

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика волновых процессов

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.27 Физика волновых процессов относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	ОПК-1.1: Обладает фундаментальными знаниями в области физики и радиофизики ОПК-1.2: Анализирует физические аспекты теории и возможности ее использования для решения научно-исследовательских задач ОПК-1.3: Решает научно-исследовательские задачи, в том числе в сфере педагогической деятельности	ОПК-1.1: Знать основные понятия и закономерности волновых процессов в различных областях физики (акустике, электродинамике, физике плазмы).  ОПК-1.2: Уметь использовать основные уравнения гидродинамики, теории упругости и электродинамики для решения конкретных задач.  ОПК-1.3: Владеть методами решения задач линейной теории волн.	Собеседование	Экзамен: Контрольные вопросы Задачи
ОПК-2: Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;	ОПК-2.1: Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов ОПК-2.2: Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы ОПК-2.3: Применяет практические навыки радиофизических	ОПК-2.1: Знать возможности современных образовательных и информационных технологий для приобретения знаний в области физики волновых процессов.  ОПК-2.2: Знать возможности современных образовательных и информационных технологий для приобретения знаний в области физики волновых процессов.	Собеседование	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы

	исследований и представления результатов	ОПК-2.3: Знать возможности современных образовательных и информационных технологий для приобретения знаний в области физики волновых процессов.		
--	--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	22
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	12
- КСР	2
<b>самостоятельная работа</b>	<b>36</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Тема 1. Введение	3	2		2	1
Тема 2. Методы решения задач линейной теории волновых процессов	10	2	3	5	5
Тема 3. Волны в жидкостях и газах	14	6	2	8	6
Тема 4. Волны в упругих твердых телах	6	2		2	4
Тема 5. Электромагнитные поля и уравнения Максвелла	10	2	2	4	6
Тема 6. Электромагнитные поля в однородной и изотропной плазме	14	4	3	7	7
Тема 7. Электромагнитные волны в холодной магнитоактивной плазме	13	4	2	6	7

Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	22	12	36	36

### Содержание разделов и тем дисциплины

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме лекционных занятий с возможностью применения технологий интерактивного обучения, а также практических занятий, нацеленных на выработку у студентов навыков решения задач физики волновых процессов. Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях лекционного типа:

- лекции-беседы с возможностью использования мультимедийных средств поддержки образовательного процесса;
- лекции с проблемным изложением учебного материала.

используемые на занятиях практического типа:

- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;
- частично-поисковая деятельность при выполнении методических разработок частей занятия;
- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

На лекциях раскрываются следующие основные темы изучаемого курса

#### Раздел 1. Введение.

Историческая справка о курсе «Физика волновых процессов». Нижегородская школа по радиофизике. Волны вокруг нас - звук, свет и радиоволны; низкочастотные волны в атмосфере и океане, сейсмические волны в Земле; магнитогидродинамические волны в космосе. Физические поля и волны. Перенос волнами энергии и информации (линии связи, пассивная и активная локация). Теория волновых процессов и уравнения математической физики (уравнения потенциала, теплопроводности, волновое уравнение и уравнение Клейна-Гордона). Монохроматические поля. Комплексная форма записи монохроматического поля. Уравнение Гельмгольца. Плоские, цилиндрические и сферические монохроматические волны. Фазовая скорость. Энергетические характеристики волн.

#### Раздел 2. Методы решения задач линейной теории волновых процессов.

Принцип суперпозиции для линейных операторов. Постановка задач линейной теории волн. Задача об излучении заданных источников, расположенных в ограниченной области пространства. Условие излучения Зоммерфельда и принцип предельного поглощения. Применение преобразования Фурье для решения линейных уравнений математической физики. Многократные преобразования Фурье как разложение физических полей по плоским волнам. Дисперсионное уравнение. Начальная задача. Понятие о нормальных волнах в средах. Граничная задача. Функции Грина для основных уравнений математической физики и их связь с преобразованиями Фурье. Групповая скорость.

