

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

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДАЮ:

Декан \_\_\_\_\_

Матросов В.В.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

**Нелинейные волны**

(наименование дисциплины (модуля))

**Уровень высшего образования**

**Аспирантура**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки / специальность**

**03.06.01 «Физика и астрономия»**

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

**Направленность образовательной программы**

**Радиофизика**

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

**Квалификация (степень)**

**Исследователь. Преподаватель-  
исследователь**

(бакалавр / магистр / специалист)

**Форма обучения**

**Очная**

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2021 г.

## 1. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы (ООП)

Дисциплина «**Нелинейные волны**» относится к числу профессиональных дисциплин, является дисциплиной выбора и изучается на первом году обучения в первом семестре.

Содержание дисциплины направлено на усвоение **аспирантами** совокупности основных физических принципов, закономерностей и методов исследования, составляющих фундамент современной нелинейной физики. Цели и задачи дисциплины обусловлены необходимостью:

а) дать **выпускникам аспирантуры по направлению подготовки 01.06.03 «Физика и астрономия» с направленностью подготовки 01.04.03 – «Радиофизика»** научно обоснованные представления о широком круге нелинейных явлений в электродинамике (в резонансных средах, диэлектриках, ферритах и плазме), гидродинамике, химии и других областях науки и техники;

б) научить **выпускников аспирантуры** современным методам отыскания базисных (точных) решений нелинейных уравнений в частных производных, с помощью которых описываются разнообразные нелинейные эффекты и физические процессы.

В результате изучения дисциплины **выпускник аспирантуры** должен овладеть:

- знанием физической природы нелинейно-оптических свойств различных сред, находящихся под воздействием мощного лазерного излучения; а также основных принципов взаимодействия излучения со средой;
- умением применять основные уравнения (законы) нелинейной оптики для решения конкретных физических задач;
- основами современного математического аппарата отыскания базисных (многосолитонных) решений широкого класса нелинейных уравнений в частных производных (метод обратной задачи рассеяния, преобразования Бэклунда, Миуры и Хопфа-Хироты), описывающих многие нелинейные явления в электродинамике (ферриты, диэлектрики, полупроводники, резонансные среды, плазма), гидродинамике, химии и других областях науки и техники;
- умением видеть на основе колебательно-волновой аналогии общее в нелинейных явлениях, происходящих в различных средах (распределённых системах), а также использовать для их описания соответствующий апробированный математический аппарат.

Освоение дисциплины опирается на знания, умения, навыки и компетенции, которые обучающиеся должны иметь в объёме выпускников бакалавриата и магистратуры радиофизического факультета, получивших хорошие аттестации на экзаменах по общим курсам физики, классической электродинамики, математического анализа, дифференциальных уравнений, аналитической геометрии и высшей алгебры, векторного и тензорного анализа. В результате освоения дисциплины обучающиеся приобретают существенный долевой вклад в формирование трёх профессиональных компетенций (**ПК-1; ПК-2 и ПК-3**), которые они должны иметь после окончания обучения в аспирантуре по направленности **01.04.03 – «Радиофизика»**. Для формирования этих компетенций каждый приступивший к освоению дисциплины (как части программы аспирантуры) обучающийся

**должен знать:**

- 1) возможные сферы и направления научно-исследовательской деятельности в области радиофизики; основные методы научно-исследовательской деятельности;
- 2) фундаментальные основы радиофизики и специальных дисциплин; основные принципы и способы организации научного исследования в области радиофизики;
- 3) основные подходы к интерпретации и оценке результатов научного исследования;

**должен уметь:**

- 1) выявлять и формулировать проблемы в области радиофизики, исходя из этапов профессионального роста и требований развития науки; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника, свои возможности, реалистичность и адекватность намеченных способов и путей достижения планируемых целей; избегать автоматического применения стандартных приемов решения поставленных задач;
  - 2) составлять план работы по заданной теме, анализировать получаемые результаты, составлять отчеты о научно-исследовательской работе;
  - 3) критически оценивать полученную информацию; анализировать альтернативные варианты решения практических и исследовательских задач и оценивать их возможные выигрыши/проигрыши;
- должен владеть:**

1) навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования, приемами оценки и самооценки результатов деятельности по решению профессиональных задач;

