

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**

Введение в теорию нелинейных волн

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Фундаментальная радиофизика

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.03.01 Введение в теорию нелинейных волн относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
ПК-1: Способен анализировать текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики	<p>ПК-1.1: Применяет основные методы анализа текущей научной и научно-технической литературы в области физики и радиофизики</p> <p>ПК-1.2: Анализирует текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики</p>	<p>ПК-1.1: Знать методы решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности</p> <p>ПК-1.2: Знать методы решения стандартных задач профессиональной деятельности в области теории нелинейных волн на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности</p>	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы
ПК-2: Способен осваивать и применять новейшие методы	ПК-2.1: Обладает базовыми знаниями, необходимыми для освоения новейших методов проведения теоретических и	ПК-2.1: Знать основные методы радиофизических измерений характеристик нелинейных	Собеседование	Зачёт: Контрольные

проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	экспериментальных исследований в области радиофизики ПК-2.2: Осваивает и применяет новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	волн  ПК-2.2: Знать основные методы радиофизических измерений характеристик нелинейных волн		вопросы
---	---	--	--	---------

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>0</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>39</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</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	
	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О
Тема 1. Дисперсионное уравнение и энергия волн в слабодиссипативных средах	17	8		8	9
Тема 2. Нелинейное взаимодействие волн	19	9		9	10
Тема 3. Нелинейные волны в консервативных средах со слабой дисперсией	8	3		3	5
Тема 4. Модулированные нелинейные волны в консервативных средах	8	3		3	5

Тема 5. Самоорганизация, структуры и турбулентность диссипативных неравновесных средах	19	9		9	10
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	32	0	33	39

### Содержание разделов и тем дисциплины

-

#### 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 обучающихся включает следующие виды:

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

#### 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 ПК-1:**

Список вопросов для собеседования совпадает с контрольными вопросами

**5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:**

Список вопросов для собеседования совпадает с контрольными вопросами

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

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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 ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых

Оценка	Критерии оценивания
	направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ 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	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 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	При решении	Имеется	Продemonс	Продemonс	Продemonс	Продemonстр

	базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	трированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	трированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	трированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	ирован творческий 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 ПК-1**

**ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ И ЭНЕРГИЯ ВОЛН В СЛАБОДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ**

1. Дисперсионное уравнение и свойства симметрии его решений.
2. Решение задач с начальными и граничными условиями для монохроматических волн. Формализм сопряженной задачи на собственные значения.
3. Две формы записи общего решения линейной задачи для широких волновых пакетов.

4. Переход от дискретной LC-линии к распределенной модели. Дисперсионные уравнения для распределенной и дискретной LC-линий.
5. Моделирование сред с дисперсией в области низких, высоких и промежуточных частот с помощью распределенных LC-линий.
6. Дисперсионные ветви и неустойчивость холодной системы пучок-плазма в приближении плоских волн.
7. Дисперсионные ветви и неустойчивость холодной системы пучок-плазма с ограниченным поперечным сечением. Эффект редукции пространственного заряда.
8. Вывод уравнения для комплексной амплитуды волны пространственного заряда, возбуждаемой слабым сторонним током. Асимптотический метод Боголюбова-Митропольского.
9. Спектрально-операторный формализм. Действие спектрального оператора на квазимонохроматическое волновое поле.
10. Уравнение энергетического баланса и выражение для плотности энергии волн пространственного заряда. Границы применимости понятия волновой энергии.
11. Понятие слабодиссипативной среды на примере волн пространственного заряда в системе пучок-плазма с диссипацией. Баланс волновой энергии в слабодиссипативной среде.
12. Волны с отрицательной энергией (ВОЭ) в неравновесных средах на примере плоских волн пространственного заряда в электронном потоке и в системе пучок-плазма. Формализм ВОЭ в линейных средах.

## НЕИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН

1. Построение уравнений трехволнового резонансного взаимодействия для многопотоковой системы заряженных частиц методом Боголюбова-Митропольского. Графическое определение резонансных волновых триплетов.
2. Соотношения Мэнли-Роу для трехволнового резонансного взаимодействия в консервативных средах и аналогия с процессами распада и слияния квазичастиц в квантовой механике.
3. Распадная неустойчивость ВЧ-волны и «нераспадность» НЧ-волн при трехволновом резонансном взаимодействии в равновесных средах.
4. Качественное исследование трехволнового взаимодействия в фазовом пространстве на эллипсоиде
5. Учет потерь и расстройки от резонанса в уравнениях трехволнового взаимодействия
6. Уравнение для спектральной плотности амплитуды при взаимодействии широких волновых пакетов и переход к узким волновым пакетам.
7. Стационарное резонансное взаимодействие трех волн в пространстве при разных знаках групповых скоростей волн. Особенности параметрического усиления встречных волн на примере вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в газе.

8. Особенности трехволнового резонансного взаимодействия в неравновесных средах. Распад низкочастотных волн и взрывная неустойчивость.

9. Четырехволновое взаимодействие в консервативных средах с кубичной нелинейностью. Самовоздействие волн и нелинейный сдвиг частоты.