#### Раздел 3. Волны в жидкостях и газах.

Гипотеза сплошной среды и физические поля в средах. Физические бесконечно малые объемы и интервалы времени. Усреднение по ансамблям, по координатам и по времени. Эргодическая гипотеза. Физико-химические свойства газов, жидкостей, твердых тел и плазмы. Полная

замкнутая система уравнений механики для жидкостей и газов:

уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса для баланса импульсов, закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной форме. Проблема замыкания системы уравнений. Линеаризация уравнений механики жидкостей и газов для малых возмущений параметров среды. Уравнения линейной акустики и гидродинамики.

Излучение звука осциллирующим поршнем и радиально пульсирующей упругой сферой. Интенсивность и мощность излучения. Акустический импеданс излучателя, присоединенная масса и упругость, сопротивление излучения. Поглощение звуковых волн в вязкой теплопроводной среде. Скорость звука по Ньютону и по Лапласу. Волны на поверхности слоя тяжелой несжимаемой жидкости (зыбь, рябь, цунами и ветровые волны). Акустико-гравитационные и внутренние волны в стратифицированной атмосфере.

Раздел 4. Волны в упругих твердых телах.

Объемная и сдвиговая упругость твердых тел. Математическое описание деформации тела. Закон Гука и уравнения механики изотропных упругих тел. Два типа нормальных волн в упругом теле. Землетрясения и сейсмические волны. Взаимодействие и трансформация нормальных волн в неоднородных средах. Поверхностная волна Рэлея.

Раздел 5. Электромагнитные поля и уравнения Максвелла.

Электромагнитные поля  $E$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $D$ . Электрические токи свободных и связанных зарядов - токи проводимости, токи электрической поляризации атомов среды и токи намагничивания в среде. Уравнения Максвелла с полным током в среде и сторонними электрическими токами. Электромагнитные поля и волны в среде с постоянными диэлектрической  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ . Скин-эффект. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Абсолютный комплексный показатель преломления однородной среды.

Раздел 6. Электромагнитные поля в однородной и изотропной плазме.

Введение в физику плазмы. Способы получения плазмы. Квазинейтральность плазмы. Плазма в космическом пространстве, лабораторная плазма. Дебаевское экранирование электрических зарядов в плазме. Радиус Дебая. Определение плазмы. Квазигидродинамическое описание плазмы. Комплексная диэлектрическая проницаемость холодной, изотропной плазмы. Дисперсия волн. Плазменные колебания, ленгмюровская частота. Фазовая и групповая скорость. Затухание из-за соударений. Полное внутреннее отражение и глубина проникновения электромагнитного поля в плазму. Диагностика плазмы.

Раздел 7. Электромагнитные волны в холодной магнитоактивной плазме.

Роль магнитных полей в физике плазмы. Магнитные поля Земли и космических объектов. Тензор электропроводности и диэлектрической проницаемости плазмы. Анизотропия магнитоактивных сред. Обыкновенные и необыкновенные нормальные волны в холодной магнитоактивной плазме без соударений. Показатель преломления этих волн. Показатели преломления и поляризация нормальных волн при их распространении вдоль, поперек и под некоторым углом к направлению внешнего магнитного поля. Эффект Фарадея. Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является экзамен, в ходе которого оценивается уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

Основной акцент воспитательной работы делается на добросовестном, профессиональном выполнении всех учебных заданий. Для закрепления пройденного материала для студентов, обучающихся по направлению Радиопизика, на 4 курсе предусмотрен лабораторный практикум, включающий следующие лабораторные работы по физике волновых процессов:

1. Излучение вертикального электрического диполя вблизи плоской границы раздела двух сред
2. Распространение декаметровых радиоволн в ионосфере

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа студентов направлена на самостоятельное изучение отдельных тем рабочей программы и решение домашних заданий по практике. Цель самостоятельной работы - подготовка современного компетентного специалиста и формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию. Особое место отводится самостоятельной практической проработке студентами отдельных разделов и тем по изучаемой дисциплине, таких как применение преобразования Фурье для решения линейных уравнений теории волн, анализ дисперсионных соотношений, возникающих в задачах о распространении волн различной физической природы. Такой подход вырабатывает у студентов инициативу, стремление к увеличению объема знаний выработке умений и навыков всестороннего овладения способами и приемами физики волновых процессов.

