

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)

УТВЕРЖДЕНО  
решением  
Ученого совета ННГУ  
протокол от  
«30» ноября 2022 г. № 13

**Рабочая программа дисциплины**

Электродинамика высокочастотных и  
оптических разрядов

---

*(наименование дисциплины (модуля))*

Уровень высшего образования  
магистратура

---

*(бакалавриат / магистратура / специалитет)*

Направление подготовки / специальность  
03.04.03 Радиофизика

---

*(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)*

Направленность образовательной программы

Электромагнитные волны в средах

---

*(указывается профиль / магистерская программа / специализация)*

Форма обучения

очная

---

*(очная / очно-заочная / заочная)*

Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.В.ДВ.09.01 "Электродинамика высокочастотных и оптических разрядов" относится к части ООП направления подготовки 03.04.03 Радиофизика, формируемой участниками образовательных отношений.

## 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	
<b>ПК-1:</b>  <i>Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области физики и радиофизики при решении задач своей профессиональной деятельности</i>	ПК-1.1. Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач.	<i>Знать: методы критического анализа и оценки современных научных достижений в области своей профессиональной деятельности</i>  <i>Уметь: определять наиболее актуальные направления исследований в области профессиональной деятельности</i>  <i>Владеть: навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований</i>	Собеседование
	ПК-1.2. Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных	<i>Знать: современные информационные и коммуникационные технологии сбора и анализа большого объема данных</i>  <i>Уметь: систематизировать</i>	Собеседование

	источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий.	и анализировать данные большого объема  Владеть: навыками работы с большим объемом данных, полученных из различных источников	
<p><b>ПК-2:</b></p> <p>Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики и радиофизики и оформлять их результаты</p>	<p>ПК-2.1. Анализирует современное состояние исследований в области физики и радиофизики, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p>	<p>Знать: современное состояние исследований, современные подходы к описанию различных явлений в области своей профессиональной деятельности</p> <p>Уметь: анализировать современное состояние исследований в области физики и радиофизики</p> <p>Владеть: навыками моделирования различных явлений в области физики и радиофизики</p>	Собеседование
	<p>ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p>	<p>Знать: современные подходы к моделированию различных явлений</p> <p>Уметь: выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования</p> <p>Владеть: навыками проведения моделирования или эксперимента для решения конкретной научно-исследовательской задачи</p>	Собеседование
	<p>ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР.</p>	<p>Знать: основные принципы организации научного исследования</p> <p>Уметь: анализировать</p>	Собеседование

		<p><i>процесс выполнения научного исследования и, в случае необходимости, корректировать план исследования на определенных этапах</i></p> <p><i>Владеть: навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов</i></p>	
	<p>ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области физики и радиофизики.</p>	<p><i>Знать: современные подходы к оценке полученных результатов в области своей профессиональной деятельности</i></p> <p><i>Уметь: анализировать полученные данные, формулировать выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области физики и радиофизики</i></p> <p><i>Владеть: навыками оценки полученных результатов и формулировки выводов для выполненной научно-исследовательской задачи</i></p>	Собеседование
<p><i>ПК-3:</i></p> <p><i>Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских</i></p>	<p>ПК-3.1. Использует знание нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР, применяет заданные требования и правила при оформлении рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях.</p>	<p><i>Знать: основные требования к составлению научно-технических отчетов и документации</i></p> <p><i>Уметь: применять заданные требования и правила к оформлению рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях</i></p> <p><i>Владеть: навыками составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов и обзоров,</i></p>	Собеседование

разработок		публикаций	
	ПК-3.2. Представляет результаты НИР академическому и бизнес-сообществу.	<p><i>Знать: основные способы представления и продвижения результатов НИР</i></p> <p><i>Уметь: структурировать презентационный материал, выделять основные результаты деятельности для их представления и расставлять акценты</i></p> <p><i>Владеть: навыками представления результатов НИР перед научным и академическим сообществом</i></p>	Собеседование
	ПК-3.3. Участвует в составлении и подаче конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика.	<p><i>Знать: основные этапы подготовки НИР и составления проекта НИР</i></p> <p><i>Уметь: анализировать проектную документацию на выполнение НИР</i></p> <p><i>Владеть: навыками составления части проектной документации для проведения НИР</i></p>	Собеседование

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>3 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная</b>	