2) физическими и физико-математическими методами исследований в выбранной области радиофизики; базовыми информационными и коммуникационными технологиями, применяемыми для проведения исследования в области радиофизики для сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов;

3) базовыми методами теоретического анализа; базовыми приемами моделирования физических явлений и оценки полученных результатов.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ООП (компетенциями выпускников)

**Таблица 1**

### Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<p>ПК-1 – Способность самостоятельно ставить научные задачи и формулировать новые идеи в области радиофизики</p> <p>(базовый этап)</p>	<p>З(ПК-1)-1 – знать методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>У(ПК-1)-1 – уметь определять наиболее актуальные направления исследований.</p> <p>У(ПК-1)-2 – уметь самостоятельно формулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения, исходя из тенденций развития науки в области радиофизики и этапов профессионального роста.</p> <p>У(ПК-1)-3 – уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p>В(ПК-1)-1 – владеть навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>В(ПК-1)-2 – владеть навыками и технологиями планирования профессиональной деятельности в сфере научных исследований.</p> <p>В(ПК-1)-3 – владеть навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики; навыками использования современных средств вычислительной техники для расчётов.</p>
<p>ПК-2 – Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению новых научных результатов с использованием современного оборудования и новейшего отечественного и зарубежного опыта</p> <p>(базовый этап)</p>	<p>З(ПК-2)-1 – знать современное состояние науки в области радиофизики.</p> <p>З(ПК-2)-2 – знать современные подходы к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов.</p> <p>З(ПК-2)-3 – знать требования к содержанию и правила оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях.</p> <p>У(ПК-2)-1 – уметь представлять научные результаты по теме диссертационной работы в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях.</p> <p>У(ПК-2)-2 – уметь представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу.</p> <p>В(ПК-2)-1 – владеть навыками моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов.</p>

	<p>В(ПК-2)-2 – владеть современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.</p> <p>В(ПК-2)-3 – владеть методами планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по направленности <b>Радиофизика</b>.</p>
<p>ПК-3 – Способность к внедрению научных достижений и разработок в области радиофизики</p> <p>(базовый этап)</p>	<p>З(ПК-3)-1 – знать нормативные документы для составления заявок, грантов, проектов НИР.</p> <p>З(ПК-3)-2 – знать требования к содержанию и правила оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях.</p> <p>У(ПК-3)-1 – уметь самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования.</p> <p>У(ПК-3)-2 – уметь оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения.</p> <p>У(ПК-3)-3 – уметь готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в области радиофизики.</p> <p>У(ПК-3)-4 – уметь представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу.</p> <p>В(ПК-3)-1 – владеть навыками составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности <b>Радиофизика</b>.</p> <p>В(ПК-3)-2 – владеть навыками представления научных результатов исследования в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях и заявок на изобретения.</p>

### 3. Структура и содержание дисциплины «Нелинейные волны»

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часов составляют контактную работу обучающегося с преподавателем (35 часов занятия лекционного типа, 1 час мероприятия по аттестации) и 36 часов – самостоятельную работу аспиранта.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение	4	2	-	-	-	2	2
Часть 1. Нелинейная оптика							
2. Трехчастотные взаимодействия в квадратичной среде	7	4	-	-	-	4	3
3. Четырехчастотные взаимодействия в кубичной среде	3	2	-	-	-	2	1
4. Взаимодействие волн при вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) лазерного излучения	6	3	-	-	-	3	3
5. Взаимодействие волн лазерного излу-	5	3	-	-	-	3	2