Изучение рекомендованной литературы следует начинать с учебников и учебных пособий, затем переходить к научным изданиям – монографиям и статьям в научных журналах, в том числе и электронным. Конспектирование – одна из основных форм самостоятельного труда, требующая от студента активно работать с учебной литературой и не ограничиваться конспектом лекций. Контроль выступает формой обратной связи и предусматривает оценку успеваемости студентов. Итоговой формой контроля успеваемости студентов по учебной дисциплине «Физика волновых процессов» является экзамен. Бесспорным фактором успешной сдачи экзамена является кропотливая, систематическая работа студента в течение всего периода изучения дисциплины (семестра). В этом случае подготовка к экзамену будет являться концентрированной систематизацией всех полученных знаний по данной дисциплине. Ресурсы Интернет являются одним из альтернативных источников быстрого поиска требуемой информации. Их использование возможно для получения основных и дополнительных сведений по изучаемым материалам. Используются виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах, с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе экзамена по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций. Список контрольных вопросов для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

1. Плоская монохроматическая волна.
2. Волновое уравнение.
3. Фазовая и групповая скорости.
4. Уравнение непрерывности и уравнение Эйлера.
5. Скорость звука. Вектор Умова. Плотность энергии в звуковой волне.
6. Закон Гука.

7. Уравнения Максвелла. Граничные условия.
8. Вектор Пойнтинга. Плотность энергии электромагнитного поля в вакууме.
9. Основные параметры плазмы (плазменная частота и дебаевский радиус).
10. Комплексная диэлектрическая проницаемость холодной изотропной плазмы.
11. Вектор плотности потока энергии.
12. Применение преобразования Фурье для решения линейных уравнений математической физики.
13. Нормальные волны в средах.
14. Тензор внутренних напряжений.
15. Уравнение Навье-Стокса.
16. Линеаризованная система уравнений механики жидкостей и газов. Основные свойства звуковых волн в жидкостях и газах.
17. Уравнение Ламе. Основные свойства упругих волн в твердых телах.
18. Описание электромагнитных полей в сплошных средах. Уравнения Максвелла-Лоренца.
19. Распространение электромагнитных волн в холодной изотропной плазме.
20. Распространение электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:**

1. Плоская монохроматическая волна.
2. Волновое уравнение.
3. Фазовая и групповая скорости.
4. Уравнение непрерывности и уравнение Эйлера.
5. Скорость звука. Вектор Умова. Плотность энергии в звуковой волне.
6. Закон Гука.
7. Уравнения Максвелла. Граничные условия.
8. Вектор Пойнтинга. Плотность энергии электромагнитного поля в вакууме.
9. Основные параметры плазмы (плазменная частота и дебаевский радиус).
10. Комплексная диэлектрическая проницаемость холодной изотропной плазмы.

### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:

1. Вектор плотности потока энергии.
2. Применение преобразования Фурье для решения линейных уравнений математической физики.
3. Нормальные волны в средах.
4. Тензор внутренних напряжений.
5. Уравнение Навье-Стокса.
6. Линеаризованная система уравнений механики жидкостей и газов. Основные свойства звуковых волн в жидкостях и газах.
7. Уравнение Ламе. Основные свойства упругих волн в твердых телах.
8. Описание электромагнитных полей в сплошных средах. Уравнения Максвелла-Лоренца.
9. Распространение электромагнитных волн в холодной изотропной плазме.
10. Распространение электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме.

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий ИЛИ Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше ИЛИ Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%. ИЛИ В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%. ИЛИ Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
не	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50% ИЛИ Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков.	При решении стандартных задач не	Имеется минимальный набор	Продemonстрированы базовые	Продemonстрированы базовые	Продemonстрированы навыки	Продemonстрирован творческий

	Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	подход к решению нестандартных задач
--	--	--	--	---	---	--	--------------------------------------

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Плоская монохроматическая волна.
2. Комплексная форма записи гармонического поля. Уравнение Гельмгольца.
3. Цилиндрические и сферические монохроматические волны.
4. Принцип суперпозиции при решении линейных уравнений математической физики.
5. Постановка задачи об излучении заданных источников, расположенных в ограниченной области пространства. Условие излучения Зоммерфельда и принцип предельного поглощения.

