

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**Федеральный исследовательский центр**  
**«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»**  
**(ИОФ РАН)**

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИОФ РАН,  
чл.-корр. РАН



С.В. Гарнов

\_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

Специальность: 1.3.9. Физика плазмы

г. Москва  
2022 год

Рабочая программа дисциплины «Физика плазмы» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили: Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., проф., главный научный сотрудник.  
Скворцова Н.Н., д.ф.-м.н., проф., ведущий научный сотрудник.

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН  
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

## **Аннотация**

Учебная дисциплина «Физика плазмы» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Физика плазмы» обучающиеся далее – аспиранты) получают базовые знания в области физики плазмы и плазменных технологий; о физических явлениях, лежащих в основе физики плазмы; применении физики плазмы в плазмохимии, технологиях СВЧ, управляемом термоядерном синтезе, о диагностике плазмы.

Дисциплина «Физика плазмы» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая анализ основных научных и методологических проблем, возникающих на современном этапе развития радиофизики, и получение представления о тенденциях развития данной отрасли науки.

Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов практические подходы к решению современных проблем в области радиофизики и смежных областях естественных наук. Дисциплина «Физика плазмы» также направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Физика плазмы» составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и итоговой аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 3, 4 и 5 семестрах). Итоговая аттестация проводится в рамках кандидатского экзамена по специальности «Физика плазмы» (6 семестр).

### **1. Цель изучения дисциплины**

Цель изучения дисциплины состоит в освоении обучающимися фундаментальных знаний в области физики плазмы, овладении методами и выработке практических навыков решения задач по физике плазмы, формировании умений, необходимых для успешного осуществления научно-исследовательской деятельности в области физики плазмы.

Дисциплина «Физика плазмы» предполагает освоение аспирантами фундаментальных знаний в области физики плазмы; формирование правильных теоретических подходов к численному и модельному анализу плазменных процессов; усвоение аспирантами фундаментальных знаний в области физики плазмы и плазменных технологий; рассмотрение и анализ физических явлений, лежащих в основе физики плазмы; обучение методами и возможными подходами к проблеме физики плазмы, а также пониманием способов их практического применения; изучение конструкций плазменных установок, освоение основных теоретических методов, применимых в этой области физики; обсуждения отдельных примеров применения физики плазмы в плазмохимии, технологиях СВЧ, управляемом термоядерном синтезе, диагностики плазмы как лабораторного объекта, обучение аспирантов применению современных методов диагностики для исследования физических процессов в установках по магнитному удержанию высокотемпературной плазмы, экспериментах по созданию газового разряда и по исследованиям в области плазмохимии.

### **2. Задачи дисциплины**

1) освоение аспирантами базовых знаний в области физики плазмы как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей научно-технические основы современных инновационных сфер деятельности;

2) обучение аспирантов основным принципам решения задач в области физики плазмы и освоение основных теоретических методов, применимых к описанию явлений в этой области физики;

3) формирование правильных теоретических подходов к выполнению научных исследований в области физики плазмы;

4) формирование углубленного представления по базовым понятиям физики плазмы, законам электродинамики плазмоподобных сред; формирование теоретических представлений о физических процессах, происходящих в плазмоподобных средах и при воздействии плазменных потоков на вещество;

5) выявление естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в области физики плазмы и УТС;

6) формирование навыков решения задач в области физики плазмы и УТС, с привлечением современного математического аппарата теоретической физики;

7) овладение экспериментальными методами и возможными методическими подходами анализа явлений в физике плазмы, а также пониманием способов их практического применения;

8) формирование базовых знаний по численному и модельному анализу плазменных процессов.

### **3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Физика плазмы» относится к элективным дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Дисциплина «Физика плазмы» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Изучение дисциплины «Физика плазмы» опирается на знания базовых разделов математики, математической физики, теории вероятности, экспериментальной и теоретической физики, астрономии, оптики, радиофизики, радиотехники, электротехники, химии, приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

### **4. Требования к результатам освоения дисциплины**

Изучение дисциплины «Физика плазмы» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области физики плазмы, а также в смежных и междисциплинарных областях;

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области физики плазмы.

Обучающиеся должны **знать**:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях в области физики плазмы;
- современные проблемы физики плазмы;
- основные теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях применительно к объектам физики плазмы;
- новейшие открытия естествознания в физике плазмы;
- постановку проблем математического моделирования в области физики плазмы;
- представление о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
- области применения методов изучения физики плазмы;
- физическую основу каждого метода; перечень характеристик, которые можно измерить с помощью каждого метода; диапазоны значений измеряемых характеристик.
- понятия и законы, их применение для исследования плазмы, а также границы применимости;

- принципы работы, устройство и области применения различного лабораторного оборудования.
- последовательность действий, выполняемых в программном обеспечении при проведении эксперимента; назначение параметров для настройки лабораторных установок; алгоритм выбора значений параметров для настройки лабораторных установок.

Обучающиеся должны **уметь**:

- использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от влияний несущественных факторов при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальный выбор экспериментов в области физики плазмы.
- выбирать лабораторное оборудование под конкретную задачу; планировать необходимые эксперименты; делать анализ их результатов;
- проводить анализ результатов эксперимента, обрабатывать и объяснять результаты, с учетом ошибок и погрешностей проведения эксперимента;
- использовать программное обеспечение для проведения эксперимента, обработки и анализа результатов эксперимента; настраивать программное обеспечение под конкретную задачу.
- представлять решения с использованием средств компьютерной графики и моделирования.
- представлять научные результаты по теме диссертационной работы в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях.