чения и звука при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ)							
6. Пучки в нелинейной оптике	5	2	-	-	-	2	3
7. Обращение волнового фронта (ОВФ) при отражении лазерного излучения от нелинейной среды	4	2	-	-	-	2	2
8. Двумерные лазерные пучки в активной резонансной среде с линейной диссипацией энергии	4	1	-	-	-	1	3
<b>Часть 2. Солитоны – новое понятие в прикладных науках</b>							
9. Солитонное решение уравнения Кортевега и де Вриза (КДВ)	4	2	-	-	-	2	2
10. Солитонное решение уравнения Синус-Гордон (СГ)	3	1	-	-	-	1	2
11. Солитонное решение нелинейного уравнения Шредингера (НУШ)	4	2	-	-	-	2	2
12. Самоиндуцированная прозрачность двухуровневой поглощающей среды	4	2	-	-	-	2	2
13. Стационарные световые импульсы в усиливающей резонансной среде при наличии линейного поглощения	4	2	-	-	-	2	2
14. Решение нелинейных уравнений методом обратной задачи рассеяния (ОЗР)	7	4	-	-	-	4	3
15. Решение нелинейных уравнений с помощью автопреобразования Бэклунда	4	2	-	-	-	2	2
16. Обзор новых методов отыскания точных решений нелинейных уравнений	3	1	-	-	-	1	2
Аттестация по дисциплине - зачет	1	1	-	-	-	1	-
Итого	72	36	-	-	-	36	36

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение	Основные свойства линейных и нелинейных сред. Диспергирующие и поглощающие среды. Физическая природа нелинейности, дисперсии и поглощения в электродинамике. Соотношения Крамерса-Кронига. Закономерности образования гармоник в нелинейной среде с дисперсией.	Лекции	-
<b>Часть 1. Нелинейная оптика</b>				
2	Трехчастотные взаимодействия в квадратичной среде.	Условия трехчастотного взаимодействия волн в квадратичной среде. Дисперсия и синхронизм. Описание трехволновых взаимодействий. Законы сохранения в среде без потерь. Соотношения Менли-Роу. Генерация второй гармоники. Взаимодействие волн в непоглощающей среде при точном синхронизме. Учет расстройки синхронизма. Влияние линейных потерь. Параметрические процессы в квадратичной среде. Параметрическое преобразование частоты вниз при высокочастотной накач-	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте

		ке. Эффективность преобразования частоты вверх и вниз.		
3	Четырехчастотные взаимодействия в кубичной среде.	Условия четырехчастотного взаимодействия. Основные уравнения четырехволнового взаимодействия. Первые интегралы уравнений в отсутствие диссипации (соотношения Менли-Роу). Генерация третьей гармоники в непоглощающей среде. Влияние эффекта Керра на коэффициент преобразования в третью гармонику.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
4	Взаимодействие волн при вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) лазерного излучения.	Физическая природа ВКР. Стоксово излучение. Основные уравнения процесса ВКР. Порог генерации. Законы сохранения в отсутствие диссипации. Вынужденное комбинационное рассеяние вперед. Преобразование энергии накачки в волну стоксова излучения при ВКР назад. Антистоксово излучение.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
5	Взаимодействие волн лазерного излучения и звука при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).	Физическая природа ВРМБ. Основные уравнения ВРМБ. Усиление стоксова излучения – трехчастотное взаимодействие. Порог возбуждения. Законы сохранения в непоглощающей среде. Стоксово рассеяние вперед. Усиление стоксова излучения назад при ВРМБ. Основные уравнения. Законы сохранения. Расчет излучаемой мощности. Приближение заданного поля накачки.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
6	Пучки в нелинейной оптике.	Преобразование частот в волновых пучках в квадратичной среде. Основные уравнения. Параметрическое приближение. Взаимодействие двух усиливаемых пучков при постоянной высокочастотной накачке. Уравнения одноволнового приближения. Дифракция усиливаемых волн и эффект аномальной фокусировки. Параметрическая диффузия.	Лекции	-
7	Обращение волнового фронта (ОВФ) при отражении лазерного излучения от нелинейной среды.	ОВФ при четырехволновом взаимодействии (ЧВ) в кубичной среде. ОВФ при ВКР. ОВФ при ВРМБ.	Лекции	-
8	Двумерные лазерные пучки в активной резонансной среде с линейной диссипацией энергии	Стационарные электромагнитные пучки в активной двухуровневой среде. Условия канализации светового пучка в резонансной среде с неоднородным распределением инверсии и неоднородным линейным поглощением. Свойства нелинейного волновода в однородно уширенной резонансной среде с однородным распределением инверсии и неоднородным линейным поглощением.	Лекции	-