6. Применение преобразования Фурье для решения линейных уравнений математической физики.
7. Начальная и граничная задача.
8. Метод функций Грина.
9. Дисперсионное уравнение. Фазовая и групповая скорости.
10. Физические свойства тел. Потенциал Леннарда-Джонса. Гипотеза сплошной среды.
11. Описание движения сплошной среды в переменных Эйлера и Лагранжа. Полная производная по времени.
12. Уравнение непрерывности в механике жидкости и газа.
13. Основное уравнение механики сплошной среды. Тензор внутренних напряжений.
14. Тензор скоростей деформаций. Теорема Гельмгольца.
15. Уравнение Навье-Стокса.
16. Закон сохранения энергии в вязкой теплопроводящей среде.
17. Полная система уравнений механики жидкостей и газов. Граничные условия.
18. Система уравнений линейной акустики и газодинамики в отсутствие вязкости и теплопроводности. Волновое уравнение. Скорость звука по Лапласу.
19. Поляризация и энергетические характеристики звуковых волн.
20. Звуковые волны в вязкой теплопроводной среде. Изотермическая скорость звука Ньютона.
21. Излучение звука плоским осциллирующим поршнем.
22. Излучение звука радиально пульсирующей упругой сферой: постановка задачи и формулы для полей  $p$  и  $V_r$ .
23. Интенсивность и мощность излучения акустического монополя. Сила реакции излучения звука. Присоединенная масса и сопротивление излучения.

### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

1. Объемная и сдвиговая упругость твердых тел. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона.
2. Математическое описание деформации тела. Вектор смещения и тензор деформации.
3. Обобщенный закон Гука. Однородные деформации.
4. Основные уравнения линейной теории упругости. Волны в изотропном упругом теле.
5. Уравнения Максвелла-Лоренца. Поляризация и намагничивание. Полный ток в среде.
6. Макроскопические электромагнитные поля и уравнения Максвелла. Граничные условия. Закон сохранения энергии для электромагнитных полей в вакууме.

7. Электромагнитные поля в однородной изотропной среде с постоянными значениями  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $n$ .  
Комплексная диэлектрическая проницаемость и показатель преломления.
8. Поляризация плоских электромагнитных волн. Коэффициент поляризации, эллипс поляризации.  
Параметры Стокса и сфера Пуанкаре.
9. Определение и основные свойства плазмы. Дебаевское экранирование.
10. Квазигидродинамическое описание плазмы. Комплексная диэлектрическая проницаемость холодной изотропной плазмы. Плазменная частота.
11. Электромагнитные поля в холодной изотропной плазме. Диагностика плазмы.
12. Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы.
13. Вывод формул для показателей преломления в магнитоактивной плазме. Два типа нормальных волн.
14. Дисперсионные кривые при распространении волн в плазме вдоль внешнего магнитного поля.
15. Дисперсионные кривые при распространении волн в плазме поперек внешнего магнитного поля.
16. Дисперсионные кривые при распространении волн в плазме под углом к внешнему магнитному полю.
17. Эффект Фарадея.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
отлично	Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.
хорошо	В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.
удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на

Оценка	Критерии оценивания
	дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%
плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

### Задача 1

Получить общее решение одномерного волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

### Задача 2

Записать решение  $u = u(x, y, z, t)$  волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

описывающее распространение плоской волны произвольной формы в трехмерном пространстве.

### Задача 3

Найти общее решение волнового уравнения, описывающее распространение сферических волн.

### Задача 4

Путем суперпозиции плоских волн с фронтом, параллельным оси  $Z$ , получить цилиндрическую волну

$$u(\rho, t) = \int_0^{2\pi} f(ct - \rho \cos \alpha) d\alpha,$$

где  $f(\xi)$  - произвольная функция,  $\rho^2 = x^2 + y^2$ .

#### Задача 5

Путем суперпозиции сферически симметричных волн  $f(ct-r)/r$ , где  $f(\xi)$  - произвольная функция,  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , получить расходящуюся цилиндрическую волну.

