

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур  
Российской академии наук**

Принято на Ученом совете ОИВТ РАН  
Протокол № 5 от 21.06.2022

**«Утверждаю»**  
Директор ОИВТ РАН

*О.И.е.*

академик Петров О.Ф.

« 21

2022 год



**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

кандидатского экзамена по специальности

**1.3.9 «Физика плазмы»**

по физико-математическим наукам

Направление подготовки «Физика и астрономия» 03.06.01

Москва

2022 год

## **Введение**

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

Программа составлена на основе паспорта соответствующей научной специальности номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021г. №118.

### **1. Управляемый термоядерный синтез с магнитным и инерциальным удержанием, пинчи, лазерный синтез и т.п.**

Управляемый термоядерный синтез, магнитное удержание и нагрев плазмы в магнитных ловушках и инерциальных системах. Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегревная и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости. Лазерный синтез.

### **2. Термодинамика, кинетика (в т.ч. явления переноса), оптика, элементарные процессы в плазме (ионизация, излучение, столкновения и т.п.)**

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

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.

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.

Диэлектрическая проницаемость, плазменная частота.

### **3. Динамика плазмы (волны, неустойчивости, течения, нелинейные явления (самоорганизация, структуры, турбулентность и т.п.), аномальный перенос, электромагнетизм и т.п.)**

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

Самоорганизация, структуры, турбулентность, аномальный перенос. Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях.

### **4. Диагностика плазмы**

Зондовые методы, оптические методы, СВЧ-методы, корпускулярные методы, лазерное рассеяние, магнитные измерения. Уширение и сдвиг спектральных линий, интенсивность континуума, ВАХ.

### **5. Источники и генерация плазмы**

Нагрев в омических печах, изобарический джоулев нагрев, электрические разряды высокого давления. Принципы динамической генерации и диагностики плазмы. Динамическое сжатие плазмы. Сжатие инертных газов мощными ударными волнами. Изозэнтропическое расширение ударно-сжатых металлов. Генерация сверхплотной плазмы в мощных ударных волнах. Неидеальная плазма при воздействии мощных потоков

направленной энергии. Разряды низкого давления, стратифицированные разряды, индукционные разряды.

## **6. Заряженная плазма, пучки частиц в плазме, плазменная электроника**

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

## **7. Плазма в космосе и астрофизике**

Основные физические параметры, характеризующие состояние плазмы. Параметр неидеальности и параметр вырождения. Особенности плазмы недр планет-гигантов (ПГ) Солнечной системы. Плазма в газовых гигантах – Юпитере и Сатурне. Гипотеза об ионизационных (плазменных) и диссоциативных фазовых переходах в недрах ПГ. Методы экспериментального исследования экстремальной плазмы ПГ в земных (лабораторных) условиях. Проблема фазовых переходов в плотном горячем водороде и гелии. Состав «ледяных» гигантов – Урана и Нептуна. Плазма экстрасолнечных ПГ («горячих Юпитеров») и горячих землеподобных планет. Адронная плазма звезд и кварк-глюонная плазма (общие представления) Межзвездная плазма. Проблема термодинамического равновесия. Комплексная (пылевая) плазма в космосе. Пылевые облака и околопланетные кольца. Комплексная плазма в земных лабораториях и на космических станциях.

## **8. Процессы на Солнце и в звездах**

Характерные параметры неидеальности и параметры вырождения в звездах. Звезды главной последовательности и компактные звезды (общие представления). Особенности плазмы белых карликов, нейтронных звезд, кварковых звезд и гибридных кварк-адронных звезд. Вигнеровская кристаллизация плазмы ядер на фоне вырожденных электронов. Плазма Солнца. Три слоя и основные процессы в них: Плазма короны, коронарное равновесие. Плазма внешнего конвективного слоя недр Солнца, плазма

ламинарного ядра. Основные термодинамические параметры плазмы недр Солнца. Степень кулоновской неидеальности. Вырождение электронов. Понятие о гелиосейсмологии: основа метода, измеряемые величины и выявляемые термодинамические параметры. Понятие об эволюции звезд от рождения до гибели. Основные процессы в плазме. Структура звезды в конце жизни. Понятие о взрывах сверхновых 1 и 2 типа. Остаточные звезды и тип плазмы в них.

### **9. Плазменные явления в атмосферах, ионосферах и магнитосферах планет**

Геофизические и астрофизические плазменные явления — ионосфера, ионосфера и магнитосфера планет. Околопланетная плазма. Измерение магнитных полей.