Часть 2. Солитоны – новое понятие в прикладных науках				
9	Солитонное решение уравнения Кортевега и де Вриза (КДВ).	Использование уравнения КДВ в физике. Основные свойства уравнения КДВ. Стационарные решения уравнения КДВ - кноидальные волны. Фазовая плоскость стационарных волн. Однопараметрическое семейство солитонных решений уравнения КДВ и его свойства: амплитуда, скорость распространения и пространственный масштаб уединённой волны.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
10	Солитонное решение уравнения Синус-Гордон (СГ).	Применение уравнения СГ в физике. Основные свойства уравнения СГ. Солитонное решение уравнения СГ и его основные свойства. Стационарные решения уравнения СГ - осциллирующие и спиральные волны. Фазовая плоскость стационарных волн.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
11	Солитонное решение нелинейного уравнения Шредингера (НУШ).	Использование НУШ в физике. Основные свойства НУШ. Солитонное решение НУШ и его основные свойства. Стационарное решение НУШ. Фазовая плоскость стационарных волн.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
12	Самоиндуцированная прозрачность двухуровневой поглощающей среды.	Основные уравнения электромагнитного излучения в резонансной среде. Уравнения для медленных амплитуд коротких импульсов поля, поляризации и разности населённости уровней рабочего перехода резонансной (двухуровневой) среды. Основные свойства укороченных уравнений и их солитонное решение для поля на резонансной частоте. Свойства солитонного решения: амплитуда, скорость и длительность стационарного $2\pi$ -импульса.	Лекции	-
13	Стационарные световые импульсы в усиливающей резонансной среде при наличии линейного поглощения.	Уравнения баланса для медленных амплитуд короткого импульса поля и разности населённости в активной двухуровневой среде. Солитонное решение уравнений баланса и его основные свойства: энергия, форма и скорость стационарного импульса.	Лекции	-
14	Решение нелинейных уравнений методом обратной задачи рассеяния (ОЗР).	Решение стационарного уравнения Шредингера и определение спектральных данных его потенциала. Обратная спектральная задача – восстановление потенциала с помощью решения уравнения Гельфанда-Левитана-Марченко (ГМЛ). Поста-	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте

		новка ОЗР на примере уравнения КДВ. Эволюция спектральных данных во времени. Примеры расчетов коэффициентов рассеяния и их эволюционных изменений. Примеры решений уравнений ГМЛ и нахождения многосолитонных решений уравнения КДВ. Понятие об LA-паре линейных операторов. Альтернативная версия ОЗР. LA-пары операторов уравнений КДВ и НУШ.		че
15	Решение нелинейных уравнений с помощью автопреобразования Бэклунда.	Преобразования Беклунда. Автопреобразование Бэклунда (АПБ) и постановка задачи об отыскании иерархической системы решений нелинейного уравнения. Диаграмма Лэмба. АПБ уравнения СГ и его многосолитонные решения. АПБ уравнения КДВ.	Лекции	выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
16	Обзор новых методов отыскания точных решений нелинейных уравнений.	Преобразование Хопфа-Хироты. Преобразование Миуры и законы сохранения. Метод вариации параметров стационарных волн.	Лекции	-

#### 4. Образовательные технологии

Еженедельно текст прочитанной лекции и соответствующие вопросы для контроля текущей успеваемости из списка **5.4** рассылаются по электронной почте обучающимся для стимулирования самостоятельной внеаудиторной работы и создания личного **портфолио** по дисциплине «**Нелинейные волны**».

#### 5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

1. Еженедельный контроль посещаемости аудиторных занятий.

2. Как оценочный способ контроля самостоятельной работы аспирантов и одновременно разновидность интерактивного обучения используется форма выборочной проверки (в соответствии со **списком вопросов 5.4**) состояния отдельных частей индивидуального **портфолио** обучающегося не менее двух раз в течение семестра.

3. Трансляции по электронной почте на адреса всех аспирантов, изучающих дисциплину «**Нелинейные волны**», ответа преподавателя на индивидуальный вопрос (по программе дисциплины) одного из обучающихся.