Обучающиеся должны **владеть**:

- планированием физического эксперимента в области физики плазмы;
- научной картиной мира;
- математическим моделированием физических задач в области физики плазмы.
- математическими методами описания задач из области физики плазмы;
- навыками использования программного обеспечения и основными приемами для проведения и обработки экспериментальных данных;
- навыками обращения с компьютерной техникой и применения типовых и разработанных компьютерных программ в указанных областях;
- математическими методами анализа экспериментальных данных
- навыком свободного использования фундаментальных физических представлений в сфере профессиональной деятельности.

## 5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Физика плазмы» составляет 5 зач. ед. (180 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

**Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ**

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
<b>Общая трудоёмкость</b> дисциплины по учебному плану	<b>5</b>	<b>180</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Аудиторная работа:</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
лекции (Л)		60	36	24	-	-
семинары (С)		12	-	12	-	-
<b>Самостоятельная работа:</b>	<b>2</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>32</b>	<b>36</b>
реферат		12	6	6	-	-
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)		52	10	10	32	-
Подготовка к зачёту		8	2	2	4	-
Подготовка к экзамену		36	-	-	-	36
<b>Вид контроля (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)</b>			<b>З</b>	<b>З</b>	<b>З</b>	<b>Э</b>

## 6. Содержание дисциплины

Таблица 2

### Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Раздел 1. Физика плазмы				
Тема 1.1. Введение в физику плазмы	2	2	0	0
Тема 1.2. Радиус Дебая.	3	2	0	1
Тема 1.3. Движение заряженной частицы в постоянных и однородных электромагнитных полях.	3	2	0	1
Тема 1.4. Движение заряженной частицы в неоднородных электромагнитных полях.	3	2	0	1
Тема 1.5. Адиабатические инварианты. Траектория частиц в открытой ловушке.	3	2	0	1
Тема 1.6. Элементарные процессы в плазме.	3	2	0	1
Тема 1.7. Теоретические модели, используемые для исследования плазмы. Физическая кинетика.	3	2	0	1
Тема 1.8. Проводимость и диффузия в плазме. Уравнение Ланжевена.	3	2	0	1
Тема 1.9. Теоретические модели. Магнитная гидродинамика.	3	2	0	1
Тема 1.10. Магнитогидродинамические колебания.	3	2	0	1
Тема 1.11. Колебания и волны в плазме.	3	2	0	1
Тема 1.12. Физические плазменные процессы за пределами Земли.	3	2	0	1
Тема 1.13. Электрический разряд в газах.	3	2	0	1
Тема 1.14. Управляемый термоядерный синтез.	3	2	0	1
Тема 1.15. Дополнительные методы нагрева	3	2	0	1

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
плазмы				
Тема 1.16. Плазмохимия.	5	4	0	1
Тема 1.17. Комплексная или пылевая плазма.	5	2	0	3
<b>Всего за 3 семестр</b>	<b>54</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>18</b>
Раздел 2. Диагностика плазмы				
Тема 2.1. Зондовая диагностика плазмы.	6	2	3	1
Тема 2.2. Радиофизические методы исследования плазмы.	4	2	0	2
Тема 2.3. Интерферометрия плазмы.	3	2	0	1
Тема 2.4. Применение рефлектометров в физике плазмы.	4	2	0	2
Тема 2.5. Микроволновое рассеяние.	3	2	0	1
Тема 2.6. Допплеровская рефлектометрия	7	2	3	2
Тема 2.7. Оптические методы исследования плазмы.	6	2	3	1
Тема 2.8. Диагностика электронно-циклотронного излучения плазмы.	4	2	0	2
Тема 2.9. Методы рентгеновской диагностики плазмы.	3	2	0	1
Тема 2.10. Измерение полных потоков энергии, покидающих плазму.	4	2	0	2
Тема 2.11. Методы, основанные на измерении магнитных потоков.	6	2	3	1
Тема 2.12. Диагностические комплексы для исследования плазмы в тороидальных плазменных установках.	4	2	0	2
<b>Всего за 4 семестр</b>	<b>54</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>18</b>
Раздел 3. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины	36	0	0	36
<b>Всего за 5 семестр</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности	36	0	0	36
<b>Всего за 6 семестр</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
<b>Итого по дисциплине</b>	<b>180</b>	<b>72</b>	<b>0</b>	<b>108</b>

### 1 раздел (3 СЕМЕСТР) Физика плазмы

**Тема 1. Введение в физику плазмы.** Ирвинг Ленгмюр. Термин «плазма» (генезис плазмы, или история одного слова). Наблюдение плазмы до начала XX века. Плазменные установки вокруг человека в XXI веке. Система единиц, которая используется в физике плазмы. Справочник “NRL Plasma Formulary”. Генерация плазмы. Устройство наиболее распространенного плазменного прибора – люминесцентной лампы. Ионизированные газы и плазма. Квазинейтральность плазмы.

**Тема 2. Радиус Дебая.** Число частиц в дебаевской сфере, влияние этого параметра на свойства плазмы. Плавающий потенциал Ленгмюровского зонда. Плазменное приближение. Параметры плазмы в различных условиях. Классическая и вырожденная плазма. Идеальная и неидеальная плазма. Характерные параметры лабораторной и космической плазмы.

**Тема 3. Движение заряженной частицы в постоянных и однородных электромагнитных полях.** Движение заряженной частицы. Сохранение энергии. Однородное электростатическое поле. Однородное постоянное магнитное поле. Однородные электростатическое и магнитное поля. Дрейфовая скорость. Дрейфовая скорость в гравитационном поле.