10. Самовоздействие волн и возникновение среднего поля в среде с квадратичной нелинейностью (на примере модельного уравнения).

11. Взрывная неустойчивость при резонансном взаимодействии электромагнитных волн положительной энергии в распределенной LC-линии с нелинейной утечкой. Жесткое возбуждение волн при взрывной неустойчивости.

12. Нерезонансное взаимодействие двух неустойчивых волн в активной среде. Эволюция пространственно однородных волн во времени и попутных волн в пространстве. Мультистабильность и конкуренция волн.

13. Нерезонансное взаимодействие двух встречных волн в резонаторе, заполненном активной средой. Условие возникновения пространственно неоднородных режимов генерации.

14. Параметрическая неустойчивость и захват модулированных волн. Условие захвата слабых волн прямоугольным импульсом накачки.

15. Пространственно-временная аналогия и захват слабых волн пучком накачки.

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

#### **НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В КОНСЕРВАТИВНЫХ СРЕДАХ СО СЛАБОЙ ДИСПЕРСИЕЙ.**

1. Вывод уравнения Кортевега де Вриза для распределенной LC-линии со слабой дисперсией в области длинных волн. Одноволновое приближение и метод Боголюбова-Митропольского для нелинейных волн.

2. Стационарные волны в уравнении Кортевега де Вриза. Солитоны и кноидальные волны.

3. Уравнение Кортевега де Вриза для волн на мелкой воде. Влияние потерь на форму стационарной волны. Волнистая и турбулентная боры.

4. Понятия о методе обратной задачи теории рассеяния. Асимптотические свойства решений уравнения Кортевега де Вриза. Аналогия солитонов с частицами.

5. Вывод уравнения Кортевега де Вриза из уравнения для волновых пакетов как основа для построения эталонных уравнений для длинных нелинейных волн.

6. Уравнение Бенджамина-Оно для среды с «квадратичной» дисперсией и одномерные алгебраические солитоны

7. Уравнение Кадомцева-Петвиашвили как обобщение уравнения Кортевега де Вриза для двумерных волн. Двумерные алгебраические солитоны в среде с «положительной» дисперсией.

## МОДУЛИРОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В КОНСЕРВАТИВНЫХ СРЕДАХ

1. Построение нелинейного уравнения Шредингера на основе результатов анализа динамики волновых пакетов.
2. Нелинейное параболическое уравнение для волновых пучков в изотропных средах.
3. Модуляционная неустойчивость бегущей волны и ее интерпретация на языке четырехволнового параметрического процесса.
4. Самофокусировка плоской волны и волновых пучков.
5. Одномерные солитоны огибающей в нелинейном уравнении Шредингера.

## САМООРГАНИЗАЦИЯ, СТРУКТУРЫ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ДИССИПАТИВНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ СРЕДАХ

6. Одномерное уравнение Гинзбурга-Ландау и его двумерное обобщение.
7. Устойчивость когерентных структур в виде бегущих волн в уравнении Гинзбурга –Ландау.
8. Диссипативный предел уравнения Гинзбурга-Ландау. Понятие градиентной системы.
9. Решение диссипативного уравнения Гинзбурга-Ландау в виде вихрей. Вихри как топологические дефекты полного волнового поля.
10. Структуры и турбулентность в двумерном уравнении Гинзбурга-Ландау (галерея феноменов).
11. Термическая конвекция как пример структурообразующей системы. Число Релея и число Прандтля. Нейтральная кривая для конвективных валов.
12. Кольцо неустойчивости на плоскости волновых чисел и уравнение Свифта-Хоенберга.
13. Описание конкуренции в валиковых структур на основе уравнения Свифта-Хоенберга.
14. Описание конкуренции валов и шестигранников в рамках уравнения Свифта-Хоенберга. Устойчивость и предпочтительность шестигранников. Понятие о пенто-гепто дефектах в системе шестигранников.
15. Уравнение Ньюэла-Вайтхеда-Сегеля для конвективных валов. Движение дислокаций в системе искривленных валов.
16. Доменные стенки и их простейшие модели

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

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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

Оценка	Критерии оценивания
	программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ 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	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

Основная литература:

1. 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.
2. 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.
3. Пиковский А. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление / пер. с англ. А. С. Пиковского, М. Г. Розенблюма. - М. : Техносфера, 2003. - 496 с. - (Мир физики и техники). - ISBN 5-94836-020-2 : 270.00., 23 экз.
4. Михайловский Анатолий Борисович. Теория плазменных неустойчивостей : [в 2 т.]. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. - 2-е изд., перераб., доп. - М. : Атомиздат, 1975. - 272 с. : с черт. - 1.78., 16 экз.

Дополнительная литература:

1. Кадомцев Борис Борисович. Коллективные явления в плазме. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Наука, 1988. - 304 с. - 3.10., 12 экз.
2. Скотт Элвин. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике / пер. с англ. С. Я. Вышкинд и Т. М. Таранович ; под ред. Л. А. Островского и М. И. Рабиновича. - М. : Советское радио, 1977. - 367 с. - 2.44., 17 экз.

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

<https://rf.unn.ru/>

## 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): Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук, профессор.

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

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