#### Задача 6

Неограниченная струна возбуждена заданным начальным отклонением  $u(x, t=0) = \phi(x)$ . Найти отклонение  $u(x, t)$  точек струны от положения равновесия при  $t > 0$ , предполагая, что начальная скорость равна нулю. Построить положение струны в фиксированные моменты времени в случае  $\phi(x) = u_0(1 - |x|/L)$  при  $|x| < L$ ,  $\phi(x) = 0$  при  $|x| > L$ .

#### Задача 7

Находящаяся в идеальном газе сферическая оболочка совершает малые пульсационные гармонические колебания по закону  $a(t) = a_0 + a_1 \sin \omega t$ , где  $a_1 \ll a_0$ . Окружающая оболочку газовая среда характеризуется параметрами  $\rho_0$  и  $c_s$ ;  $a_1 \omega / c_s \ll 1$  ( $\rho_0$  - невозмущенная плотность,  $c_s$  - скорость звука). Найти поле давления и поле скоростей частиц газа.

#### Задача 8

Решить предыдущую задачу, если оболочка имеет форму бесконечного цилиндра, радиус которого меняется во времени по закону  $a(t) = a_0 + a_1 \sin \omega t$ .

#### Задача 9

Найти коэффициенты отражения и прохождения плоской звуковой волны, падающей на границу раздела двух различных идеальных газов. Предполагается, что в невозмущенном состоянии газы характеризуются параметрами  $\rho_{01}$ ,  $P_0$  и  $\rho_{02}$ ,  $P_0$ , соответственно (невозмущенные давления в обоих газах одинаковы).

#### Задача 10

Показать, что электрическое и магнитное поля плоской волны произвольной формы в вакууме направлены перпендикулярно к направлению распространения волны.

#### Задача 11

В однородной проводящей среде, электромагнитные свойства которой характеризуются постоянными  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$ , заданы сторонние токи  $\vec{j}_{cm}$  и  $\rho_{cm}$ . Получить уравнения для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля, обобщив на данный случай условие калибровки Лоренца.

#### Задача 12

Плоская однородная монохроматическая волна распространяется в проводящей среде, электромагнитные свойства которой характеризуются постоянными  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$ . Найти сдвиг фаз между полями  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в волне.

### Задача 13

Плоский поршень совершает гармонические колебания по закону  $x(t) = a \sin(\omega t)$ . Скорость звука в среде справа от поршня равна  $c_s$ . Записать точное решение задачи, определяющее поле скоростей в звуковой волне, излучаемой поршнем. Раскладывая полученное решение в ряд по малому параметру  $M = a\omega/c_s$ , найти амплитуду второй гармоники.

### Задача 14

Применяя преобразование Фурье, найти фундаментальные решения уравнения Гельмгольца  $\Delta u + k_0^2 u = 0$

а) в трехмерном пространстве  $u = u(x, y, z)$ ,  $\Delta = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ ,

б) на плоскости  $u = u(x, y)$ ,  $\Delta = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ ,

в) на прямой  $u = u(x)$ ,  $\Delta = \frac{d^2 u}{dx^2}$ .

### Задача 15

Найти фундаментальное решение уравнения Клейна-Гордона

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + v \frac{\partial u}{\partial t} + \omega_p^2 u = c^2 \Delta u,$$

где  $u = u(x, y, z, t)$ ,  $0 < v < 2\omega_p$ . Путем предельного перехода  $v \rightarrow 0$ ,  $\omega_p \rightarrow 0$  получить фундаментальное решение волнового уравнения.

### Задача 16

Электрический диполь находится на высоте  $h$  над плоской поверхностью  $z=0$  идеально проводящего полупространства и ориентирован вдоль оси  $z$ . Считая, что ток диполя меняется по гармоническому закону  $e^{i\omega t}$ , определить поля  $\vec{E}$  и  $H$ . Построить диаграмму направленности излучения по мощности.

## 5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-2

### Задача 17

Магнитный диполь (маленькая круглая рамка радиуса  $a$  с протекающим в ней током  $I = I_0 e^{i\omega t}$ ;  $a\omega/c \ll 1$ ) находится на высоте  $h$  над плоской поверхностью  $z=0$  идеально проводящего полупространства. Плоскость рамки перпендикулярна оси  $z$ . Записать выражения для полей  $\vec{E}$  и  $H$ . Построить диаграмму направленности излучения по мощности.