**Тема 4. Движение заряженной частицы в неоднородном и непостоянном магнитном поле.** Движение в сильном медленно меняющемся магнитном поле. Дрейфовое приближение. Градиентный дрейф. Центробежный дрейф. Поведение плазмы в магнитном поле тороидального соленоида.

**Тема 5. Адиабатические инварианты. Траектория частиц в открытой ловушке.** Первый адиабатический инвариант ( $\mu$ ). Открытые магнитные ловушки. Описание газодинамической ловушки (ГДЛ). Второй адиабатический инвариант ( $J$ ). Третий адиабатический инвариант ( $\Phi$ )

**Тема 6. Элементарные процессы в плазме.** Равновесие. Ионизация и рекомбинация, основные процессы. Виды равновесия. Степень ионизации. Зависимость ионизации от параметров плазмы, от потенциала плазмы. Термодинамическое равновесие. Функции распределения заряженных частиц. Кинетическое уравнение для функций распределения. Столкновительный интеграл. Распределение Максвелла-Больцмана. Формула Саха. Формирование плазмы при нагреве газа. Причины отклонения от равновесия в реальных условиях. Релаксация импульса и энергии в плазме. Распределение скоростей электронов в электрическом поле. Изотропная и направленная составляющие функции распределения. Функция распределения Дрювестейна, убегающие электроны. Влияние различных столкновений на функцию распределения. Сравнение времени релаксации электронной компоненты, ионной компоненты и времени выравнивания температур.

**Тема 7. Теоретические модели, используемые для исследования плазмы. Физическая кинетика.** Фазовое пространство. Функция распределения. Средняя скорость и концентрация частиц. Бесстолкновительное уравнение Больцмана. Релаксационное приближение для столкновительного члена. Уравнение Власова

**Тема 8. Проводимость и диффузия в плазме. Уравнение Ланжевена.** Линеаризация уравнения Ланжевена. Проводимость постоянного тока и подвижность электронов. Обобщенный закон Ома. Проводимость переменного тока и подвижность электронов. Проводимость с учетом движения ионов. Плазма как диэлектрик. Диффузия свободных электронов. Диффузия электронов в магнитном поле. Амбиполярная диффузия. Диффузия в полностью ионизированной плазме.

**Тема 9. Теоретические модели, используемые для исследования плазмы. Магнитная гидродинамика.** Иерархия плазменных моделей. Гидродинамические модели. Вывод уравнения непрерывности методом гидродинамики. Модель проводящей жидкости. Идеальная проводимость и дрейфовое движение. Вмороженное поле. Диффузия магнитного поля. Двухжидкостная магнитогидродинамика.

**Тема 10. Магнитогидродинамические колебания.** Магнитогидродинамические колебания. Продольные звуковые волны. Альфвеновские волны. Магнитозвуковые волны. Уравнение малых колебаний. Линейные волны. Дисперсия волн в двухжидкостной гидродинамике. Ионный звук. Ионно-звуковые флуктуации в низкотемпературной плазме установки ТАУ-1

**Тема 11. Колебания и волны в плазме.** Движение заряженных частиц в высокочастотном поле. Высокочастотная проводимость плазмы. Эффективная электрическая проницаемость. Распространение электромагнитных волн в плазме при отсутствии магнитного поля. Распространение поперечных волн. Продольные волны. Пространственная дисперсия. Электронные и ионные ветви. Затухание Ландау. Генерация волн при взаимодействии пучков заряженных частиц с плазмой. Влияние магнитного поля на распространение волн в плазме. Продольное распространение волн. Электронный и ионный циклотронный резонансы. Альфвеновские волны. Поперечное распространение волн. Резонансы на гибридных частотах. Магнитозвуковые волны. Распространение волн в неоднородной плазме. Гиротроны - приборы для нагрева плазмы при электронно-циклотронном резонансном поглощении.



**Тема 12. Физические плазменные процессы за пределами Земли.** Магнитосфера земли. Процессы, на солнце. Исследования пересоединения магнитных линий на лабораторной установке «токовый слой»

**Тема 13. 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.

**Тема 14. Управляемый термоядерный синтез.** Тороидальные ловушки. Реакции термоядерного синтеза. Идея магнитного удержания Сахарова и Тамма. Критерий Лоусона. Токамак. Структура магнитного поля. Стелларатор. Стелларатор Л-2М. Структура магнитного поля. Температура и плотность плазмы. Флуктуации. Управляемый термоядерный синтез (лазерный и инерционный). ITER.

**Тема 15. Дополнительные методы нагрева плазмы.** Электронно-циклотронный нагрев плазмы. Гиротроны – мазеры на электронно-циклотронном резонансе. Комплекс МИГ-3 стелларатора Л-2М. Комплекс электронно-циклотронного нагрева на ITER.

**Тема 16. Плазмохимия.** 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.).

**Тема 17. Комплексная или пылевая плазма.** Пылевая плазма. Модели зарядки частиц. Перезарядка. Плазменные пылевые структуры.

## **2 раздел (4 СЕМЕСТР) Диагностика плазмы**

**Тема 1. Зондовая диагностика плазмы.** Одиночный ленгмюровский зонд. Контактные методы измерения плавающего потенциала плазмы, плотности и температуры плазмы. Трехштырьковый зонд. Измерение потока частиц плазмы (флуктуационного потока частиц).

**Тема 2. Радиофизические методы исследования плазмы.** Краткие сведения из истории развития радиофизических методов исследования плазмы. Обзор существующих методов – интерферометрия, рефлектометрия, коллективное рассеяние, томсоновское рассеяние. Задачи дисциплины и связь ее с другими общепрофессиональными и специальными дисциплинами.