### **10. Взаимодействие плазмы с веществом в других агрегатных состояниях (с поверхностью твердых тел, с пылевыми частицами, с кластерами, аэрозолями, жидкостями и т.п.)**

Взаимодействие плазмы с поверхностью твердых тел. Плазменные технологии (травление, имплантация, упрочнение, нанесение покрытий и пр.). Зарядка пылевых частиц в плазме. Взаимодействие плазмы с кластерами, аэрозолями, жидкостями и т.п.

### **11. Плазменные явления в конденсированном веществе (твердых телах, электролитах и пр.)**

Модель заряженных твердых шаров (физика плазма в электролитах). Плазма жидких металлов — основные представления. Основы зонной теории в металлах. Модель средней атомной ячейки Вигнера–Зейтца и модель Томаса–Ферми в теории плотных горячих металлов.

### **12. Плазмохимия и реакции в плазме**

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.

### **13. Пылевая плазма**

Элементарные процессы в пылевой плазме, неидеальность пылевой плазмы и фазовые переходы, колебания, волны и неустойчивости в пылевой плазме, направления исследований пылевой плазмы.

### **14. Электромагнитное 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.

### **Основная литература**

Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы, Москва, ИД "Интеллект", 2008.

Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975.

Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979.

Основы физики плазмы. Т.1, 2 и доп. к т. 2. / Под ред. Р.З. Сагдеева, М.Н. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1984—1985.

Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Ч. I—IV/ Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.

Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. шк., 1988.

Трубников Б.А. Теория плазмы: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1996.

Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез: Учеб. для вузов. М.: МФТИ, 1999.

Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009, 734 с.

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.

Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.

Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1998.

Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгрена. М.: Мир, 1971.

Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.

Смирнов Б.М. Физика атома и иона. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы. СПб: Из-во Политехнического университета, 2010. 361 с.

Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. В 2 т. М.: Атомиздат, 1975—1977. Т. 1, 1975; Т. 2, 1977.

Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.

Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. М.: Атомиздат, 1978.

Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Веденов А.А. Задачник по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1981.

Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.

Генин Л.Г., Свиридов В.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.

Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2010.

Фортов В.Е., Филинов В.С., Ларкин А.С., Эбелинг В. Статистическая физика плотных газов и неидеальной плазмы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2020.

Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л.- Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. - М.:Наука, 2008 -264 с.

Иосилевский И.Л., Красников Ю.Г., Сон Э.Е., Фортов В.Е. "Термодинамика и транспорт в неидеальной плазме". Москва: Изд-во МФТИ, 2000, ISBN 5-89155-017-2 // [http://en.edu.ru/shared/files/old/4307\\_iksf.pdf](http://en.edu.ru/shared/files/old/4307_iksf.pdf) //

Фортов В.Е. Физика экстремальных состояний на земле и в космосе (М.: Физматлит, 2007)

Фортов В.Е., Якубов И.Т., Храпак А.Г. - Физика Неидеальной Плазмы, ИХФ Черногловка, 1984. Энергоатомиздат, 1994.// Фортов В.Е., Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе; М.: Физматлит, РР. 263 (2008)

Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества; М.: Физматлит, РР. 303 (2009)

Фортов В.Е. Физика высоких плотностей энергии, М.: Физматлит, РР. 505 (2013)



Иосилевский И.Л. Общая характеристика термодинамического описания низкотемпературной плазмы, Энциклопедия Низкотемпературной Плазмы, т.1 (Ред. В.Е.Фортов) М.: Наука, 2000 / с.275.

Иосилевский И.Л. Старостин А.Н. Проблема термодинамической устойчивости в низкотемпературной плазме, "Энциклопедия Низкотемпературной Плазмы", т.1 ( Под ред. В.Е.Фортова) (М.: Наука, 2000) с.327.

Иосилевский И.Л. Эффекты неидеальности в низкотемпературной плазме, Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Том приложений III-1 / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, сс.349-428.

Эбелинг В., Крефт В., Кремп Д. - Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме, МИР, Москва, 1979.

Фортов В.Е. Уравнения состояния вещества. От идеального газа до кварк-глюонной плазмы, М.: ФИЗМАТЛИТ, РР. 492 (2013)

Фортов В.Е. Термодинамика динамических воздействий на вещество - М.: ФИЗМАТЛИТ (2019), 144 с. - ISBN 978-5-9221-1840-8.

#### **Дополнительная литература**

Серия сб. "Итоги науки и техники. Физика плазмы", под ред. Шафранова В.Д. М., ВИНТИ.

Серия сб. "Вопросы теории плазмы", под ред. Леонтовича М.А., Кадомцева Б.Б. М., Атомиздат

Серия сб. "Химия плазмы", под ред. Смирнова Б.М. М., Энергоатомиздат.

**СОГЛАСОВАНО:**

Ученый секретарь ОИВТ РАН,

д.ф.-м.н.

Заведующая аспирантурой, к.ф.-м.н.



Амиров Р.Х.



Мартынова И.А.