<b>работа):</b> - занятия лекционного типа - занятия семинарского типа ( практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>75</b>
<b>КСР</b>	<b>1</b>
<b>Промежуточная аттестация – зачет</b>	<b>-</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

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					
	Очное	Очно-заочное	Заочное	Очное	Очно-заочное	Заочное	Очное	Очно-заочное	Заочное	Очное	Очно-заочное	Заочное	Очное	Очно-заочное	Заочное	Очное	Очно-заочное	Заочное
Введение. Объемные элементарные процессы	6			1								1				5		
Процессы переноса в газоразрядной плазме	8			2								2				6		
Уравнения баланса частиц и энергии	8			2								2				6		
Пробой газа в статических, высокочастотных и оптических полях	10			2								2				8		
Электродинамика разряда в волновых электромагнитны х пучках	14			4								4				10		
Основные типы ионизационно-полевых неустойчивостей разряда	16			6								6				10		

Механизмы преобразования спектров электромагнитного излучения при пробое	14			5								5			9		
Использование оптических разрядов для генерации электромагнитного излучения в труднодоступных частотных диапазонах	15			4								4			11		
Численные методы моделирования плазменно-полевых структур в высокочастотных и оптических разрядах на высокопроизводительных вычислительных системах	16			6								6			10		
В т.ч.текущий контроль	1			1								1			-		
Промежуточная аттестация - Зачет																	

Содержание разделов дисциплины:

#### Раздел 1. Введение. Объемные элементарные процессы

Объемные элементарные процессы, определяющие кинетику ионизации в газовом разряде (электронный удар, сечения ионизации, диссоциативное и трехчастичное прилипание, электрон-ионная рекомбинация, разрушение отрицательных ионов).

#### Раздел 2. Процессы переноса в газоразрядной плазме

Свободная и амбиполярная диффузия; термодиффузия; теплопроводность, проводимость.

#### Раздел 3. Уравнения баланса частиц и энергии

3.1. Уравнения баланса частиц и энергии в газовом разряде; их стационарные и простейшие динамические решения.

3.2. Процессы нагрева электронной компоненты в разряде.

#### Раздел 4. Пробой газа в статических, высокочастотных и оптических полях

4.1. Пороги пробоя, зависимость скорости лавинообразного процесса от давления газа, частоты и амплитуды электрического поля. Влияние плазмы разряда на величину и структуру поля.

4.2. Основные механизмы насыщения лавины при пробое. Многофотонная и туннельная ионизация.

## Раздел 5. Электродинамика разряда в волновых электромагнитных пучках

Роль процессов рефракции и поглощения волны. Волна пробоя в волновом пучке. Предельные значения электронной концентрации. Разряд вблизи одиночного электрода.

## Раздел 6. Основные типы ионизационно-полевых неустойчивостей разряда

6.1. Вынужденное ионизационное рассеяние.

6.2. Мелкомасштабная плазменно-резонансная неустойчивость. Ионизационно-полевая неустойчивость пространственно-ограниченного разряда. Ионизационно-перегревная неустойчивость в поле электромагнитной волны.

## Раздел 7. Механизмы преобразования спектров электромагнитного излучения при пробое

Частотно-модовая конверсия электромагнитных волн в процессе пробоя. Резонансное и ударное возбуждение плазменных колебаний и их излучение.

## Раздел 8. Использование оптических разрядов для генерации электромагнитного излучения в труднодоступных частотных диапазонах

8.1. Генерация терагерцового излучения при оптическом пробое газа: схемы с внешними статическими полями и схемы самоиндуцированной генерации ионизирующими полями.

8.2. Генерация вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения при оптическом пробое газа.

## Раздел 9. Численные методы моделирования плазменно-полевых структур в высокочастотных и оптических разрядах на высокопроизводительных вычислительных системах

9.1. Методы решения нестационарного уравнения Шредингера для описания процессов ионизации в интенсивных электромагнитных полях.

9.2. Псевдоспектральный метод, быстрое преобразование Фурье, дискретное преобразование Ханкеля. Методы решения системы уравнений Максвелла-Шредингера на многопроцессорных вычислительных системах. Модели пониженной размерности. Алгоритмы распараллеливания.

В рамках лекционных занятий организуются практикумы (семинары), в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает: решение практических заданий и задач, организация семинаров по отдельным разделам дисциплины.

