

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**«Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»**

УТВЕРЖДАЮ  
директор ИЯФ СО РАН,

академик \_\_\_\_\_ П.В.Логачев

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**01.04.08 ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. КАНДИДАТСКИЙ ЭКЗАМЕН.**

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки

**03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации)**

Общая трудоемкость дисциплины: 3 зачетные единицы – **108** часов.

Форма промежуточной аттестации: кандидатский экзамен

Виды деятельности:

Лекции	0	контактная работа обучающихся с преподавателем	8
Семинарские занятия	0		
Самостоятельная работа	56	занятия в активной и интерактивной форме	
Консультации	8		
Зачеты		Экзамены	36

Программа курса «Физика плазмы. Кандидатский экзамен» составлена в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума, для аспирантов, обучающихся по направленности (профилю подготовки) 01.04.08 "Физика плазмы".

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: самостоятельная подготовка студента по программе кандидатского экзамена, консультации с преподавателем, сдача кандидатского экзамена по специальности "Физика плазмы".

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: очные индивидуальные консультации с преподавателем

Промежуточная аттестация: кандидатский экзамен по специальности "Физика плазмы"

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов, в том числе 8 часов индивидуальных консультаций.

Составитель:

к.ф.-м.н. С.В. Полосаткин

Рабочая программа

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины.....	4
2. Место дисциплины в структуре программы обучения.....	4
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины .....	4
4. Структура и содержание дисциплины .....	4
5. Образовательные технологии.....	8
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов.....	8
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	11

# «Физика плазмы. Кандидатский экзамен»

## Рабочая программа дисциплины

### 1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Физика плазмы. Кандидатский экзамен» предназначена для закрепления и контроля знаний аспирантов, специализирующихся в области физики плазмы, по следующим разделам физики: термодинамика плазмы, физическая кинетика, магнитная гидродинамика плазмы, неустойчивость плазмы, колебания и волны в плазме, гидродинамические и тепловые явления в плазме, прикладные проблемы физики плазмы и другие.

### 2. Место дисциплины в структуре программы обучения

Дисциплина «Физика плазмы. Кандидатский экзамен» относится к вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)». Аспиранты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны пройти предусмотренные программой обучения в аспирантуре курсы и иметь детальное представление о всех представленных в программе дисциплины разделах.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

- Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов для решения научных и практических задач (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-1);
- Способность к получению, критическому осмыслению и реферативному изложению научных результатов в области физики (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-2);

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **знать** основные законы и положения включенных в программу кандидатского экзамена разделов физики плазмы
- **уметь** находить и анализировать научную информацию о теоретических моделях физических явлений.

### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Физика плазмы. Кандидатский экзамен» представляет собой полугодовой курс, читаемый в аспирантуре ИЯФ СО РАН. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции (кол-во часов)	Индивидуальные консультации с преподавателем (кол-во часов)		
	2	3	4	5	6	7	8

1	Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	1-2	9		1	8	
2	Магнитная гидродинамика плазмы. Физическая кинетика	3-4	9		1	8	
3	Колебания и волны в плазме. Неустойчивость плазмы	5-6	9		1	8	
4	Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой. Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме	7-8	9		1	8	
5	Элементарные процессы Излучение плазмы	9-10	9		1	8	
6	Диагностика плазмы.	11-12	9		1	8	
7	Прикладные проблемы физики плазмы. Открытые ловушки для удержания плазмы	13-14	9		1	8	
8	Вопросы дополнительной программы	15-16	9		1	8	
9	Кандидатский экзамен по специальности "Физика плазмы"						36
	Итого				8	64	
			72				36

#### Содержание дисциплины:

Содержание дисциплины совпадает с программой кандидатского экзамена по специальности 01.04.08 "Физика плазмы". Дисциплина содержит следующие разделы:

#### 1. Термодинамика плазмы

Понятие плазмы, квазинейтральность, микрополя, дебаевский радиус, идеальная и неидеальная плазма. Условие термодинамического равновесия, термическая ионизация, формула Саха, корональное равновесие, снижение потенциала ионизации. Вырождение плазмы, статистика Больцмана и Ферми-Дирака, модель Томаса-Ферми.

#### 2. Элементарные процессы

Столкновения заряженных частиц, дальное действие, частоты столкновений, столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие), столкновения тяжелых частиц. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом.