##### 4. Список вопросов для контроля текущей успеваемости

Написать необходимые выражения и объяснить содержание следующих **понятий**:

1. **Нелинейность среды**. Сравнение свойств линейных и нелинейных сред.
2. **Дисперсия** и **диссипация** среды. Влияние дисперсии и диссипации на распространение волн.
3. Природа **дисперсии** и **диссипации** среды в электродинамике. Соотношения Крамерса-Кронига.
4. Условия образования частотных гармоник в нелинейной диспергирующей среде.
5. **Квадратичная среда**. Условия и типы трехчастотного взаимодействия.
6. Законы сохранения в непоглощающей **квадратичной среде**.
7. Влияние **синхронизма** и граничных условий на процесс образования второй гармоники в



*квадратичной среде* по двухволновой схеме  $1^\circ + 1^\circ = 2^\circ$ .

8. Параметрическое приближение трёхволнового взаимодействия при *низкочастотной накачке в квадратичной среде* (общая характеристика процесса).

9. Параметрическое приближение трёхволнового взаимодействия при *высокочастотной накачке в квадратичной среде* (общая характеристика процесса).

10. *Кубичная среда*. Условия и разновидности четырехчастотного взаимодействия.

11. Законы сохранения в непоглощающей *кубичной среде*.

12. Влияние *эффекта Керра* и *синхронизма* на эффективность процесса образования третьей гармоники в *кубичной среде*.

13. Природа *комбинационного рассеяния* и *вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР)* лазерного излучения.

14. Законы сохранения при *ВКР* лазерного излучения.

15. Сравнительная характеристика процессов образования *стоксова* излучения *вперёд* и *назад* при *ВКР* поля лазерной генерации.

16. Условия эффективной генерации *антистоксова* излучения при *ВКР* лазерного излучения.

17. Природа *рассеяния Мандельштама-Бриллюэна* и *вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ)*.

18. Законы сохранения при *ВРМБ* лазерного излучения и *гиперзвука*.

19. Сравнительная характеристика процессов образования *стоксова* излучения *вперёд* и *назад* при *ВРМБ* поля лазерной генерации и *гиперзвука* (при условии *синхронизма*).

20. *Обращение волнового фронта (ОВФ)* при четырехволновом взаимодействии (ЧВ) в нелинейной кубичной среде.

21. Основные свойства *солитонного* решения *уравнения КдВ*.

22. Основные свойства *солитонного* решения *уравнения Синус-Гордон*.

23. Основные свойства *солитонного* решения *нелинейного уравнения Шрёдингера*.

24. *Самоиндуцированная прозрачность (СИ)* резонансной поглощающей среды (условия реализации *СИ*, основные параметры *солитонного* импульса и процесса его распространения).

25. Стационарный короткий импульс солитонного типа в активной резонансной среде (условия реализации, основные параметры *солитонного* импульса и процесса его распространения).

26. *Метод обратной задачи рассеяния (ОЗР)* – новый метод отыскания точных решений нелинейных уравнений в частных производных.

27. *Автопреобразование Бэклунда (АПБ)* – новый метод отыскания точных решений нелинейных уравнений в частных производных.

## **6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

**6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования**

Дисциплина «Нелинейные волны» вносит определённый долевой вклад в *формирование компетенций* выпускников Основной Образовательной Программы (ПК–1; ПК–2 и ПК–3), *которое* предусмотрено утверждённым рабочим *Учебным планом* подготовки аспирантов по направлению **03.06.01 «Физика и астрономия»** и направленности **01.04.03 – «Радиофизика»** на 2020-2021 учебный год. Содержание компетенций **ПК–1; ПК–2 и ПК–3** с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, представлено в разделе **2** настоящей **РПД**. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведено в приложении 1.

**6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания**

Для оценки результатов обучения магистрантов применяется в соответствии с *учебным планом подготовки магистра* одна из традиционных форм промежуточной аттестации *зачёт* со шкалой оценивания

Зачтено	Отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Обучаемый на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы – минимум и основной вопрос, а также на большинство дополнительных вопросов.
Не зачтено	Обучаемый показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

Оценка текущих результатов обучения в соответствии с *Учебным планом* производится на основании анализа предоставляемых обучающимся документов его личного **портфолио**. Оценивание компетенций обучающегося на всех стадиях их формирования осуществляется *по пятибальной шкале*. Показатели и критерии оценивания компетенций, которые формируются у обучающихся в процессе изучения дисциплины, представлены в таблицах Приложения 1, являющегося неотъемлемой частью **РПД**.