На проведение занятий в форме практической подготовки отводится 4 часа.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:
- изучение, анализ научно-технической информации, обобщение отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования;
- аналитическое и численное исследование физических явлений и процессов радиофизическими методами;
- разработка новых комплексов программ по численному моделированию объектов



различной физической природы;

- планирование и проведение экспериментов с применением современных методов и измерительной аппаратуры (акустической, радиоэлектронной, оптоэлектронной);
  - формулировка новых задач, возникающих в ходе научных исследований;
  - совершенствование известных и разработка новых методов исследований;
  - анализ получаемых результатов и, при необходимости, корректировка направлений исследований;
  - подготовка и оформление научных статей;
  - составление отчетов и докладов о научно-исследовательской работе;
  - участие в научных конференциях, в том числе международных
  - руководство научной работой обучающихся
- компетенций – ПК-1, ПК-2, ПК-3.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий лекционного типа, групповых или индивидуальных консультаций.

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

Используются следующие 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 проведения лекционных и практических занятий, а также в процессе зачетов и экзаменов по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, комплекты слайдов, конспекты лекций.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

включающий:

##### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки,	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	ошибки.	ошибки.	несколько негрубых ошибок	несущественных ошибок	без ошибок.	
<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 незначительными 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 владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<b>превосходно</b>	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
<b>зачтено</b>	<b>отлично</b>	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»
	<b>очень хорошо</b>	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»
	<b>хорошо</b>	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»

	<b>удовлетворительно</b>	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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

### 5.2.1 Контрольные вопросы

Вопрос	Код компетенции (согласно РПД)
1. Уравнение баланса частиц в разряде.	ПК-1
2. Уравнение баланса энергии в разряде.	ПК-1
3. Вероятности многофотонной и туннельной ионизации.	ПК-1
4. Величина пробойного поля при заданных параметрах газа и разрядного промежутка.	ПК-1
5. Инкремент плазменно-резонансной неустойчивости однородного разряда.	ПК-1
6. Ионизационно-полевая неустойчивость пространственно-ограниченного разряда.	ПК-2
7. Ионизационно-перегревная неустойчивость.	ПК-2
8. Дисперсионное уравнение для волн в плазменном слое.	ПК-1
9. Резонансное и ударное возбуждение плазменных колебаний.	ПК-2
10. Механизмы генерации терагерцового излучения при оптическом пробое газа.	ПК-2
11. Механизмы генерации вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения при оптическом пробое газа.	ПК-2
12. Псевдоспектральный метод численного решения нестационарного уравнения Шредингера.	ПК-2
13. Быстрое преобразование Фурье.	ПК-2
14. Дискретное преобразование Ханкеля.	ПК-2
15. Квантовомеханические модели пониженной размерности.	ПК-2
16. Алгоритмы распараллеливания при численном решении системы уравнений Максвелла-Шредингера на многопроцессорных вычислительных системах.	ПК-2

### 5.2.2. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-3

Оформить отчет по итогам выполнения зачетного задания.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Электродинамика высокочастотных и оптических разрядов»**

а) основная литература:

1. Райзер Ю. П. - Физика газового разряда. - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 736 с.
2. Делоне, Н.Б. Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением. [Электронный ресурс] / Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2001. — 320 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/59287> — Загл. с экрана.
3. Юнаковский А. Д. - Начала вычислительных методов для физиков. - Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007. - 220 с.

б) дополнительная литература:

4. Введенский Н. В., Романов А. А., Рябикин М. Ю., Силаев А. А. Редуцированные подходы к квантовомеханическому моделированию ионизационных процессов в сильных полях: Учебно-методическое пособие. — Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. — 37 с. Режим доступа: <http://old.lib.unn.ru/students/src/2716.pdf>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Microsoft Office (номера лицензий: 62421356 (12 шт.), 62421349);
2. Acrobat Professional 11.0 (номера лицензий: 65195558, 6 шт.)
3. Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):  
<http://e.lanbook.com/>; <http://www.biblioclub.ru>.

## **7. 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 - магистратура по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика (утвержден приказом Министерства науки и высшего образования РФ 07.08.2020 № 918).

Автор программы: к.ф.-м.н., доцент Введенский Н.В.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Гавриленко В.Г.

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., проф Кудрин А.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «14» ноября 2022 года, протокол № 08/22.