#### 3. Физическая кинетика

Уравнения Больцмана и Власова, интеграл столкновений, время максвеллизации и скорость выравнивания температур различных компонент плазмы. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов (ионов). Явления переноса в плазме, электропроводность, диффузия и теплопроводность частиц при наличии и отсутствии магнитного поля. Кинетика возбужденных молекул в плазме.

#### 4. Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях

Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. Дрейфовое приближение, разновидности дрейфового движения. Заряженная частица в высокочастотном поле. Понятие адиабатического инварианта.

### **5. Магнитная гидродинамика плазмы**

Уравнения движения плазмы в магнитном поле, проникновение магнитного поля в плазму, замороженность магнитного поля. Законы сохранения в идеальной одножидкостной МГД. Двухжидкостное приближение.

### **6. Неустойчивость плазмы**

Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегревная и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.

### **7. Колебания и волны в плазме**

Основные типы колебаний и волн в плазме: ленгмюровские электронные и ионные, электромагнитные, ионно-звуковые, магнитозвуковые, альфвеновские. Показатель преломления плазмы, пространственная и временная дисперсия, фазовая и групповая скорости плазменных волн.

### **8. Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме**

Возбуждение и затухание волн в плазме, черенковское излучение, затухание Ландау. Раскачка плазменных колебаний пучками. Квазилинейное приближение.

### **9. Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой**

Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме, геометрическая оптика, плазменный резонанс, циклотронный резонанс, линейная трансформация. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн, неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле. Рассеяние и трансформация волн.

### **10. Излучение плазмы**

Элементарные радиационные процессы, интенсивность спектральных линий, сплошные спектры, вынужденное испускание. Пробеги излучения, перенос излучения в среде, оптически прозрачная и непрозрачная плазма, лучистая теплопроводность.

### **11. Диагностика плазмы**

Зондовые методы, оптические методы, СВЧ-методы, корпускулярные методы, лазерное рассеяние, магнитные измерения.

### **12. Электрический разряд в газах**

Основные виды разряда: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд. Условия стационарности разряда, излучающий разряд в плотной плазме, плазменно-пучковый разряд.

### **13. Гидродинамические и тепловые явления в плазме**

Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой, излучение ударных волн, нелинейные волны теплопроводности. Токовые слои.

### **14. Прикладные проблемы физики плазмы**

Управляемый термоядерный синтез, магнитное удержание и нагрев плазмы в магнитных ловушках и инерциальных системах.

Геофизические и астрофизические плазменные явления ионосфера Земли, межпланетная плазма, звезды.

Плазменные источники излучения, плазменная СВЧ-электроника.

Преобразование тепловой энергии в электрическую: МГД-преобразователи, тепловые преобразователи.

Химические реакции в равновесной и неравновесной плазме. Механизмы и кинетика осуществления плазмохимических реакций, роль заряженных и возбужденных частиц. Энергетика химических реакций в электрических разрядах. Закалка продуктов плазмохимических процессов. Методы диагностики химически активной плазмы.

Взаимодействие плазмы с поверхностью твердых тел. Плазменные технологии (травление, имплантация, упрочнение, нанесение покрытий и пр.).

## 15. Вопросы дополнительной программы

### I. Открытые ловушки

#### I.1 Пробкотрон Будкера-Поста

Адиабатическое удержание заряженных частиц в пробкотроне. Оценка времени жизни частиц в пробкотроне. МГД равновесие и устойчивость плазмы в пробкотроне. Стабилизация желобковой неустойчивости «минимумом В». «Конусные» кинетические неустойчивости плазмы: высокочастотная конусная неустойчивость, дрейфово-конусная неустойчивость, альфвеновская анизотропная ионно-циклотронная неустойчивость.

#### I.2 Амбиполярная ловушка

Амбиполярный потенциал плазмы в пробкотроне. Формирование потенциальных барьеров в амбиполярной ловушке. Формула Пастухова. Процессы переноса в аксиально-несимметричных ловушках.

#### I.3 Многопробочная ловушка

Продольное удержание плазмы в многопробочной ловушке. Стеночное удержание плотной плазмы. Обратный ток. Стабилизация винтовой неустойчивости. Возбуждение ленгмюровской турбулентности пучком релятивистских электронов. Турбулентное подавление продольной теплопроводности.

