3				
Тема 8. Применения уравнений Гамильтона.	5	3	2			
Тема 9. Уравнение Гамильтона – Якоби.	3	3				
Тема 10. Малые колебания.	4	2	2			
<b>МОДУЛЬ 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА</b>						
<b>Раздел 3. Математический аппарат классической электродинамики.</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>10</b>			
Тема 11. Основные теоремы векторного анализа.	5	3	2			
Тема 12. Электромагнитное поле и заряды в вакууме.	2	2				
Тема 13. Потенциалы электромагнитного поля.	5	3	2			
Тема 14. Волновое уравнение.	5	3	2			
Тема 15. Мультипольное разложение.	4	2	2			
Тема 16. Плотность заряда в случае точечной частицы.	4	2	2			
Тема 17. Лоренц-инвариантность уравнений Максвелла.	2	2				
<b>Раздел 4. Заряд в электромагнитном поле.</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>			
Тема 18. Уравнения движения заряда в электромагнитном поле.	4	4	2			
<b>Раздел 5. Проблема излучения.</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>4</b>			
Тема 19. Электромагнитное поле на больших расстояниях от источника.	2	2				
Тема 20. Дипольное излучение.	4	2	2			
Тема 21. Сила реакции излучения.	2	2				
Тема 22. Рассеяние и поглощение излучения осциллятором.	4	2	2			
Тема 23. Рассеяние и поглощение излучения свободным электроном.	2	2				
<b>Раздел 6. Электромагнитное поле в среде.</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>8</b>			
Тема 24. Основные величины, характеризующие поле в немагнитной среде.	2	2				
Тема 25. Граничные задачи при наличии проводников.	5	3	2			
Тема 26. Полиномы Лежандра.	4	2	2			
Тема 27. Функции Бесселя.	3	2	1			
Тема 28. Граничные задачи при наличии диэлектриков.	4	2	2			

Тема 29. Диэлектрическая сфера в постоянном однородном электрическом поле.	3	2	1			
Тема 30. Излучение зарядов при взаимодействии со средой.	2	2				
ИТОГО	102	68	34			

## **5.2 Содержание разделов и тем дисциплины**

### **Раздел 1. Механика**

*Тема 1. Обобщенные координаты и скорости.* Число степеней свободы системы частиц при наличии ограничений на движение. Введение обобщенных координат и скоростей. Переход к обобщенным координатам и скоростям в уравнениях второго закона Ньютона для системы материальных точек, уравнения Лагранжа. Обобщенный импульс. Кинетическая энергия частицы в цилиндрических и сферических координатах. Вывод уравнений Лагранжа для двойного плоского маятника.

*Тема 2. Законы сохранения.* Физический и математический смысл законов сохранения: постоянство некоторых физических величин в процессе движения системы и понижение порядка дифференциальных уравнений. Закон сохранения обобщенного импульса системы, пример: сохранение момента импульса при движении в центральном поле. Закон сохранения энергии при движении во внешнем поле, не зависящем от времени. Принцип относительности Галилея. Законы сохранения импульса и момента импульса системы как следствия однородности и изотропности пространства.

*Тема 3. Применения законов сохранения.* Одномерное движение в потенциальных полях различного вида, финитное движение, точки поворота, формула периода движения; инфинитное движение. Движение в центральном поле, эффективная потенциальная энергия. Уравнение траектории. Кеплерова задача, связь с задачей о гармоническом осцилляторе.

*Тема 4. Принцип наименьшего действия.* Понятие функционала и вариации. Действие как функционал траектории. Уравнения Лагранжа как следствие требования экстремальности действия.

*Тема 5. Система двух частиц.* Уравнения движения системы двух частиц, взаимодействующих центральной силой. Сведение к уравнению движения одной частицы с помощью третьего закона Ньютона, приведенная масса. Рассмотрение предельного случая одной тяжелой и одной легкой частицы.

*Тема 6. Система центра масс.* Уравнения движения системы материальных точек. Представление движения каждой частицы в виде суперпозиции ее движения относительно центра масс системы и движения центра масс относительно начала координат. Представление полной энергии системы в виде суммы трех членов: кинетической энергии движения всех частиц относительно центра масс, кинетической энергии движения системы как целого и потенциальной энергии взаимодействия частиц. То же самое для момента импульса.

