

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Колачевский Н.Н.



«24» января 2022 г.

## **ПРОГРАММА**

**кандидатского экзамена по специальности**

**1.3.9**

**«Физика плазмы»**

**по физико-математическим и техническим наукам**

Программа  
содержит 6 стр.

Москва, 2022

## **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 по физике Высшей аттестационной комиссии 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 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, перегреваемая 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, ионнозвуковые, магнито-звуковые, 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.).

#### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Франк-Каменецкий, Д. А. Лекции по физике плазмы: учебное пособие ИД "Интеллект", 2008, Физтеховский учебник.
2. В. Е. Голант, Основы физики плазмы: учебное пособие для вузов Лань, 2011
3. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме Ленанд, 2015
4. В. Е. Голант, А. П. Жилинский, И. Е. Сахаров Основы физики плазмы: учебное пособие для вузов Лань, 2011
5. Франк-Каменецкий, Д. А. Лекции по физике плазмы : учебное пособие ИД "Интеллект", 2008

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Д. Ландау, Е. М. Лифшиц Теоретическая физика. В 10 т. Т.3. Квантовая механика: нерелятивистская теория : учебное пособие для вузов ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под ред. Л. П. Питаевского Теоретическая физика. В 10 т. Т.2. Теория поля :учебное пособие для вузов ФИЗМАТЛИТ, 2014
3. Л.Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под ред. Л. П. Питаевского Теоретическая физика. В 10 т. Т.8. Электродинамика сплошных сред : учебное пособие для ВУЗов ФИЗМАТЛИТ, 2005.
4. В. Н. Очкин, Спектроскопия низкотемпературной плазмы ФИЗМАТЛИТ, 2010,
5. Кролл Н., Трайвелпис А. "Основы физики плазмы". М., Мир, 1975.
6. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. "Физика плазмы для физиков". М., Атомиздат, 1979.
7. "Основы физики плазмы", тт.1,2 и дополнение к 2 т., под ред. Сагдеева Р.З., Розенблюта М.Н. М., Энергоатомиздат, 1984-1985.
8. "Энциклопедия низкотемпературной плазмы", вводный том, чч.I-IV, под ред. Фортова В.Е. М., Наука, 2000.
9. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. "Основы электродинамики плазмы". М., Высшая школа, 1988.
10. Трубников Б.А. "Теория плазмы. Учебное пособие для вузов". М., Энергоатомиздат, 1996.
11. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. "Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез. Учебник для вузов". М., МФТИ, 1999.
12. Кадомцев Б.Б. "Коллективные явления в плазме". М., Наука, 1988.
13. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. "Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений". М., Наука, 1966.
14. Райзер Ю.П. "Физика газового разряда". М., Наука, 1987.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. "Теоретическая физика". М., Наука. т.3 "Квантовая механика", т.5 "Статистическая физика", т.7 "Электродинамика сплошных сред", т.10 "Физическая кинетика".
16. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. "Термодинамика, статистическая физика и кинетика". Новосибирск, изд. НГУ, 2000.
17. Силин В.П. "Введение в кинетическую теорию газов". М., Наука, 1998.
18. "Методы исследования плазмы", под ред. Лохте-Хольгревена В. М. Мир, 1971.
19. "Диагностика плазмы", под ред. Хаддлстоуна Р. и Леонарда С. М., Мир, 1967.
20. Смирнов Б.М. "Физика атома и иона". М., Энергоатомиздат, 1986.
21. Смирнов Б.М. "Физика слабоионизированного газа". М., Наука, 1972.

