

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 / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Введение в теорию нелинейных волн
(наименование дисциплины (модуля))

Бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Радиофизика и электроника

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Данная дисциплина относится к числу факультативных дисциплин образовательной программы бакалавров на радиофизическом факультете ННГУ по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» по профилю (направленности образовательной программы) «Радиофизика и электроника» и изучается в 7 семестре.

Цель освоения дисциплины состоит в формировании у студента целостной системы знаний по основам теории нелинейных волн, выработке навыков построения базовых (эталонных) моделей теории нелинейных волн и методов их анализа. Дисциплина является фундаментом для последующего изучения *специальных* дисциплин.

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

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**	
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.	Знать методы решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационно-библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности	<i>Задача, собеседование</i>

ОПК-2. Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;	<p>ОПК-2.1 Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов</p> <p>ОПК-2.2 Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы</p> <p>ОПК-2.3 Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов</p>	Знать основные методы радиофизических измерений характеристик нелинейных волн	Задача, собеседование
--	--	---	-----------------------

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа – занятия семинарского типа, 1 час – контрольные самостоятельные работы), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Дисперсионное уравнение и энергия волн в слабодиссипативных средах	17		8		8	9
2. Нелинейное взаимодействие волн	19		9		9	10

3. Нелинейные волны в консервативных средах со слабой дисперсией	8		3		3	5
4. Модулированные нелинейные волны в консервативных средах	8		3		3	5
5. Самоорганизация, структуры и турбулентность диссипативных неравновесных средах	19		9		9	10
В т. ч. текущий контроль	1		1		1	
Промежуточная аттестация – зачет						

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогичная форма проведения занятий. Лекционные занятия предусматривают использование проекционной аппаратуры для презентации таблиц, схем, рисунков и фотографий.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы,

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ОПК-1

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	незачет	незачет	зачет»	зачет	зачет	зачет	зачет
Знать методы решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных техно-	Отсутствие необходимых знаний	Фрагментарные знания методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн	Знание методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн с рядом негрубых ошибок	Знание методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн с рядом заметных погрешностей	Знание методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн с незначительными погрешностями	Знание методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-	Знание методов решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-

логий и с учетом основных требований информационной безопасности						коммуникационных технологий без ошибок и погрешностей	логий и с учетом основных требований информационной безопасности и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20%	21 – 50%	51 – 70%	71-80%	81 – 90%	91 – 99%	100%

ОПК-2 Способность использовать основные методы радиофизических измерений

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения						
	Не зачтено			Зачтено			
Знать основные методы радиофизических измерений характеристик нелинейных волн	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, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
Уровень сформированности компетенций	Нулевой	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий	Очень высокий

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), и последующем собеседовании в

рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Зачтено	Превосходная, отличная, очень хорошая, хорошая или удовлетворительная подготовка. Обучаемый не менее чем удовлетворительно отвечает на вопросы программы – минимум и основной вопрос, а также на большинство дополнительных вопросов.
Незачтено	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.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются: индивидуальное собеседование (ОПК-1, ОПК-2).

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются: индивидуальное собеседование (ОПК-1, ОПК-2).

Для оценивания результатов обучения в виде владений используются: индивидуальное собеседование (ОПК-1, ОПК-2).

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:
ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ И ЭНЕРГИЯ ВОЛН

1. Построение дисперсионного уравнения и свойства симметрии его решений. Решение задач с начальными и граничными условиями.
2. Дисперсия электромагнитных волн в распределенных LC-линиях. Переход от дискретной цепочки к распределенной LC-линии. Моделирование дисперсионных свойств различных сред с помощью распределенных LC-линий. Модели сред с дисперсией в области высоких, низких и промежуточных частот.
3. Дисперсионное уравнение для волн пространственного заряда в системе взаимопроникающих «холодных» потоков заряженных частиц. Неустойчивость плоских волн пространственного заряда в системе «пучок–плазма» с пучком малой плотности. Дисперсионное уравнение для волн пространственного заряда в сильно «замагниченной» системе «пучок–плазма» с ограниченным поперечным сечением. Эффект редукции пространственного заряда.
4. Определение плотности энергии волн с помощью уравнения энергетического баланса на примере волн пространственного заряда в многопотоковой системе. Вывод уравнения для огибающей волнового пакета, возбуждаемого сторонним током, асимптотическим методом Боголюбова-Митропольского с применением спектрально-операторного формализма.
5. Волны с отрицательной энергией (ВОЭ) в неравновесных средах (на примере волн пространственного заряда в системе пучок-плазма). Термодинамические ограничения

на знак волновой энергии в равновесной среде. Физический смысл ВОЭ и формализм ВОЭ в линейных средах.

НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН

1. Трехволновые резонансные взаимодействия в консервативных средах с квадратичной нелинейностью. Вывод уравнений для комплексных амплитуд при резонансном взаимодействии трех модулированных волн в приближении группового распространения на примере волн пространственного заряда в многопоточковой системе. Условия пространственно-временного резонанса (синхронизма) в среде с квадратичной нелинейностью. Графическое определение резонансных волновых триплетов.
2. Общие свойства коэффициентов трехволнового взаимодействия в консервативных средах. Соотношения Мэнли-Роу и аналогия трехволновых взаимодействий в равновесных средах с процессами распада и слияния квазичастиц в квантовой механике
3. Дополнительные сведения о выводе укороченных уравнений для взаимодействующих волн. Учет малых потерь и расстройки частот волн от резонанса. Уравнение для спектральной плотности амплитуд гармоник в широком волновом пакете и переход к взаимодействию узких волновых пакетов.
4. Резонансное взаимодействие трех пространственно однородных волн во времени. Распадная (параметрическая) неустойчивость в заданном поле высокочастотной накачки и «нераспадность» низкочастотных волн в равновесных средах.
5. Анализ динамики трехволнового взаимодействия в фазовом пространстве. Вырожденный трехволновый процесс (генерация второй гармоники).
6. Стационарное трехволновое взаимодействие. Пространственно-временная аналогия для волн с одинаковыми знаками групповых скоростей. Особенности параметрического усиления встречных волн на примере вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в газе.
7. Особенности резонансных трехволновых взаимодействий в неравновесных средах. Распадная неустойчивость низкочастотных волн и взрывная неустойчивость.
8. Четырехволновые взаимодействия в консервативных средах. Условие четырехволнового резонанса в кубичной среде. Самовоздействие и нерезонансное взаимодействие волн. Эффективная кубичная нелинейность и средние поля второго порядка по амплитуде волн в квадратичной среде на примере решения модельного уравнения с квадратичной и кубичной нелинейностью.
9. Взаимодействие волн в средах с диссипативной нелинейностью. Взрывная неустойчивость при резонансном взаимодействии волны со второй гармоникой электромагнитных волн положительной энергии в распределенной LC-линии с нелинейным током утечки и ее стабилизация за счет нелинейного затухания. Связь взрывной неустойчивости с жестким возбуждением волн.
10. Конкуренция волн в активных средах с кубичной нелинейностью. Исследование конкуренции двух однородных волн во времени и попутных волн в пространстве методом фазовой плоскости. Пространственно неоднородные стационарные режимы генерации встречных волн в резонаторе.
11. Резонансное взаимодействие модулированных волн в приближении группового распространения. Параметрическая неустойчивость и захват слабых волн импульсом на-

качки. Критерий захвата для прямоугольного импульса. Пространственно-временная аналогия и захват слабых волн пучками накачки.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В КОНСЕРВАТИВНЫХ СРЕДАХ СО СЛАБОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

1. Вывод уравнения Кортевега-де-Вриза (КдВ) на примере электромагнитных волн в LC-линии с нелинейной емкостью и слабой дисперсией в области малых волновых чисел. Периодические стационарные волны и солитоны в уравнении КдВ.
2. Уравнение КдВ для волн на мелкой воде. Влияние потерь на форму стационарных волн. Волнистая и турбулентная боры на мелкой воде. Уравнение КдВ как модель развития цунами.
3. Понятие о методе обратной задачи теории рассеяния (ОЗР). Распад начального возмущения на солитоны. Аналогия солитонов с частицами.
4. Уравнение Бенджамена-Оно для среды с «квадратичной» дисперсией и одномерные алгебраические солитоны.
5. Уравнение Кадомцева-Петвиашвили для двумерных волн и двумерные алгебраические солитоны в среде с «положительной дисперсией». Устойчивость КдВ солитонов к трехмерным возмущениям.

МОДУЛИРОВАННЫЕ ВОЛНЫ В КОНСЕРВАТИВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

1. Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) для модулированных волн. Соотношение между дисперсией и нелинейностью в НУШ.
2. Обобщение НУШ для неодномерных волновых полей (нелинейное параболическое уравнение). Самомодуляция и самофокусировка плоских волн в консервативных средах и их интерпретация как «четырёхквантовых» распадных процессов.

САМООРГАНИЗАЦИЯ, СТРУКТУРЫ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ДИССИПАТИВНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ СРЕДАХ.