### **Раздел 2. Гамильтонова механика.**

*Тема 7. Уравнения Гамильтона.* Задача сведения системы дифференциальных уравнений второго порядка к системе уравнений вдвое большей размерности первого порядка. Два варианта решения этой задачи в случае уравнений Лагранжа. Преимущество метода Гамильтона. Законы сохранения в гамильтоновой механике.

*Тема 8. Применения уравнений Гамильтона.* Понятие о приближенных законах сохранения и их роли в физике. Адиабатический инвариант, пример: шарик, вращающийся на нити с медленно изменяющейся длиной. Общая формула адиабатического инварианта в случае одномерного периодического движения. Примеры: осциллятор с переменной частотой, электрон в медленно изменяющемся магнитном поле. Понятие фазового пространства и фазовой траектории. Теорема Лиувилля.

*Тема 9. Уравнение Гамильтона – Якоби.* Обобщенный импульс как производная действия по конечной координате вдоль истинной траектории при фиксированной начальной точке. Частная производная действия по времени при движении системы вдоль истинной траектории. Уравнение Гамильтона-Якоби и его роль как связующего звена между квантовой механикой и классической.

*Тема 10. Малые колебания.* Разложение потенциальной энергии системы взаимодействующих частиц в ряд по малым отклонениям от положений равновесия. Представление полной энергии системы в виде суммы двух квадратичных форм: диагональной (кинетическая энергия) и недиагональной (потенциальная энергия). Диагонализация полной энергии. Понятие о нормальных координатах, нормальных колебаниях и собственных частотах. Пример: нормальные колебания молекулы  $\text{CO}_2$ .

### **Раздел 3. Математический аппарат классической электродинамики.**

*Тема 11. Основные теоремы векторного анализа.* Понятие производной по направлению, градиент скалярной функции. Векторный дифференциальный оператор набла. Понятия дивергенции и ротора векторного поля. Потенциальные и вихревые поля. Представление произвольного поля в виде суперпозиции потенциального и вихревого полей. Интегральные теоремы: теорема Гаусса и теорема Стокса.

*Тема 12. Электромагнитное поле и заряды в вакууме.* Уравнения Максвелла в дифференциальной форме, их физический смысл. Число неизвестных функций и число уравнений при заданных зарядах и токах. Уравнение непрерывности как математическая формулировка закона сохранения заряда. Закон сохранения энергии для полей, вектор Пойнтинга.

*Тема 13. Потенциалы электромагнитного поля.* Введение векторного и скалярного потенциалов, преимущество описания поля при помощи потенциалов. Неоднозначность введения потенциалов. Калибровка как метод устранения неоднозначности. Уравнения для потенциалов, их приведение к виду волнового уравнения с помощью лоренцевой калибровки.

*Тема 14. Волновое уравнение.* Частное решение однородного волнового уравнения в виде суперпозиции двух функций с произвольными коэффициентами от модуля радиус-вектора.

Получение более общего решения путем сдвига начала координат. Дальнейшее обобщение решения посредством интегрирования по проекциям сдвига с произвольной весовой функцией. Доказательство того, что полученное таким образом решение удовлетворяет неоднородному волновому решению с весовой функцией в правой части. Определение значений произвольных коэффициентов из требования причинности. Запаздывающие потенциалы.

*Тема 15. Мультипольное разложение.* Разложение кулоновского потенциала системы зарядов по обратным степеням расстояния от системы до точки наблюдения. Дипольный и квадрупольный моменты распределения зарядов, их основные свойства. Условия независимости моментов от выбора начала координат. Производные по времени от дипольного момента. Примеры квадрупольного и октупольного распределений. Моменты сферически симметричного и эллиптически симметричного распределений.

*Тема 16. Плотность заряда в случае точечной частицы. Дельта-функция Дирака.* Необходимость представления о точечной частице как требование теории относительности. Определение дельта-функции через интеграл от произведения дельта-функции на произвольную непрерывную функцию. Простейшие свойства дельта-функции: четность, изменение при преобразовании масштаба, производная от дельта-функции. Дельта-функция как предел некоего распределения. Пример – гауссово распределение со стремящейся к нулю дисперсией. Представление в виде интеграла от функции косинус, когда нижний предел равен нулю, а верхний стремится к бесконечности. Применение дельта-функции в теории непрерывного фурье-преобразования. Трехмерная дельта-функция.