22. Михайловский А.Б. “Теория плазменных неустойчивостей”. М., Атомиздат, т.1, 1975 и т. 2, 1977.
23. Русанов В.Д., Фридман А.А. “Физика химически активной плазмы”. М., Наука, 1984.
24. Иванов А.А., Соболева Т.К. “Неравновесная плазмохимия”. М., Атомиздат, 1978.
25. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. “Диагностика неравновесной химически активной плазмы”. М., Энергоатомиздат, 1985.
26. Веденов А.А. “Задачник по физике плазмы”. М., Атомиздат, 1981.
27. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. “Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы”. М., Наука, 1982.
28. Генин Л.Г., Свиридов В.Г. “Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах”. М., изд. МЭИ, 2001.
29. Фортов В.Е., Якубов И.Т. “Физика неидеальной плазмы”. Изд. ОИХФ, 1984.
30. Серия сб. ”Итоги науки и техники. Физика плазмы”, под ред. Шафранова В.Д. М., ВИНТИ.
31. Серия сб. ”Вопросы теории плазмы”, под ред. Леонтовича М.А., Кадомцева Б.Б. М., Атомиздат
32. Серия сб. “Химия плазмы”, под ред. Смирнова Б.М. М., Энергоатомиздат. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. школа, 1978
33. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979
34. Ахиезер А.И. (ред.) Электродинамика плазмы. М.: Наука, 1974
35. Бекефи Дж. Радиационные процессы в плазме. М.: Мир, 1971
36. Бурштейн Э.Л., Воскресенский Г.В. Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками. М.: Атомиздат, 1970
37. Вильхельмссон Х., Вейланд Я. Когерентное нелинейное взаимодействие волн в плазме. М.: Энергоиздат, 1977
38. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974
39. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976
40. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973 ]
41. Иванов А.А. Физика сильнонеравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977
42. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976
43. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. М.: ИЛ, 1959
44. Климонтович Ю.Л. Кинетическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы. М.: Наука, 1975
45. Котельников И.А., Ступаков Г.В. Лекции по физике плазмы. Нсб.: НГУ, 1996
46. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975 .
47. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1974
48. Ленерт Б. Динамика заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1967
49. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 1. М.: ГосАтомИздат, 1963
50. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 2. М.: ГосАтомИздат, 1963
51. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 3. М.: ГосАтомИздат, 1963
52. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 4. М.: Атомиздат, 1964
53. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 5. М.: Атомиздат, 1967
54. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 6. М.: Атомиздат, 1972 ]
55. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 7. М.: Атомиздат, 1973
56. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 8. М.: Атомиздат, 1974
57. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 9. Неустойчивости токамаков. Нелинейные волны. Солитоны. М.: Атомиздат, 1979

58. Леонтович М.А. (ред.) Вопросы теории плазмы. Выпуск 10. Нелинейная динамика. М.: Атомиздат, 1980
59. Леонтович М.А. (ред.) Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Том 1. М.: Изд-во АН СССР, 1958
60. Леонтович М.А. (ред.) Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Том 2. М.: Изд-во АН СССР, 1958
61. Леонтович М.А. (ред.) Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Том 3. М.: Изд-во АН СССР, 1958
62. Леонтович М.А. (ред.) Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Том 4. М.: Изд-во АН СССР, 1958
63. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975
64. Лонгмайр К. Физика плазмы. Элементарный курс. М.: Атомиздат, 1966
65. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980
66. Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: Наука, 1975
67. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969
68. Михайловский А.Б. Неустойчивости плазмы в магнитных ловушках. М.: Атомиздат, 1978
69. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 1980
70. Рабинович М.С. (ред.) Достижения физики плазмы. М.: Мир, 1974
71. Силин В.П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М.: Наука, 1973
72. Ситенко А.Г. Флуктуации и нелинейное взаимодействие волн в плазме. К.: Наук. думка, 1977
73. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980
74. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974
75. Спитцер Л. Физика полностью ионизованного газа (2-е изд.). М.: Мир, 1965
76. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975
77. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004
78. Цыгович В.Н. Теория турбулентной плазмы. М.: Атомиздат, 1971
79. Шкаровский И., Джонстон Т., Бачинский М. Кинетика частиц плазмы. М.: Атомиздат, 1969
80. Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. М.: Мир, 1969
81. Эккер Г. Теория полностью ионизованной плазмы. М.: Мир, 1974

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий отделом  
аспирантуры ФИАН



В.В. Губернов