

# **ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

кандидатского экзамена по специальности

## **01.04.08 [Физика плазмы]**

по физико-математическим, химическим и техническим наукам

### **Введение**

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

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии Российского научного центра «Курчатовский институт», Института общей физики РАН, Московского физико-технического института (государственного университета), Объединенного института высоких температур РАН, физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Московского государственного инженерно-физического института.

### **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: лэнгмюровские 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. Пробег 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.).

## 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-Хольгрёвена. 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. Итоги науки и техники. Физика плазмы: Серия сб. / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ.
2. Вопросы теории плазмы: Серия сб. / Под ред. М.А. Леонтовича, Б.Б. Кадомцева. М.: Атомиздат.
3. Химия плазмы: Серия сб. / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат.

**Дополнительная программа**  
кандидатского экзамена по специальности  
01.04.08 — "Физика плазмы"

**I. Открытые ловушка**

**1. Одиночный пробкотрон**

Адиабатическое удержание заряженных частиц в пробкотроне. МГД равновесие и устойчивость плазмы в пробкотроне. Стабилизация желобковой неустойчивости «минимумом В». «Конусные» кинетические неустойчивости плазмы: высокочастотная конусная неустойчивость, дрейфово-циклотронная неустойчивость, альфвеновская анизотропная ионно-циклотронная неустойчивость. Оценка времени жизни частиц в пробкотроне. [1—4]

Продольное удержание плазмы в пробкотроне с вращающейся плазмой. Неустойчивости вращающейся плазмы. [3—5]

**2. Амбиполярная ловушка**

Амбиполярный потенциал и квазинейтральность плазмы, удерживаемой в одиночном пробкотроне. Формирование амбиполярного потенциала в амбиполярной ловушке. Удержание ионов в центральном пробкотроне амбиполярной ловушки, формула Пастухова. Амбиполярная ловушка с тепловыми барьерами. Обеспечение МГД устойчивости плазмы средним «минимумом В». Процессы переноса в аксиально-несимметричных амбиполярных ловушках: неоклассическая, резонансная, стохастическая диффузия. [3, 6÷8]

**3. Пробочные ловушки с малой длиной свободного пробега ионов**

Многопробочная ловушка. Продольное удержание плазмы в многопробочной ловушке. Стеночное удержание плотной плазмы. [9, 10].

Газодинамическая ловушка (ГДЛ), Стабилизация желобковой неустойчивости в ГДЛ. Двухкомпонентная ГДЛ. [11, 12]

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

**1. Генерация сильноточных пучков**

Методы получения сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП). Взрывная эмиссия. Сильноточные релятивистские диоды. Транспортировка

сильноточных пучков в вакууме. Критические токи. Зарядовая и токовая нейтрализация пучков в плазме. [13—18]. Генерация мощных потоков ионов с помощью РЭП. Типы ионных диодов. Коллективное ускорение ионов в сильноточных электронных пучках. [19—24]. Магнитная изоляция электронов, магнитно-изолированные вакуумные линии. [14]

## **2. Коллективная релаксация РЭП в плазме**

Возбуждение ленгмюровских колебаний пучком. Квазилинейные и нелинейные механизмы релаксации. Диссипация энергии колебаний в плазме (нагрев плазмы). Влияние магнитного поля на релаксацию. Нагрев плазмы обратным током, аномальное сопротивление. Эксперименты по нагреву плазмы с помощью РЭП. [13, 25, 26]

## **3. Концепции УТС на мощных пучках**

УТС на электронных пучках. Схемы УТС на пучках легких ионов. Предложения по осуществлению УТС на пучках тяжелых ионов. [18].

# **III. Диагностика высокотемпературной плазмы**

Измерение больших импульсных токов и напряжений. Магнитные зонды и диамагнитные датчики. Особенности применения электрических зондов в мощных импульсных установках. Методы исследования плазменных потоков: калориметры, болометры и др. СВЧ-диагностика плазмы. Регистрация микроволнового излучения плазмы. Корпускулярная диагностика плазмы (активная и пассивная). Рентгеновские методы диагностики плазмы. Оптические диагностики: интерферометрия и спектроскопия плазмы в инфракрасной и видимой областях, лазерное рассеяние и особенности его применения для диагностика неравновесной плазмы. [27—33]

# **IV. Инжекторы атомарных пучков**

Структура инжектора. Ионные источники. Ионно-атомарный тракт инжектора. Атомарные инжекторы на основе перезарядки положительных ионов. Перезарядные мишени. Инжекторы на основе отрицательных ионов. [34]

# **V. Техника плазменного эксперимента**

Емкостные накопители энергии. Зарядные устройства емкостных накопителей. Системы управления, автоматизации плазменных установок. Генераторы высоковольтных импульсных напряжений. Коммутаторы больших токов.