#### I.4 Газодинамическая ловушка

Газодинамическая ловушка (ГДЛ). Продольные потери частиц и энергии в ГДЛ. Методы стабилизации МГД неустойчивостей плазмы в аксиально-симметричных ловушках. Нейтронный источник на основе ГДЛ. Проект ГДМЛ.

### II. Сильноточные пучки заряженных частиц и их взаимодействие с плазмой

#### I. Генерация сильноточных пучков

Методы получения сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП). Взрывная эмиссия. Плазменный эмиттер электронов. Сильноточные релятивистские диоды. Транспортировка сильноточных пучков в вакууме. Критические токи. Зарядовая и токовая нейтрализация пучков в плазме. Генерация мощных потоков ионов с помощью РЭП. Коллективное ускорение ионов в сильноточных электронных пучках.

#### 2. Коллективная релаксация РЭП в плазме

Возбуждение ленгмюровских колебаний в плазме при инжекции РЭП. Квазилинейный и нелинейные механизмы релаксации. Диссипация энергии колебаний в плазме (нагрев плазмы). Влияние магнитного поля на релаксацию. Нагрев плазмы обратным током, аномальное сопротивление.

### III. Диагностика высокотемпературной плазмы

Электрические и магнитные зонды. Применение зондов для определения параметров плазмы в открытых ловушках. Измерение диамагнетизма плазмы. Методы исследования потоков частиц: датчики плотности тока, энергоанализаторы, калориметры, болометры. СВЧ диагностика плазмы. Регистрация микроволнового излучения плазмы. Корпускулярная диагностика плазмы (активная и пассивная). Оптические диагностики: интерферометрия и спектроскопия плазмы в инфракрасной и видимой областях, пучково-эмиссионная спектроскопия. Лазерное рассеяние и особенности его применения для диагностики неравновесной плазмы. Рентгеновские методы диагностики плазмы. Нейтронные измерения.

### IV. Инжекторы пучков быстрых атомов

Инжекторы пучков быстрых атомов на основе перезарядки положительных ионов. Требования к элементам инжектора. Инжекторы на основе отрицательных ионов. Получение и нейтрализация интенсивных пучков отрицательных ионов.

### V. Техника плазменного эксперимента

Емкостные накопители энергии. Генераторы высоковольтных импульсных напряжений. Коммутаторы больших токов. Магнитные системы открытых ловушек. Сверхпроводящие соленоиды. Особенности вакуумных систем термоядерных установок.

### **5. Образовательные технологии**

Основным методом обучения по курсу является самостоятельная подготовка аспирантов по вопросам, изложенным в программе, с регулярным обсуждением изученных вопросов на индивидуальных консультациях с преподавателем.

### **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов**

Самостоятельная работа аспирантов поддерживается учебниками и учебно-методическими пособиями, приведенными в списке основной и дополнительной литературы, а также обзорными статьями в научных журналах

Текущий контроль успеваемости происходит на индивидуальных консультациях.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра в рамках сдачи кандидатского экзамена по специальности 01.04.08 "Физика плазмы".

### **7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания**

**Образцы вопросов для подготовки к экзамену** – вопросы формулируются идентично названиям подразделов программы курса, представленной выше в п. 4. В экзаменационные билеты включается по два вопроса из основной и дополнительной программы кандидатского экзамена.

### **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

#### **Список основной и дополнительной литературы:**

#### **Основная литература**

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
2. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975.
3. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979.
4. Основы физики плазмы. Т.1, 2 и доп. к т. 2. / Под ред. Р.З. Сагдеева, М.Н. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1984-1985.
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Ч. IV/ Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
6. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. шк., 1988.
7. Трубников Б.А. Теория плазмы: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1996.
8. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез: Учеб. для вузов. М.: МФТИ, 1999.
9. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988.
10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.



12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 3: Квантовая механика Т. 5: Статистическая физика. Т.7: Электродинамика сплошных сред. Т. 10: Физическая кинетика.
13. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.
14. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1998.
15. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгревена. М.: Мир, 1971.
16. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
17. Смирнов Б.М. Физика атома и иона. М.: Энергоатомиздат, 1986.
18. Смирнов Б.М. Физика слабоионизированного газа. М.: Наука, 1972.
19. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. В 2 т. М.: Атомиздат, 1975/1977. Т. 1, 1975; Т. 2, 1977.
20. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
21. Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. М.: Атомиздат, 1978.
22. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
23. Веденов А.А. Задачник по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1981.
24. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.
25. Генин Л.Г., Свиридов В.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
26. Фортов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: ОИХФ, 1984.