**Тема 3. Интерферометрия плазмы.** Типы интерферометров. Построение распределения плотности среды (коэффициента преломления) по интерферометрическим измерениям (методом абелизации и др.). Источники погрешностей при интерферометрии.

**Тема 4. Применение рефлектометров в физике плазмы.** Рефлектометр как измеритель доплеровского смещения частоты и измеритель скорости движения объекта. Измерение радиального профиля концентрации плазмы с помощью рефлектометра. Физика формирования сигнала рефлектометра при нормальном и наклонном падении СВЧ-пучка на поверхность плазмы.

**Тема 5. Микроволновое рассеяние.** Виды микроволнового рассеяния на колебаниях и неоднородностях среды. Рассеяние Брэгга, Томсона. Углы и объем рассеяния. Частотные диапазоны излучений, применяемых в диагностиках рассеяния – угловые и энергетические характеристики в зависимости от частоты. Пространственное разрешение и разрешение по масштабам неоднородностей (волновым числам).

**Тема 6. Доплеровская рефлектометрия** Доплеровская рефлектометрия. Анализ пологоидального вращения плазмы в тороидальных установках. Исследование параметров краевой турбулентности плазмы. Корреляционная рефлектометрия. Спектральный Фурье-анализ временных выборок, измеренных доплеровской рефлектометрией. Оценка комплексных спектров по двум каналам доплеровского рефлектометра. Нормировка, временные окна, сглаживание. Определение скорости вращения по комплексному Фурье-спектру.

**Тема 7. Оптические методы исследования плазмы.** Тормозное, рекомбинационное. Линейчатый спектр. Использование NISTовских таблиц для расшифровки спектров. Отношение линий. Уширение Штарковского, Доплеровское. Молекулярные спектры в низкотемпературной плазме. Излучения линий водорода в тороидальных установках как критерий перехода к режиму улучшенного удержания плазмы. Определение температуры по континууму оптических спектров (метод Вина). Определение температуры по относительной интенсивности линий. Определение температуры по спектрам двух атомных молекул.

**Тема 8. Диагностика электронно-циклотронного излучения плазмы.** Циклотронное излучение. Диагностика ЭЦИ для определения профиля температуры электронов. Определение профиля распределения температуры электронов на стеллараторе Л-2М.

**Тема 9. Методы рентгеновской диагностики плазмы.** Рентгеновское излучение в тороидальных плазменных установках. Измерений температуры по рентгеновскому излучению.

**Тема 10. Измерение полных потоков энергии, покидающих плазму.** Статические болометры. Динамические болометры. Принцип действия болометра с терморезистором. Абсолютная чувствительность болометров. Значение измерений полных потоков энергии из плазмы. Оценка времени удержания энергии в плазме из таких измерений.

**Тема 11. Методы, основанные на измерении магнитных потоков.** Измерения полного тока в тороидальной системе. Пояс Роговского. Следствия из закона сохранения электромагнитной энергии в тороидальном плазменном шнуре. Аналог уравнения Кирхгофа для плазменного шнура в токамаке. Измерения напряжения обхода. Оценка средней электронной температуры  $T_e$  по проводимости плазмы. Оценка  $Z_{eff}$  при известной электронной температуре. Диамагнитные измерения. Методы контроля положения плазменного шнура в токамаке. Оценки  $\beta_r$  и  $i_i$ . Магнитные зонды.

**Тема 12. Диагностические комплексы для исследования плазмы в тороидальных плазменных установках.** Диагностический комплекс стелларатора Л-2М. Диагностический комплекс токамака Т-10. Диагностический комплекс токамака-реактора ITER.

Таблица 3

**Содержание семинарских занятий**

№ п/п	№ раздела, темы	№ и название семинарских занятий	Вид контрольного мероприятия	Кол-во часов
1	Тема 1. Зондовая диагностика плазмы.	1. Сравнение зондовых измерений флуктуаций плотности и потенциала плазмы.	Защита лабораторной работы	3
2	Тема 6. Доплеровская рефлектометрия	2. Расчет Фурье-спектра сигнала Доплеровского рефлектометра	Защита лабораторной работы	3
3	Тема 7. Оптические методы исследования плазмы.	3. Анализ оптического спектра при микроволновом пробое в порошке металл-диэлектрик	Защита лабораторной работы	3
4	Тема 11. Методы, основанные на измерении магнитных потоков.	4. Анализ моды МГД колебаний в стеллараторе по результатам магнитной диагностики.	Защита лабораторной работы	3

#### **Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины**

Разделы, рекомендуемые для самостоятельного изучения (повторение материала по пройденным разделам 3 и 4 семестров, предполагают реферирование статьи (материалов из дополнительного списка литературы) по следующим темам:

Тема 1.1. Введение в физику плазмы

Тема 1.2. Радиус Дебая.

Тема 1.3. Движение заряженной частицы в постоянных и однородных электромагнитных полях.

Тема 1.4. Движение заряженной частицы в неоднородных электромагнитных полях.

Тема 1.5. Адиабатические инварианты. Траектория частиц в открытой ловушке.

Тема 1.6. Элементарные процессы в плазме.

Тема 1.7. Теоретические модели, используемые для исследования плазмы. Физическая кинетика.

Тема 1.8. Проводимость и диффузия в плазме. Уравнение Ланжевена.

Тема 1.9. Теоретические модели. Магнитная гидродинамика.

Тема 1.10. Магнитогидродинамические колебания.

Тема 1.11. Колебания и волны в плазме.

Тема 1.12. Физические плазменные процессы за пределами Земли.

Тема 1.13. Электрический разряд в газах.