### 6.3. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, необходимых для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Написать необходимые выражения и объяснить содержание следующих *понятий*:

1. *Нелинейность среды*. Сравнение свойств линейных нелинейных сред.
2. *Дисперсия* и *диссипация* среды. Влияние дисперсии и диссипации на распространение волн.
3. Природа *дисперсии* и *диссипации* среды в электродинамике. Соотношения Крамерса-Кронига.
4. Условия образования частотных гармоник в нелинейной диспергирующей среде.
5. *Квадратичная среда*. Условия и типы трехчастотного взаимодействия.
6. Законы сохранения в непоглощающей *квадратичной среде*.
7. Влияние *синхронизма* и граничных условий на процесс образования второй гармоники в *квадратичной среде* по двухволновой схеме  $1^\circ + 1^\circ = 2^\circ$ .
8. Параметрическое приближение трёхволнового взаимодействия при *низкочастотной накачке* в *квадратичной среде* (общая характеристика процесса).
9. Параметрическое приближение трёхволнового взаимодействия при *высокочастотной накачке* в *квадратичной среде* (общая характеристика процесса).
10. *Кубичная среда*. Условия и разновидности четырехчастотного взаимодействия.
11. Законы сохранения в непоглощающей *кубичной среде*.
12. Влияние *эффекта Керра* и *синхронизма* на эффективность процесса образования третьей гармоники в *кубичной среде*.
13. Природа *комбинационного рассеяния* и *вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР)* лазерного излучения.
14. Законы сохранения при *ВКР* лазерного излучения.
15. Сравнительная характеристика процессов образования *стоксова* излучения *вперёд* и *назад* при *ВКР* поля лазерной генерации.
16. Условия эффективной генерации *антистоксова* излучения при *ВКР* лазерного излучения.
17. Природа *рассеяния Мандельштама-Бриллюэна* и *вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ)*.
18. Законы сохранения при *ВРМБ* лазерного излучения и *гиперзвука*.
19. Сравнительная характеристика процессов образования *стоксова* излучения *вперёд* и *назад* при *ВРМБ* поля лазерной генерации и *гиперзвука* (при условии *синхронизма*).
20. *Обращение волнового фронта (ОВФ)* при четырехволновом взаимодействии (ЧВ) в нелинейной кубичной среде.
21. Основные свойства *солитонного* решения *уравнения КдВ*.
22. Основные свойства *солитонного* решения *уравнения Синус-Гордон*.

23. Основные свойства *солитонного* решения *нелинейного уравнения Шрёдингера*.
24. *Самоиндуцированная прозрачность (СИ)* резонансной поглощающей среды (условия реализации *СИ*, основные параметры *солитонного* импульса и процесса его распространения).
25. Стационарный короткий импульс солитонного типа в активной резонансной среде (условия реализации, основные параметры *солитонного* импульса и процесса его распространения).
26. *Метод обратной задачи рассеяния (ОЗР)* – новый метод отыскания точных решений нелинейных уравнений в частных производных.
27. *Автопреобразование Бэклунда (АПБ)* – новый метод отыскания точных решений нелинейных уравнений в частных производных.

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенции (части компетенции) **ПК-1**, используются следующие вопросы из вышеприведенного списка: 26, 27.

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенции (части компетенции) **ПК-2**, используются следующие вопросы из вышеприведенного списка: 1-27.

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенции (части компетенции) **ПК-3**, используются следующие вопросы из вышеприведенного списка: 8-10, 12, 15, 16, 19.

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Нелинейные волны»**

### **а) Основная литература:**

1. Martin Wegener. *Extreme Nonlinear Optics*. Springer, 2005, 225 p.
2. Manthos G. Papadopoulos, Andrzej J. Sadlej, Jerzy Leszczynsky. *Non-Linear Optical Properties of Matter*. Springer, 2006, 681 p.
3. E. Hanamura, Y. Kawabe, A. Yamanake. *Quantum Nonlinear Optics*. Springer, 2007, 240 p.