*Тема 17. Лоренц-инвариантность уравнений Максвелла.* Плотность тока и плотность заряда как компоненты 4-вектора. Волновой оператор как инвариант преобразований Лоренца. Векторный и скалярный потенциалы как компоненты 4-вектора. Векторы электрического и магнитного полей как компоненты антисимметричного тензора электромагнитного поля. Преобразования Лоренца для полей.

#### **Раздел 4. Заряд в электромагнитном поле.**

*Тема 18. Уравнения движения заряда в электромагнитном поле.* Лоренц-инвариантная форма уравнений второго закона Ньютона для заряда в электромагнитном поле. Релятивистские выражения для силы Лоренца и силы, действующей на заряд со стороны электрического поля через трехмерные векторы напряженностей полей. Движение заряда в однородном электрическом поле, релятивистский случай. Функция Лагранжа и функция Гамильтона частицы в электромагнитном поле.

#### **Раздел 5. Проблема излучения.**

*Тема 19. Электромагнитное поле на больших расстояниях от источника.* Приближенные выражения для запаздывающих потенциалов на расстояниях, превышающих размеры системы. Три слагаемых в выражении для электрического поля, убывающие обратно пропорционально первой, второй и третьей степени расстояния, вклад этих членов в поток энергии через сферу



бесконечного радиуса. Понятие поля излучения, его отличительные признаки: обратная пропорциональность первой степени расстояния, зависимость от ускорения заряда.

*Тема 20. Дипольное излучение.* Векторный потенциал поля на расстояниях, превышающих длину волны излучения (волновая зона). Напряженность электрического и магнитного полей в волновой зоне, вектор Пойнтинга. Угловая зависимость интенсивности дипольного излучения, его полная мощность.

*Тема 21. Сила реакции излучения.* Торможение ускоренного движения частицы за счет потери энергии на излучение. Определение силы реакции излучения с помощью формулы для мощности дипольного излучения. Непосредственное вычисление силы, действующей на заряд со стороны созданного им самим поля из формул для запаздывающих потенциалов, фундаментальные трудности этого подхода.

*Тема 22. Рассеяние и поглощение излучения осциллятором.* Уравнение вынужденных колебаний заряженного осциллятора с затуханием, его решение. Работа, совершаемая внешним полем над осциллятором в единицу времени, ее зависимость от частоты вынуждающего поля. Частота, при которой поглощение достигает максимума. Мощность рассеиваемого излучения, частота, при которой эта мощность максимальна.

*Тема 23. Рассеяние и поглощение излучения свободным электроном.* Законы сохранения для процесса поглощения фотона свободным электроном. Необходимость наличия третьего тела для допустимости этого процесса. Уравнение движения электрона в поле плоской монохроматической электромагнитной волны. Переход к нерелятивистскому пределу в этом уравнении и его решение. Мощность рассеиваемого излучения и поперечное сечение рассеяния – формула Томсона. Классический радиус электрона.

## **Раздел 6. Электромагнитное поле в среде.**

*Тема 24. Основные величины, характеризующие поле в немагнитной среде.* Вектор поляризованности – дипольный момент единицы объема диэлектрика, его связь с объемной плотностью и поверхностной плотностью связанного заряда. Вектор индукции электрического поля. Условия для электрического и магнитного полей на границе раздела двух сред, следующие из уравнений Максвелла и интегральных теорем.

*Тема 25. Граничные задачи при наличии проводников.* Заряд вблизи плоской границы металл-вакуум. Сущность метода изображений. Поле внутри проводника и вне него. Применение метода изображений к случаю заряда вблизи проводящей заземленной сферы. Поверхности нулевого потенциала системы двух неравных по модулю зарядов. Нахождение координат и величины заряда-изображения. Переход к случаю изолированной сферы.

