

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

«14» января 2025 г.

**ПРОГРАММА  
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ  
по научной специальности  
1.3.9 Физика плазмы**

Санкт-Петербург

2025 г.

## **1. Общие сведения**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: статистика, элементарные процессы, физическая кинетика, магнитная гидродинамика, электродинамика сплошных сред, физика волновых процессов.

Кандидатский экзамен проводится в устной форме и состоит из 2-х вопросов по билету и презентации по теме диссертационного исследования о выполненной работе за период обучения в аспирантуре, в соответствии с индивидуальным планом работы.

## **2. 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.

## **4. 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.

## **5. 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.

## **6. 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.

## **7. Магнитная гидродинамика плазмы**

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

## **8. Неустойчивость плазмы**

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

## **9. Колебания и волны в плазме**

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

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

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



### **11. 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.

### **12. 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.

### **13. Диагностика плазмы**

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

### **14. 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.

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

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

### **16. 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.).

### **Вопросы для подготовки к кандидатскому экзамену:**

1. Столкновения заряженных частиц друг с другом.
2. МГД и дрейфовые неустойчивости плазмы.
3. Столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие).
4. Заряженные частицы в высокочастотном поле.
5. Столкновения тяжелых частиц. Перезарядка.
6. Неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле.
7. Уравнения Больцмана и Власова.
8. Электронные ленгмюровские волны.
9. Электропроводность плазмы.
10. Ионно-звуковые волны.
11. Диффузия частиц при отсутствии магнитного поля.
12. Магнитозвуковые и альфвеновские волны.

13. Диффузия частиц в магнитном поле.
14. Затухание Ландау.
15. Движение частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.
16. Возбуждение и затухание волн в плазме. Черенковское излучение. Раскачка плазменных колебаний пучками.
17. Разновидности дрейфового движения частиц. Дрейфовое приближение.
18. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов.
19. Уравнения движения плазмы в магнитном поле.
20. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме.
21. Явления переноса в плазме.
22. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн в плазме.
23. Проникновение магнитного поля в плазму. Вмороженность магнитного поля в плазму.
24. Рассеяние волн в плазме.
25. Двухжидкостное приближение в магнитной гидродинамике.
26. Элементарные радиационные процессы.
27. Равновесные конфигурации плазмы в магнитном поле.
28. Основные виды электрического разряда в газах.
29. Понятие плазмы. Идеальная и неидеальная плазма.
30. Оптические методы диагностики плазмы.
31. Термодинамически равновесная плазма. Формула Саха.
32. Зондовые методы диагностики плазмы.
33. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом. Кинетика возбужденных молекул в плазме.
34. Плазменный резонанс. Линейная трансформация волн в плазме.
35. Интенсивность спектральных линий. Сплошные спектры. Перенос излучения в среде, лучистая теплопроводность.
36. Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой.

#### **Рекомендуемая 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", тт.1,2 и дополнение к 2 т., под ред. Сагдеева Р.З., Розенблюта М.Н. М., Энергоатомиздат, 1984-1985.
5. "Энциклопедия низкотемпературной плазмы", вводный том, чч.I-IV, под ред. Фортова В.Е. М., Наука, 2000.
6. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. "Основы электродинамики плазмы". М., Высшая школа, 1988.
7. Трубников Б.А. "Теория плазмы. Учебное пособие для вузов". М., Энергоатомиздат, 1996.
8. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. "Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез. Учебник 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. "Теретическая физика". 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. НГУ, 2000.
14. Силин В.П. "Введение в кинетическую теорию газов". М., Наука, 1998.
15. "Методы исследования плазмы", под ред. Лохте-Хольгрена В. М. Мир, 1971.
16. "Диагностика плазмы", под ред. Хаддлстоуна Р. и Леонарда С. 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". М., Атомиздат, т.1, 1975 и 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. МЭИ, 2001.
26. Фортов В.Е., Якубов И.Т. "Физика неидеальной плазмы". Изд. ОИХФ, 1984.

#### **Дополнительная литература**

1. Серия сб. "Итоги науки и техники. Физика плазмы", под ред. Шафранова В.Д. М., ВИНТИ.
2. Серия сб. "Вопросы теории плазмы", под ред. Леонтовича М.А., Кадомцева Б.Б. М., Атомиздат
3. Серия сб. "Химия плазмы", под ред. Смирнова Б.М. М., Энергоатомиздат.