### **б) Дополнительная литература:**

1. Anjan Biswas, Daniela Milovic, Matthew Edwards. *Mathematical Theory of Dispersion-Managed Optical Solitons*. Springer, 2010, 170 p.
2. Ralf Menzel. *Photonics*. Springer, 2007, 1042 p.
3. Jurgen Eichler, Hans Joachim Eichler. *Laser*. Springer, 2006, 475 p.

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

1. Microsoft Office (номера лицензий: 62421356 (12 шт.), 62421349);
2. Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):  
<http://e.lanbook.com/>;  
<http://www.biblioclub.ru>.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории, компьютерным оборудованием. Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие программе дисциплины.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Автор \_\_\_\_\_ Н.Д. Миловский

Рецензент \_\_\_\_\_ В.Г. Гавриленко

Заведующий кафедрой электродинамики \_\_\_\_\_ А.В. Кудрин

Программа рекомендована на заседании кафедры электродинамики от \_\_\_\_\_ 2021 года, протокол № \_\_\_\_\_.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от \_\_\_\_\_ 2021 года, протокол № \_\_\_\_\_.

### Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

Дисциплина «Нелинейные волны» вносит долевым вклад в *формирование профессиональных компетенций* ПК–1; ПК–2 и ПК–3 выпускников Основной Образовательной Программы аспирантуры по направлению **03.06.01 «Физика и астрономия»** и направленности **01.04.03 – «Радиофизика»**. В настоящем Приложении 1 представлены **шифры планируемых результатов обучения** (см раздел 2 РПД) и **критерии оценивания результатов обучения**.

#### ПК-1 Способность самостоятельно ставить научные задачи и формулировать новые идеи в области радиофизики

Шифры планир. результатов	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
З(ПК-1)-1	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач	Общие, но не структурированные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных	Сформированные системные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных
У(ПК-1)-1	Отсутствие умений	Частично освоенное умение определять наиболее актуальные направления исследований	В целом успешное, но не систематическое использование умения определять наиболее актуальные направления исследований	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы использование умения определять наиболее актуальные направления исследований	Сформированное умение определять наиболее актуальные направления исследований
У(ПК-1)-2	Не умеет и не готов формулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения, исходя из тенденций развития науки и этапов профессионального роста	Имея базовые представления о тенденциях развития науки в области радиофизики и этапах профессионального роста, не способен сформулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения	При формулировке новых научных задач в области радиофизики не учитывает тенденции развития науки в области радиофизики и индивидуально-личностные особенности	Формулирует новые научные задачи в области радиофизики, исходя из тенденций развития науки в области радиофизики и индивидуально-личностных особенностей, но не полностью учитывает возможные этапы профессиональной деятельности	Готов и умеет формулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения, исходя из тенденций развития науки в области радиофизики, этапов профессионального роста, индивидуально-личностных особенностей
У(ПК-1)-3	Отсутствие умений	Частично освоенное умение при решении исследовательских и практических задач генерировать идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений	В целом успешное, но не систематически осуществляемое умение при решении исследовательских и практических задач генерировать идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение при решении исследовательских и практических задач генерировать идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений	Сформированное умение при решении исследовательских и практических задач генерировать идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений

В(ПК-1)-1	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач	В целом успешное, но не систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач	Успешное и систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач
В(ПК-1)-2	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение технологий планирования профессиональной деятельности	В целом успешное, но не систематическое применение технологий планирования профессиональной деятельности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение технологий планирования профессиональной деятельности	Успешное и систематическое применение технологий планирования профессиональной деятельности
В(ПК-1)-3	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение отдельными навыками анализа радиофизических задач, отдельными навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов	В целом успешное, но не систематическое владение основными навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики; основными навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение основными навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики; основными навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов	Успешное и систематическое владение навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики; навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов

**ПК-2 Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению новых научных результатов с использованием современного оборудования и новейшего отечественного и зарубежного опыта**

Шифры планир. результатов	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
3(ПК-2)-1	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современном состоянии науки в области радиофизики	Неполные представления о современном состоянии науки в области радиофизики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, представления о современном состоянии науки в области радиофизики	Сформированные систематические представления о современном состоянии науки в области радиофизики
3(ПК-2)-2	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных подходах к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов	В целом успешные, но несистемные представления о современных подходах к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов	В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы, представления о современных подходах к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов	Сформированные систематические представления о современных подходах к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов
3(ПК-2)-3	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о требованиях к содержанию и правилам оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях	Общие представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей, наличие однократного опыта публикаций в рецензируемых научных изданиях	Сформированные представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей, наличие неоднократного опыта публикаций в рецензируемых научных изданиях