Тема 1.14. Управляемый термоядерный синтез.

Тема 1.15. Дополнительные методы нагрева плазмы

Тема 1.16. Плазмохимия.

Тема 1.17. Комплексная или пылевая плазма. (приводятся разделы, возможен перенос специальных вопросов из основной программы или программы кандидатского экзамена).

Тема 1. Зондовая диагностика плазмы.

Тема 2. Радиофизические методы исследования плазмы.

Тема 3. Интерферометрия плазмы.

Тема 4. Применение рефлектометров в физике плазмы.

Тема 5. Микроволновое рассеяние.

Тема 6. Доплеровская рефлектометрия

Тема 7. Оптические методы исследования плазмы.

Тема 8. Диагностика электронно-циклотронного излучения плазмы.

Тема 9. Методы рентгеновской диагностики плазмы.

Тема 10. Измерение полных потоков энергии, покидающих плазму.

Тема 11. Методы, основанные на измерении магнитных потоков.

Тема 12. Диагностические комплексы для исследования плазмы в тороидальных плазменных установках.

Дополнительный перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физика плазмы» формируется научным руководителем аспиранта и утверждается аспирантской комиссией.

#### **Раздел 5. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности**

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физика плазмы» при подготовке к кандидатскому экзамену по специальности соответствует программе кандидатского экзамена по специальности «Физика плазмы», утвержденной Ученым советом ИОФ РАН (протокол №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.).

#### **7. Примерная тематика:**

##### **7.1. Курсовых работ**

Не предусмотрено учебным планом

##### **7.2. Научно-исследовательских работ и проектов**

Не предусмотрено учебным планом

### **7.3. Рефератов**

Тема реферата должна быть скоррелирована с темой диссертации и утверждена научным руководителем и преподавателем дисциплины "Физика плазмы".

Реферат должен быть оформлен в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным статьям (прежде всего это относится к обязательному цитированию, ссылкам на литературу с точным указанием источников, в том числе интернетных, и страниц в случае прямого цитирования, не содержать плагиата).

Объем реферата должен составлять не менее 1 п.л. или 40 000 знаков (24 стр.) основного текста, шрифт Times New Roman, 14 пт с приложением из оглавления и библиографии. Наличие списка литературы является обязательным. Реферат должен иметь стандартную структуру и должен быть сброшюрован.

## **8. Ресурсное обеспечение.**

### **8.1. Кадровый потенциал**

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальности 1.3.11 Физика плазмы в соответствии с ФГТ.

### **8.2. Материально-техническое оснащение.**

Для проведения занятий по дисциплине «Физика плазмы», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format.
- учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

Есть возможность использовать стандартные пакеты компьютерной математики для решения физико-математических и физико-технических задач, а также представления полученных решений с использованием средств компьютерной графики.

Стандартные пакеты для инженерных расчетов:

- Лицензионная программа MATLAB (на компьютерный класс)
- Лицензионная программа Mathematica 8
- Лицензионная программа Visual Studio .NET, 2005, 2008, 2010
- Лицензионная программа Intel® Fortran Composer XE (академич)
- Лицензионная программа Microsoft Office (академич)

Авторские программные пакеты, разработанные сотрудниками ИОФ РАН.

Обучающие оригинальные компьютерные программы, а также мультимедийные программно-методические комплексы, разработанные в ИОФ РАН.

1. А.К. Горшенин, В.Ю. Королев, Д.В. Малахов, Н.Н. Скворцова. Программа робастного анализа временных рядов длинноволновой турбулентности в тороидальных плазменных установках. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

№ 2012610645

2. А.К. Горшенин, В.Ю. Королев, Д.В. Малахов, Н.Н. Скворцова. Про-грамма оценки эволюции во времени полоидальной скорости вращения плазмы по робастным спектрам сигналов доплеровского рефлектометра. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2012610923 20 января 2012

3. А.К. Горшенин, В.Ю. Королев, Д.В. Малахов, Н.Н. Скворцова. Про-грамма робастного анализа сигналов коллективного рассеяния коротковолновых флуктуций плазмы на основе спектральных и корреляционных методов Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011618892 20 января 2012

4. А.К. Горшенин, В.Ю. Королев, Д.В. Малахов, Н.Н. Скворцова. Про-грамма робастного анализа эволюции параметров процесса ионно-звуковой турбулентности. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012610645 10 января 2012.

5. Код TRAZ для расчета движения частиц в тороидальном поле стеллара-тора Л-2М.

### **8.3. Образовательные технологии**

В процессе реализации программы дисциплины «Физика плазмы» используются различные образовательные технологии, соответствующие цели и задачам курса. В аудиторную нагрузку входят: лекционные и практические занятия, в ходе которых используются слайд-лекции, мультимедийные презентации учебных тем; индивидуальные консультации, различные формы контроля (традиционное и компьютерное тестирование, написание контрольных работ и т.д.).

В процессе реализации программы дисциплины, для достижения поставленной цели используются:

- лекции, с использованием презентационного оборудования;
- изложение теоретического материала;
- проведение семинаров с докладами на них аспирантов по подготовленным заранее темам;
- проведение лабораторных работ;
- применения результатов теоретических вычислений для конкретных заданий;
- использование в решении физических задач систем компьютерной математики;
- оформление решений с использованием систем компьютерной графики.

Программа дисциплины «Физика плазмы» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;
- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения физики полупроводников в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Изучение теоретического материала по темам занятий дополняется самостоятельным решением задач по выбору преподавателя. Подготовка к занятиям сочетается с внеаудиторной работой в библиотеке, в Интернете, написанием реферата.