*Тема 26. Полиномы Лежандра.* Кулоновский потенциал как производящая функция полиномов Лежандра. Вывод рекуррентных соотношений и дифференциального уравнения для полиномов Лежандра, доказательство их ортогональности. Два класса решений уравнения Лапласа в сферических координатах: сингулярные в начале координат и сингулярные на бесконечности.

*Тема 27. Функции Бесселя. Двумерное волновое уравнение в декартовых и в полярных координатах. Разделение переменных и связь между решениями в этих координатных системах. Интегральное представление функций Бесселя целого порядка и получение из него представления в виде ряда. Асимптотика функций Бесселя при больших значениях аргумента.*

*Тема 28. Граничные задачи при наличии диэлектриков. Заряд вблизи плоской границы двух диэлектриков. Уравнение Лапласа в цилиндрических координатах, решение методом разделения переменных. Потенциал точечного заряда в цилиндрических координатах. Решение уравнения Лапласа по обе стороны от границы, граничные условия. Окончательный вид выражений для полей.*

*Тема 29. Диэлектрическая сфера в постоянном однородном электрическом поле. Разложение потенциалов вне сферы и внутри нее по полиномам Лежандра. Уравнения, вытекающие из граничных условий на сфере и их решение. Дипольный момент сферы, напряженность результирующего поля.*

*Тема 30. Излучение зарядов при взаимодействии со средой. Излучение заряда, пересекающего границу раздела двух сред (переходное излучение), причина этого явления. Излучение заряда, движущегося над гофрированной поверхностью металла или диэлектрика (эффект Парселла-Смита), объяснение этого явления. Излучение заряда, равномерно движущегося в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде (черенковское излучение). Интерпретация на основе законов сохранения, и на основе представлений о взаимодействии заряда с атомами среды.*

## **6. Вопросы к экзамену**

1. Обобщенные координаты и скорости.
2. Кинетическая энергия частицы в цилиндрических и сферических координатах.
3. Двойной плоский маятник.
4. Законы сохранения.
5. Движение в центральном поле.
6. Принцип наименьшего действия.
7. Система двух частиц. Приведенная масса.
8. Система центра масс.
9. Связь законов сохранения со свойствами пространства и времени.
10. Принцип относительности Галилея.
11. Уравнения Гамильтона.
12. Адиабатический инвариант.
13. Действие как функция координат.
14. Уравнение Гамильтона Якоби.
15. Малые колебания.

16. Нормальные колебания и собственные частоты.
17. Колебания молекул.
18. Фазовое пространство.
19. Теорема Лиувилля.
20. Основные понятия векторного анализа
21. Уравнения Максвелла
22. Потенциалы электромагнитного поля
23. Решение однородного волнового уравнения
24. Решение неоднородного волнового уравнения
25. Запаздывающие потенциалы
26. Поле системы зарядов на больших расстояниях
27. Закон сохранения энергии в электродинамике
28. Дипольное излучение
29. Мультипольное разложение
30. Общие свойства мультипольных моментов
31. Плотность заряда и плотность тока в случае точечной частицы
32. Сила реакции излучения
33. Резонансные частоты заряженного осциллятора
34. 4-векторы в электродинамике
35. Преобразования Лоренца для полей
36. Уравнение движения заряда в ЭМ поле
37. Движение заряда в электрическом поле
38. Функция Лагранжа и функция Гамильтона частицы в ЭМ поле
39. ЭМ поле в среде
40. Граничные условия для ЭМ поля
41. Точечный заряд вблизи границы вакуум-проводник
42. Заряд вблизи проводящей сферы
43. Полиномы Лежандра и их основные свойства
44. Рекуррентные соотношения для полиномов Лежандра
45. Диэлектрическая сфера в однородном электрическом поле
46. Заряд вблизи границы раздела двух диэлектриков
47. Переходное излучение
48. Эффект Парселла-Смита
49. Излучение Вавилова-Черенкова

## **7. Список Литературы**

**8. Образец экзаменационного билета**

РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ) УНИВЕРСИТЕТ

Инженерно-физический институт (III курс, II семестр).

Направление: Электроника и наноэлектроника

Дисциплина: Теоретическая механика и Электродинамика

Экзаменационный билет №

1. Движение в центральном поле.
2. Закон сохранения энергии в электродинамике.
3. Излучение Вавилова-Черенкова.

Задача.