Полупроводниковые вентили (тиристоры). Магнитные системы. Конструктивные особенности магнитных систем открытых ловушек. Импульсные соленоиды. Особенности вакуумных систем термоядерных установок. [35—42]

### Литература

1. Будкер Г. И. В кн.: "Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций", т. III, М., Издательство АН СССР, 1958.
2. Вопросы теории плазмы, под. ред. М. А. Леонтовича, т. 5, М., Атомиздат, 1967.
3. Вопросы теории плазмы, под ред. Б. Б. Кадомцева, т. 13, М., Энергоатомиздат, 1983.
4. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. М., Атомиздат, 1975.
5. Lehnert V. Nucl. Fusion, v. 11, p. 485, 1971.
6. Димов Г. И., Закайдаков, Кишеневский М. Е. Физика плазмы, т.2, с. 597, 1976.
7. Димов Г. И., Росляков Г. В. Амбиполярная ловушка. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 8–152, Новосибирск, 1980.
8. Чуянов В. А. В кн.: "Физика плазмы", т.1, ч.1 (Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР). М., 1980.
9. Будкер Г. И. Данилов В. В., Кругляков Э. П., Рютов Д. Д., Шунько З. В. ЖЭТФ, т. 65, с. 562, 1973.
10. Векштейн Г. Е., Рютов Д. Д., Спектор М. Д., Чеботаев П. З. ПМТФ, № 6, с. 3, 1974.
11. Мирнов В. В., Рютов Д. Д. Письма в ЖТФ, т. 5, с. 678, 1979.
12. Мирнов В. В., Нагорный В. П., Рютов Д. Д. Газодинамическая ловушка с двухкомпонентной плазмой. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84–40, Новосибирск, 1984.
13. Breizman V. N., Ryutov D. D. Nucl. Fusion, vol. 14, No. 6, p. 873, 1979.
14. Смирнов В. П. Получение сильноточных пучков электронов. (Обзор). — ПТЭ, № 2, с. 7, 1977.
15. Диденко А. Н., Григорьев В. П., Усов Ю. Мощные электронные пучки и их применение. М., Атомиздат, 1977.
16. Бурцев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. И. и др. УФН, т. 115, № 1, с. 101, 1975.
17. Рухадзе А. А., Богданкевич Д. С., Росинский С. Е., Рухлин В. Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М., Атомиздат, 1980.

18. Миллер Р. Введение в физику сильнотоочных пучков заряженных частиц. М., "Мир", 1984.
19. Гапонович В. Г., Коломенский А. А. Известия ВУЗов (Физика), № 10, с. 59, 1979.
20. Рютов Д. Д. В сб.: "Коллективные методы ускорения", Дубна, с. 81, 1982.
21. Быстрицкий В. М., Диденко А. Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
22. Рютов Д. Д., Ступаков Г. В. Физика плазмы, т. 2; вып. 4, с. 566; вып. 5, с. 767, 1976.
23. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Койдан В. С., Рютов Д. Д. Письма в ЖЭТФ, т. 24, вып. 1, с. 19, 1976.
24. Бурдаков А. В., Койдан В. С., Рогозин А. И., Чикунов В. В. ЖЭТФ, т. 80, вып. 4, с. 1391, 1984.
25. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Койдан В. С. и др. Письма в ЖЭТФ, т. 27, вып. 3, с. 173, 1978.
26. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Koidan V. S. et al. Intern. Conf. on Plasma Physics, Lausanne, Switzerland, 1984.. Proc. Invited papers, vol. 1, p. 285.
27. Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хадлстоуна и С. Леонарда. М., «Мир», 1971.
28. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М., «Мир», 1971.
29. Подгорный И. М. Лекции по диагностике плазмы. М., Атомиздат, 1968.
30. Диагностика плазмы. Под ред. С. Ю. Лукьянова, М., Атомиздат, 1973.
31. Диагностика плазмы. Под ред. М. И. Пергамента, М., Энергоиздат, 1981.
32. Кузнецов Э. И., Щеглов Д. А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М., Атомиздат, 1974.
33. Пятницкий Л. Н., Лазерная диагностика плазмы. М., Атомиздат, 1978.
34. Семашко Н. Н., Владимиров А. И., Кузнецов З. З. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М., Энергоиздат, 1981.
35. Накопление и коммутация энергии большой плотности. М., «Мир», 1979.
36. Импульсные системы большой мощности. М., «Мир», 1981.
37. Итоги науки и техники. Серия «Физика плазмы», т. 1, ч. 1, 2; т. 2; т. 3.
38. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. Королькова В. Г. М., Атомиздат, 1970.
39. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.

40. Ковальчук Б.М., Кремнев В. В., Поталицын Ю. Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. М., Наука, 1979.
41. Монтгомери Д. Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М., "Мир", 1971.
42. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М., Советское радио, 1974.