Курс предполагает дальнейшую модификацию для частичного использования электронных образовательных сред LMS (Learning Management System) (бесплатных OPEN Source LMS: eFront, moodle, Open edX и др.).

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному и семинарскому материалу.

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

## 9.1. Основная литература

### 9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).

### 9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН  
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>

Интернет ресурсы:

1. [www.iter.org/](http://www.iter.org/),
  2. <http://www.nist.gov/pml/data/>
  3. <http://www.ciemat.es/>
  4. [www.iaea.org](http://www.iaea.org)
  5. <http://www.lhd.nifs.ac.jp/en/>
  6. [http://www.nag.co.uk/about\\_nag.asp](http://www.nag.co.uk/about_nag.asp)
  7. [www.statsoft.ru\(STATISTICA\)](http://www.statsoft.ru(STATISTICA))
  8. <https://imagej.nih.gov/ij/>
  9. <http://www.gpi.ru/links.php>, доступные через Internet научные и научно-технические журналы: издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag.
- Научная электронная библиотека elibrary.ru;
  - Электронные базы Web of Science и SCOPUS;
  - Журналы по физике плазмы (Физика плазмы, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Успехи физических наук, Physical Review E и др.);
  - Научные и научно-технические журналы издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, база данных Web of Science.

В качестве современной литературы рекомендуется изучать материалы этих конференций и специализированных секций, посвященные физике плазмы. Например:

- Звенигородские конференции по физике плазмы и УТС (ежегодные, <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/Zvenigorod.html>),
- Курчатовская молодежная научная школа (ежегодная, <http://www.nrcki.ru/pages/main/5509/5512/7358/index.shtml>),
- конференции "Плазменные, лазерные исследования и технологии" (НИЯУ МИФИ, <http://plasma.mephi.ru/ru/> )
- молодежную секцию научно-практических конференций «РадиоИнфоКом» (МТУ МИРЭА, <http://forum.mirea.ru/>) .

### 9.1.3. Учебники

#### Раздел 1.

1. Рухадзе А.А., Игнатов А.М., Гусейн-заде Н.Г. Введение в электродинамику плазмы: Учебное пособие. 2007
2. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 Г. — 576 с.
3. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках: Учебное пособие. МИФИ. 2000.
4. Константин Чукбар. Лекции по явлениям переноса в плазме. Учебное пособие. МФТИ. 2008г.
5. Кингсеп А.С. Введение в нелинейную физику плазмы. МФТИ. Учеб. пособие для вузов. 2008г.
6. Alexander Piel. Plasma Physics. An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas. Springer. 2010.
7. Ж.А. Биттенкорт. Основы физики плазмы. Москва. ФИЗМАТЛИТ. 2009. состояния. М.: Физматлит, 2007.

8. Чирков А.Ю. Альтернативные системы термоядерного синтеза. М.: Издательство Книга и бизнес, 2012.
9. Progress in ITER Physics Basis . [www.iter.org/](http://www.iter.org/) 2022.
10. Бобров Ю., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А., Юргеленас Ю.. Физические модели и механизмы электрического пробоя газов. Издательство МГУ. 2012г. 368с.

## **Раздел 2.**

11. В.С. Стрелков, Физические основы методов диагностики плазмы в токамаке, М., МИФИ, 2004.
12. Мельников А.В. Электрический потенциал в плазме тороидальных установок. М.: НИЯУ МИФИ, Москва, 2015. 260с.
13. Попов В.В. , Писарев А.А. Материалы и процессы получения теплозащитных покрытий. М.: НИЯУ МИФИ, Москва 2016.168с.
14. Н.Н. Скворцова, О.В. Шестаков, Д.В. Малахов, Методы численного анализа стохастических сигналов. Лекции по курсу «Прикладная физика», изд. МГТУ МИРЭА, 2011
15. Учебное пособие под ред., Н.Г. Гусейн-заде, Специальные разделы физики, изд. МГТУ МИРЭА, 2011.
16. А.А. Харкевич. Спектры и анализ. М. :Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 - 240с
17. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: Практический подход / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. — М.: Вильямс, 2008. — 989 с.
18. М. Хилд, С. Уортон Микроволновая диагностика плазмы: Пер. с англ.. — М.: Атомиздат, 1968. — 391 с.
19. Р. Хаддлостон, С. Леонард. Диагностика плазмы: Пер. с англ./ М.: Мир, 1967. - 516 с.
20. В. В. Буланин, Диагностика высокотемпературной плазмы, Учебное пособие. С. Петербург (2008).
21. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд., испр. и доп. - Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. - 736 с.
22. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках: Учебное пособие. МИФИ. 2000.
23. Юрий Бобров, Намик Гусейнага оглы Гусейн-заде, Анри Рухадзе, Юрий Юргеленас. Физические модели и механизмы электрического пробоя газов. Издательство МГУ. 2012г. 368с
24. В.И. Каганов. Радиотехнические цепи и сигналы. Высшее образование. 2005
25. И. Добеши. Десять лекций по вейвлетам. Москва-Ижевск. R&C Dynamics. 2001.

## **9.2. Дополнительная литература**

### **Раздел 1.**

1. Котельников И. А., Генезис плазмы, или история одного слова. Вестник НГУ. Серия Физика. 2008. Т.3, В.2.
2. Франк-Каменецкий Д.А., Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат. 1968.
3. Котельников И.А., Ступаков Г.В. Лекции по физике плазмы. Учебное пособие. Новосибирск. 1992.
4. Чен Ф., Введение в физику плазмы, М.,Мир, 1987.
5. Скворцова Н.Н. Электронно-циклотронный нагрев в тороидальных установках. «Специальные разделы физики». Ред. Н.Г. Гусейн-заде. М.: Издательство МИРЭА, 2011. С. 78...102.
6. Голант В. Е., Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы, М., 1968;
7. Буланин В. В., Диагностика высокотемпературной плазмы, Учебное пособие. С. Петербург (2008).
8. NIST Atomic Spectra Database. <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
9. Кадомцев Б.В., Коллективные явления в плазме, М., Наука, 1988.