У(ПК-2)-1	Отсутствие умений	Фрагментарное использование методов подготовки научных результатов к публикации в рецензируемых научных изданиях	В целом успешное, но не систематическое использование методов подготовки научных результатов к публикации в рецензируемых научных изданиях	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы использование методов подготовки научных результатов к публикации в рецензируемых научных изданиях	Сформированное умение использовать методов подготовки научных результатов к публикации в рецензируемых научных изданиях
У(ПК-2)-2	Отсутствие умений	Умение представлять результаты НИР узкому кругу специалистов	В целом успешное умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому сообществу	Успешное умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу	Сформированное умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу; определять целевые группы и форматы продвижения результатов собственной научной деятельности
В(ПК-2)-1	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов	В целом успешное, но не систематическое применение навыков моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов	Успешное и систематическое применение навыков моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов
В(ПК-2)-2	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение современных информационных и коммуникационных технологий сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования	В целом успешное, но не систематическое применение современных информационных и коммуникационных технологий сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение современных информационных и коммуникационных технологий сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования	Успешное и систематическое применение современных информационных и коммуникационных технологий сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования
В(ПК-2)-3	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение методов планирования, подготовки и проведения НИР, анализа и обсуждения полученных данных	В целом успешное, но не систематическое применение методов планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение методов планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировка выводов по результатам НИР	Успешное и систематическое применение методов планирования, подготовки и проведения НИР и анализа и обсуждения полученных результатов; формулировка выводов и рекомендаций по результатам НИР

### ПК-3 Способность к внедрению научных достижений и разработок в области радиофизики

Шифры планир. результатов	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
3(ПК-3)-1	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о нормативных документах для составления заявок, грантов, проектов НИР	Неполные представления о нормативных документах для составления заявок, грантов, проектов НИР	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР	Сформированные систематические знания нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР
3(ПК-3)-2	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях	Общие представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей, наличие однократного опыта публикаций в рецензируемых научных изданиях	Сформированные представления о требованиях к содержанию и правилах оформления рукописей, наличие неоднократного опыта публикаций в рецензируемых научных изданиях

У(ПК-3)-1	Отсутствие умений	Фрагментарное использование умения самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования	В целом успешное, но не систематическое использование умения самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы использование умения самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования	Сформированное умение самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования
У(ПК-3)-2	Отсутствие умений	Фрагментарное использование умения оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения	В целом успешное, но не систематическое использование умения оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы использование умения оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения	Сформированное умение оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения
(ПК-3)-3	Отсутствие умений	Умение готовить отдельные материалы для заявки на получение научных грантов по поручению научного руководителя	В целом успешное, но не систематическое использование умения готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение готовить предложения по тематике и плану реализации исследовательских проектов, а также оформлять проект согласно установленным требованиям	Сформированное умение готовить предложения по тематике и плану реализации исследовательских проектов; обосновывать предложения с точки зрения реалистичности сроков, трудозатрат и ресурсной обеспеченности; оформлять проект согласно установленным требованиям
(ПК-3)-4	Отсутствие умений	Умение представлять результаты НИР узкому кругу специалистов	В целом успешное, умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому сообществу	Успешное умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу	Сформированное умение представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу; определять целевые группы и форматы продвижения результатов собственной научной деятельности
В(ПК-3)-1	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика	В целом успешное, но не систематическое применение навыков составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика	Успешное и систематическое применение навыков составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика
В(ПК-3)-2	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков представления научных результатов исследования в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях и заявок на изобретения	В целом успешное, но не систематическое применение навыков представления научных результатов исследования в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях и заявок на изобретения	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков представления научных результатов исследования в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях и заявок на изобретения	Сформированное владение навыками представления научных результатов исследования в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях и заявок на изобретения