### **Дополнительная литература**

1. Котельников И.А. Лекции по физике плазмы. М. : БИНОМ, 2013.
2. Fusion Physics / Edited by Mitsuru Kikuchi, Karl Lackner, Minh Quang Tran. – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.
3. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Будкер Г.И. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т.3, М. : Издательство АН СССР. С.3-31, 1958.
5. Post R.F. The magnetic mirror approach to fusion // Nuclear Fusion. – Vol. 27, No 10. – P.1577-1752. 1987.
6. Рютов Д.Д. Открытые ловушки // УФН 154 565–614 (1988).
7. Ryutov D.D., Berk H.L., Cohen B.I., Molvik A.W., Simonen T.C. Magneto-hydrodynamically stable axisymmetric mirrors // Phys. Plasmas, Vol. 18, 092301 (2011).
8. Чириков Б. В. Динамика частиц в магнитных ловушках // Вопросы теории плазмы / Под ред. Б. Б. Кадомцева. М. : Энергоатомиздат, 1983. – Т. 13. –С. 3–73.

9. Димов Г. И. Амбиполярная ловушка // УФН 175 1185–1206 (2005).
10. Пастухов В. П. Классические продольные потери плазмы в открытых адиабатических ловушках. // Вопросы теории плазмы. Т. 13 / Под ред. Б. Б. Кадомцева. М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 160-204.
11. Рютов Д. Д., Ступаков Г. В. Процессы переноса в аксиально-несимметричных открытых ловушках // Вопросы теории плазмы / Под ред. Б. Б. Кадомцева. М. : Энергоатомиздат, 1983. – Т. 13. – С. 74–159.
12. Векштейн Г. Е. Магнитотепловые процессы в плотной плазме // Вопросы теории плазмы / Под ред. Б. Б. Кадомцева. М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 15. – С. 3–54.
13. Mirnov V.V., Lichtenberg A.J. Multiple mirror plasma confinement // Reviews of Plasma Physics. – 1996. – Vol. 19. – P.. 53.
14. Ivanov A. A. and Prikhodko V. V. Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2013– Vol. 55. – P. 063001
15. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М. : Мир, 1984.
16. Breizman B.N., Ryutov D.D. // Nucl. Fusion, vol.1 4, No 6, p .873, 1979.
17. Михайловский А.Б. Теория: плазменных неустойчивостей. М. : Атомиздат, 1975.
18. Брейзман Б. Н. Коллективное взаимодействие релятивистских электронных пучков с плазмой // Вопросы теории плазмы / Под ред. Б. Б. Кадомцева. М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 15. – С. 55–145.
19. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: ИНТЕЛЛЕКТ, 2009.
20. Голдстон Р. Дж. Диагностика высокотемпературной плазмы в магнитных ловушках // Основы физики плазмы / Под ред. Р.З. Сагдеева и М. Розенблюта. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – Т. 2. – С. 583–627.
21. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. – Новосибирск: НГУ, 1999.
22. Стрелков В.С.. Физические основы методов диагностики плазмы в токамаке. – М. : МИФИ, 2004.
23. Семашко Н.Н., Владимиров А.И., Кузнецов В.В. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М. : Энергоиздат, 1981.
24. Грин Т. Формирование и транспортировка пучков быстрых атомов / К. Барнет, М. Харрисон. Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
25. Монтгомери Д.Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М. : Мир, 1971.
26. Импульсные системы большой мощности: сб. статей. Пер. с англ. ; Под ред. Э.И. Асиновского. М. : Мир, 1981.
27. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985.
28. Глазков А.А., Саксаганский Г.Д. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
29. Итоги науки и техники. Физика плазмы: Серия сб. / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ.
30. Вопросы теории плазмы: Серия сб. / Под ред. М.А. Леонтовича, Б.Б. Кадомцева. М.: Атомиздат.
31. Химия плазмы: Серия сб. / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат

*9. Материально-техническое обеспечение дисциплины*

Специальное материально-техническое оборудование для изучения дисциплины не требуется.