10. .Голант В.Е, Жилинский А.П.,Сахаров И.Е, Волны в изотропной плазме, Волны в анизотропной плазме (учебные пособия), ЛПИ, 1977.
11. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М., Наука 1992.
12. Попель С.И. Лекции по физике пылевой плазмы , М.МФТИ, 2002 Хокинг С. Краткая история времени. От Большого Взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2015. 223 с.
13. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб.: Амфора, 2014. 166 с.
14. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум / Под ред. Н.С.Кардашева и В.И.Мороза. 6-е изд., доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987 (Пробл. науки и техн. прогресса). 320 с.

## **Раздел 2.**

1. И.А. Котельников. Г.В. Ступаков. Лекции по физике плазмы. Учебное пособие. Новосибирск. 1992.
2. Голант В. Е., Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы, М., 1968;
3. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 Г. — 576 с.
4. NIST Atomic Spectra Database. <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
5. Б.В.Кадомцев, Коллективные явления в плазме, М., Наука, 1988.
6. В.Е.Голант, А.П.Жилинский, И.Е.Сахаров, Волны в изотропной плазме, Волны в анизотропной плазме (учебные пособия), ЛПИ, 1977.
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М., Наука 1992.
8. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. №13. Изд.5. М.: URSS, 2017. 304 с.
9. А.А. Харкевич. Спектры и анализ. М. Издательство технико-теоретической литературы. 1958 (Москва-Ижевск. R&C Dynamics. 2007)
10. С.П. Марпл-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990
11. Ж. Макс. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т.1,2. М.: Мир. 1983 .
12. W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling // Numerical Recipes in Pascal. The Art of Scientific Computing. Cambridge, 1989.
13. N.E. Newland. An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis. 3rd ed. New York. Longman Scientific & Technical. 1993.
14. А.А. Короновский, А.Е. Храмов. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. Москва. Физматлит. 2003.
15. Диканев Т.В.,. Спектральный анализ сигналов. Учебно-методическое пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий. Саратов, 2011. 24 с
16. Нагорнов О.В.,и др. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.

### **9.2.1.Учебно-методические пособия (учебные задания)**

нет

### **9.2.2. Литература для углубленного изучения, подготовки рефератов**

нет

**10. Аттестация по дисциплине.** Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 3, 4 и 5 семестрах – зачет, процедура аттестации в 3 и 4 семестрах включает решение контрольных задач и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

Итоговая аттестация по дисциплине включает сдачу кандидатского экзамена экзаменационной комиссии, утвержденной локальным нормативным актом ИОФ РАН.

**11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**



### **11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций**

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, решение домашних задач по теме занятий, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

### **11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине**

1. Термин «плазма». Наблюдение плазмы до начала XX века. Ирвинг Ленгмюр. Плазменные установки вокруг человека в XXI веке.
2. Модели равновесия в плазме. Степень ионизации в состоянии равновесия и формула Саха. Корональное равновесие.
3. Установка токамак.
4. Ионизированные газы и плазма. Квазинейтральность плазмы. Система единиц, которая используется в физике плазмы.
5. Элементы кинетической теории плазмы. Фазовое пространство. Функция распределения. Средняя скорость и концентрация частиц. Бесстолкновительное уравнение Больцмана.
6. Установка стелларатор.
7. Плазменное приближение. Параметры плазмы в различных условиях. Классическая и вырожденная плазма. Идеальная и неидеальная плазма.
8. Элементы кинетической теории плазмы. Релаксационное приближение для столкновительного члена. Уравнение Власова
9. Устройство люминесцентной лампы.
10. Идея магнитного удержания Сахарова и Тамма. Стелларатор. Восьмерка Спитцера. Структура магнитного поля.
11. Излучение плазмы. Тормозное, рекомбинационное. Линейчатый спектр. Молекулярные спектры в низкотемпературной плазме.
12. Реакции термоядерного синтеза.
13. Движение заряженной частицы в неоднородном и непостоянном магнитном поле. Движение в сильном медленно меняющемся магнитном поле. Дрейфовое приближение.
14. Колебания и волны в плазме. Магнитогидродинамические колебания. Продольные звуковые волны. Альфвеновские волны.
15. Газодинамическая ловушка (ГДЛ).
16. Движение заряженной частицы в постоянных и однородных электромагнитных полях. Однородные электростатическое и магнитное поля.
17. Вывод уравнения непрерывности методом гидродинамики. Модель проводящей жидкости. Идеальная проводимость и дрейфовое движение.
18. Диагностика ЭЦИ для определения профиля температуры электронов на стеллараторе Л-2М.
19. Дрейфовая скорость Дрейфовая скорость в гравитационном поле.
20. Вмороженное поле. Диффузия магнитного поля. Двухжидкостная магнитогидродинамика.
21. Электронно-циклотронный нагрев в тороидальных установках.
22. Адиабатический инвариант. Удержание заряженных частиц в открытых магнитных ловушках. Первый адиабатический инвариант ( $\mu$ ).
23. Высокочастотная проводимость плазмы. Эффективная электрическая проницаемость. Распространение электромагнитных волн в плазме при отсутствии магнитного поля.
24. Трехэлектродный зонд для измерения потоков частиц в плазме.
25. Адиабатический инвариант. Второй адиабатический инвариант ( $J$ ). Третий адиабатический инвариант ( $\Phi$ ).
26. Пространственная дисперсия. Электронные и ионные ветви. Влияние магнитного поля на распространение волн в плазме.