### Задача 18

Точечный монохроматический источник звука (акустический монополь) находится в полупространстве  $z>0$  на расстоянии  $h$  от абсолютно жесткой стенки  $z=0$ . Считая, что область  $z>0$  заполнена газовой средой, характеризующейся параметрами  $p_0$  и  $\rho_0$ , найти поле давления и поле скоростей частиц газа. Построить диаграмму направленности излучения источника по мощности. Определить полную мощность излучения. Вязкостью и теплопроводностью среды пренебречь.

### Задача 19

Точечный монохроматический источник звука (акустический монополь) находится в точке  $z=h$ . Считая, что полупространство  $z>0$  заполнено жидкостью, ограниченной свободной поверхностью, на которой давление равно нулю, найти поле давления и поле скоростей частиц жидкости. Построить диаграмму направленности излучения источника по мощности. Вязкостью и теплопроводностью среды пренебречь.

### Задача 20

В начале координат неограниченного пространства, представляющего собой вакуум, находится электрический диполь, параллельный оси  $Z$ . Момент диполя меняется по закону

$$p_z = \begin{cases} p_0 = \text{const} & \text{при } -\infty < t \leq 0, \\ p_0 \cos(\omega t) & \text{при } 0 < t < \infty. \end{cases}$$

Получить точные выражения для полей  $\vec{E}$  и  $H$ .

### Задача 21

Уравнение, описывающее распространение ионно-звуковых волн в плазме, имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - V_s^2 \Delta u - r_D^2 \Delta \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

где  $V_s$  - скорость ионного звука,  $r_D$  - дебаевский радиус. Найти фазовую и групповую скорости. Построить графики зависимостей  $\omega(k)$ ,  $V_\phi(\omega)$ ,  $V_{gr}(\omega)$ .

### Задача 22

Уравнение, описывающее распространение внутренних волн в жидкостях и газах, имеет вид

$$\Delta \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \omega_0^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0,$$

где  $\omega_0$  - действительное число с размерностью частоты. Определить фазовую скорость волн. Найти величину и направление групповой скорости волн.

### Задача 23

Распространение быстрых и медленных магнитозвуковых волн в магнитоактивной плазме описывается уравнением

$$\frac{\partial^4 u}{\partial t^4} - (c_A^2 + c_s^2) \Delta \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_A^2 c_s^2 \Delta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0,$$

где  $c_s$  - скорость адиабатного звука в плазме,  $c_A$  - альфвеновская скорость. Найти фазовые скорости волн. В случае  $c_A \gg c_s$  определить величину и направление групповой скорости волн.

### Задача 24

Распространение электромагнитной волны необыкновенной поляризации в одноосном кристалле описывается уравнением

$$\epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\epsilon \eta}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

где  $\epsilon > 0$ ,  $\eta > 0$ . Найти фазовую и групповую скорости. Определить, какая из скоростей является наибольшей по абсолютной величине.

### Задача 25

Уравнение, описывающее распространение электромагнитных волн в движущейся среде с проницаемостями  $\epsilon$  и  $\mu$ , имеет вид

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \kappa \frac{\gamma^2}{c^2} \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right)^2 u = 0,$$

где  $\kappa = \epsilon\mu - 1$ ,  $\vec{V}$  - скорость среды,  $\gamma = (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$ . Найти фазовую скорость волн.

### Задача 26

Уравнение, описывающее распространение звуковых волн в среде с учетом гравитационного притяжения между частицами, имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \omega_g^2 u - c_s^2 \Delta u = 0,$$

где  $c_s$  - скорость звука,  $\omega_g$  - действительное число (т.н. частота Джинса). Получить дисперсионное уравнение. Найти фазовую и групповую скорости волн. Исследовать зависимость  $\omega(k)$  для крупномасштабных возмущений в среде.

### Задача 27

Уравнение, описывающее распространение внутренних волн во вращающейся несжимаемой жидкости, имеет вид

$$\Delta \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 4\Omega^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0,$$

где  $\Omega$  - действительное число (угловая скорость вращения жидкости). Определить величину и направление фазовой и групповой скорости волн.