1. Хаос и структуры в рамках комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау (КУГЛ). Условия применимости одномерного и двумерного комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау (КУГЛ). Неустойчивость когерентных структур в виде монохроматических бегущих волн, критерий Бенджамена-Фейра-Ньюэла.
2. Диссипативный предел двумерного КУГЛ и понятие градиентной системы. Решение диссипативного двумерного уравнения Гинзбурга-Ландау в виде «вихрей». Вихри и топологические дефекты. Решение двумерного КУГЛ в виде спиралей.
3. Турбулентность и структуры в двумерном КУГЛ: спирали, фазовая турбулентность, турбулентность дефектов и замороженные состояния («вихревые стекла»).
4. Термическая гравитационная конвекция в жидком слое, подогреваемом снизу, как пример структурообразующей системы. Числа Рэлея и Прандтля. Конвективные валы и нейтральная кривая для них.
5. Исследование отбора (селекции) структур с помощью уравнения Свифта-Хоенберга. Конкуренция валов, имеющих произвольную пространственную ориентацию. Возникновение конвективных ячеек в виде шестигранников. Устойчивость и «предпочтительность» шестигранных ячеек. Понятие о пенто-гепто дефектах в периодической решетке шестигранников.

6. Исследование системы валов, содержащей дислокации, с помощью уравнения Нью-эла-Вайтхеда-Сегеля. Направление движения дислокаций в решетке искривленных валов.
7. Доменные стенки и их простейшие модели.

Типовые контрольные задания:

Для оценки сформированности компетенции **ОПК-2** используются ответы на контрольные вопросы, представленные в п. 6.4.

Полный комплект оценочных средств представлен в ФОНДЕ оценочных средств по дисциплине «Введение в теорию нелинейных волн»

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 С. (2-ое издание – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 1999. 560 С.).
2. Рабинович М.И., Езерский А.Б. Динамическая теория формообразования. М.: Янус-К, 1998. 191С.
3. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
4. Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Колебания и волны. Изд. УРСС, 2004.
5. Скотт Э. Нелинейная наука. Рождение и развитие когерентных структур. М.: Физматлит, 2007.
6. Вильгельмссон Х., Вейланд Я. Когерентное нелинейное взаимодействие волн в плазме. М.: Энергоиздат, 1981
7. Сухоруков А.П. Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. М.: Наука, 1988. 232 с.
8. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.
9. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж, Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988.
10. Дж. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
11. А. Пиковский, М Розенблюм, Ю. Куртс. Мир физики и техники: Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 С.
12. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. 176 с.
13. Бриггс П. Двухпоточковая неустойчивость. В сборнике «Достижения физики плазмы». М.: Мир, 1974. С. 132-171.
14. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т.1. М.: Атомиздат, 1975. 272 с.
15. Найфэ А.Х. Методы возмущений. М.: Мир, 1976.

б) дополнительная литература:

1. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.
2. Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
3. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Проблемы нелинейной оптики. М.: Изд. ВИНТИ, 1964.
4. Цытович В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. М. Наука, 1967. 288 с.
5. Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966. 424 с.
6. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984
7. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М. ИЛ, 1959

8. Федорченко А.М., Коцаренко Н.Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и в твердых телах. М.: Наука, 1981.
 9. Д.И. Трубецков, Е.С. Мchedлова, Л.В. Красичков. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. Физматлит, 2005.
 10. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса.
 11. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал. Оптические солитоны. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2005.
 12. Диссипативные солитоны (ред. Н. Ахмедиева, А. Анкевич). М.: Физматлит, 2008. 502 С.
 13. Дж. У. Лич. Классическая механика. М: Изд. иностранной литературы, 1961. 173с.
 14. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. М.: Мир. 1981. 600с.
 15. Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. Мир, 1987. 182 с.
 16. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. М.: Мир, 1989. 323 с.
 17. Солитоны в действии. Сб. под ред. К. Лонгрена и Э. Скотта. М.: Мир, 1981
 18. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П. Теория солитонов: Метод обратной задачи. (Под ред. С.П. Новикова). М.: Наука, 1980.
 19. Захаров В.Е. Гамильтоновский формализм для волн в нелинейных средах с дисперсией. Изв. ВУЗ-ов, Радиофизика. 1974. Т.17, №4, с.431–453.
 20. Aranson I.S., Kramer L. The world of the complex Ginzburg-Landau equation. Reviews of Modern Physics. 2002. V.74, N.1. P.99-143.
 21. Chate H., Manneville P. Phase diagram of the two-dimensional complex Ginzburg-Landau equation. Physica A, 1996, V.224. P.348-368.
 22. Петвиашвили В.И. Неоднородные солитоны. В кн. Нелинейные волны. М.: Наука, 1979. 360с.
 23. Островский Л.А. Нелинейные внутренние волны в океане. В кн. Нелинейные волны. М.: Наука, 1979. 360с.
 24. Островский Л.А. Ударные волны и солитоны. Изв. ВУЗов–Радиофизика, 1976. Т.19, №5-6. С.661-690 (тематический выпуск «Нелинейные волны»).
- в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:
<http://www.rf.unn.ru/generalphysics/ru/education>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 Радиофизика.

Автор _____ Бакунов М.И.

Рецензент _____ Гавриленко В.Г.

Заведующий кафедрой _____ Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета
от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23.