27. Продольное распространение волн. Электронный и ионный циклотронный резонансы.
28. Элементарные процессы в плазме. Упругое рассеяние. Марковские/немарковские процессы. Неупругое рассеяние.
29. Перенос заряженных частиц. Коэффициенты подвижности, диффузии, термодиффузии. Амбиполярная диффузия. Перенос энергии.
30. Теплопроводность заряженных частиц. Уравнения диффузии и теплопроводности.
31. Контактные (зондовые) и бесконтактные (микроволновые) методы измерения флуктуаций плотности и потенциала плазмы.
32. Одиночный ленгмюровский зонд. Контактные методы измерения плавающего потенциала плазмы, плотности и температуры плазмы.
33. Трехштырьковый зонд. Измерение флуктуационного потока частиц в низкотемпературной плазме.
34. Интерферометрическая диагностика измерения плотности плазмы. Типы интерферометров.
35. Построение распределения плотности среды (коэффициента преломления) по интерферометрическим измерениям (методом абелизации и др.). Источники погрешностей при интерферометрии.
36. Рефлектометр. Измерение радиального профиля концентрации плазмы с помощью рефлектометра.
37. Физика формирования сигнала рефлектометра при нормальном и наклонном падении СВЧ-пучка на поверхность плазмы. Доплеровская рефлектометрия.
38. Доплеровская рефлектометрия. Анализ полоидального вращения плазмы в тороидальных установках.
39. Корреляционная рефлектометрия. Исследование параметров краевой турбулентности плазмы.
40. Оценка комплексных спектров по двум каналам доплеровского рефлектометра. Нормировка, временные окна, сглаживание. Определение скорости вращения по комплексному Фурье-спектру.
41. Виды микроволнового рассеяния на колебаниях и неоднородностях среды. Рассеяние Брэгга, Томсона. Углы и объем рассеяния.
42. Частотные диапазоны излучений, применяемых в диагностиках рассеяния – угловые и энергетические характеристики в зависимости от частоты. Пространственное разрешение и разрешение по масштабам неоднородностей (волновым числом).
43. Штарковское и Доплеровское уширение линий в плазме. Молекулярные спектры в низкотемпературной плазме.
44. Излучения линий водорода в тороидальных установках как критерий перехода к режиму улучшенного удержания плазмы.
45. Определение температуры по континууму оптических спектров (метод Вина).
46. Определение температуры по относительной интенсивности линий.
47. Определение температуры по спектрам двух атомных молекул.
48. Рентгеновское излучение в тороидальных плазменных установках. Измерений температуры по рентгеновскому излучению.
49. Статические болометры. Динамические болометры. Значение измерений полных потоков энергии из плазмы. Оценка времени удержания энергии в плазме из таких измерений.
50. Измерения полного тока в тороидальной системе. Пояс Роговского.
51. Диамагнитные измерения. Методы контроля положения плазменного шнура в токамаке.
52. Диамагнитная диагностика на стеллараторе Л-2М.
53. Магнитные зонды. Анализ моды МГД колебаний в стеллараторе.
54. Измерение плотности и температуры плазмы в разрядах различного типа: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд.

55. Описание диагностического комплекса стелларатора Л-2М.
56. Описание диагностического комплекса токамака Т-10.
57. Описание диагностического комплекса строящегося токамака-реактора ITER.

## **12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины**

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

## **13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине**

### **13.1 Порядок проведения лекции**

*Вводная часть* включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

*Основная часть* лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

### **13.2 Порядок проведения семинара**

Во вводной части решаются организационные задачи семинарского занятия: проверка готовности аудитории и подготовленности аспирантов к занятию, формулировка темы, цели и задач занятия.

Основная часть занятия предполагает организацию дискуссии: постановку проблемы, выделение основных направлений. Выступление докладчиков, раскрывающих основные положения по вопросу. Выступления оппонентов, раскрывающих свое видение проблемы, дискуссия по докладу.

В заключительной части подводятся итоги занятия, дается оценка результатов работы аспирантов.

### **13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов**

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставления информации, идей, мнений, предложений.

## **14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания**

### **14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:**

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий и контрольных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

#### **14.2. Критерии оценивания знаний обучаемых на кандидатском экзамене по специальности:**

Оценка ставится по каждому из вопросов кандидатского экзамена по специальности, оценка за экзамен определяется как среднее арифметическое из оценок по трем вопросам экзамена с соответствующим округлением до целочисленной по правилам арифметических операций. При наличии оценки «неудовлетворительно» по одному из вопросов ставится общая оценка «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично»: В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован высокий уровень понимания материала. Продемонстрировано превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены полные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Хорошо»: Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован хороший уровень понимания материала. Продемонстрировано хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены частичные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Удовлетворительно»: Тема раскрыта частично. Ответ структурирован недостаточно. Понятийный аппарат освоен частично. Продемонстрировано понимание отдельных положений из материала по теме. Продемонстрированы удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены фрагментарные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Неудовлетворительно»: Тема не раскрыта. Ответ не структурирован. Понятийный аппарат освоен в недостаточном объеме. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Продемонстрировано неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Не представлены ответы на дополнительные вопросы по теме.

#### **Программу разработал:**

Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Скворцова Н.Н., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
(подпись)