#### Задача 28

Показатель преломления для электромагнитных волн диапазона свистящих атмосфериков в магнитоактивной плазме имеет вид

$$n^2 = \frac{\omega_p^2}{\omega \omega_B \cos \vartheta},$$

где  $\cos \vartheta = k_z/k$ ,  $k = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2}$ . Найти фазовую и групповую скорости волн. Восстановить дифференциальное уравнение с частными производными, описывающее распространение данных волн.

#### Задача 29

Показатель преломления для электромагнитных волн в среде имеет вид

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_0^2},$$

где  $\omega_p, \omega_0 = \text{const}$ . Восстановить дифференциальное уравнение с частными производными, отвечающее указанному дисперсионному соотношению.

#### Задача 30

Поле плоской монохроматической волны, распространяющейся в холодной изотропной плазме с плотностью  $N$  (см<sup>-3</sup>), спадает в  $e$  раз на расстоянии  $L$  (см). Найти эффективную частоту столкновений  $\nu$  электронов плазмы с ионами и нейтральными частицами, если известно, что частота волны  $\omega$  удовлетворяет условиям  $\omega \gg \nu$ ,  $\omega \gg \omega_p$ .

### Задача 31

Слой плазмы, ограниченный плоскостями  $z=0$  и  $z=L$ , находится в постоянном однородном магнитном поле с напряженностью  $\vec{H}_0 = H_0 \vec{e}_z$ . При прохождении линейно-поляризованной волны по нормали через указанный слой, угол поворота плоскости поляризации составил  $\alpha$  рад. Считая, что частота волны  $\omega$  удовлетворяет условию  $\omega \gg \omega_p \gg \omega_B$ , найти концентрацию плазмы в слое.

### Задача 32

Плоская звуковая волна распространяется в атмосфере вертикально вверх против направления силы тяжести  $\vec{g} = -\vec{e}_z g$ . Считая воздух идеальным газом, а атмосферу изотермической (невозмущенное значение температуры не зависит от  $z$ ), вывести уравнение для поля скоростей в волне. Получить дисперсионное уравнение. Вязкостью и теплопроводностью пренебречь.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
отлично	Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.
хорошо	В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на

Оценка	Критерии оценивания
	практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.
удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%
плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### Основная литература:

1. Виноградова Марианна Брониславовна. Теория волн : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов] . - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. - 383 с. : ил. - 1.10., 145 экз.
2. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов : в 10 т.]. Т. 6. Гидродинамика. - 3-е изд., перераб. - М. : Наука, 1986. - 736 с. : ил. - Содержание данного тома входило в книгу "Механика сплошных сред". - 1.80., 135 экз.
3. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов] : в 10 т. Т. 7. Теория упругости. - 4-е изд., испр. и доп. Е. М. Лифшицем и др. - М. : Наука, 1987. - 246 с. : ил. - 0.80., 169 экз.
4. Гинзбург Виталий Лазаревич. Распространение электромагнитных волн в плазме. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1967. - 683 с. : с черт. - 3.01., 95 экз.
5. Гершман Борис Николаевич. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М. : Наука, 1984. - 392 с. : ил. - 4.60., 27 экз.

### Дополнительная литература:

1. Вайнштейн Лев Альбертович. Электромагнитные волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1988. - 440 с. : ил. - ISBN 5-256-00064-0 (в пер.) : 2.90., 225 экз.
2. Мандельштам Леонид Исаакович. Лекции по теории колебаний / АН СССР, Отд-ние общ. физики и астрономии. - М. : Наука, 1972. - 470 с. : с черт. - 1.87., 115 экз.

3. Горелик Габриэль Семенович. Колебания и волны : Введение в акустику, радиофизику и оптику : учеб. пособие для ун-тов / под ред. С. М. Рытова. - 2-е изд. - М. : Физматгиз, 1959. - 572 с. : ил. - 57.00., 125 экз.

4. Рабинович Михаил Израилевич. Введение в теорию колебаний и волн : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. - 432 с. : ил. - 1.30., 161 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Петров Евгений Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Калинин Андрей Владимирович, доктор технических наук.

Заведующий кафедрой: Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.