

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



**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. директора Института по научной работе

С.В. Лебедев

20 2015 г

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ НАГРЕВ И ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА В ПЛАЗМЕ  
МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК**

основной образовательной программы подготовки  
научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль: 01.04.08 Физика плазмы

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Принято Ученым советом  
Протокол № 1 от 20 февраля 2015 г.

Санкт-Петербург  
2015 г.

*Ильин*

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями учебной дисциплины являются:

- создание у аспирантов комплекса знаний о механизмах поглощения электромагнитных волн в высокотемпературной плазме и о связанных с ними возможностях нагрева и генерации тока в плазме;
  - формирование представлений о методах высокочастотного нагрева плазмы магнитных ловушек в различных частотных диапазонах;
  - ознакомление аспирантов с последними экспериментальными и теоретическими результатами по нагреву плазмы и генерации тока в токамаках и других магнитных ловушках.
- Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Дисциплина «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» является вариативной дисциплиной (по выбору) в плане подготовки аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.08 Физика плазмы.

При ее изучении используются знания и навыки, полученные аспирантами при изучении курсов общей и теоретической физики и предшествующих курсов специальных дисциплин по специализации «Физика плазмы». Методической основой изучения дисциплины являются курсы по физике высокотемпературной плазмы и УТС и по волновым процессам в магнитноактивной плазме.

Актуальность изучения дисциплины определяется важной ролью электромагнитных волн в решении задач нагрева плазмы и генерации в ней тока, необходимостью комплекса знаний и умений, приобретаемых в ходе изучения курса, для практических применений.

## 3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ООП:

### 3.1. Универсальные компетенции:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

### 3.2. Общепрофессиональные компетенции:

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

### 3.3. Профессиональные компетенции:

- способность проводить исследования физики переноса энергии и вещества в плазме ловушек с магнитным удержанием, на основе методик, освоенных в процессе прохождения курса, и интерпретировать результаты экспериментальных исследований с применением полученных теоретических знаний (ПК-1);
- способность проводить исследования физики ВЧ и инжекционного нагрева высокотемпературной плазмы на установках с магнитным удержанием, а также оценивать перспективность применения этих методов нагрева в термоядерных реакторах (ПК-2);

- планировать, организовывать работу по проектам, направленным на исследование физики высокотемпературной плазмы в современных установках с магнитным удержанием и на создание установок реакторного масштаба, основанных на современных представлениях о физике термоядерных реакторов (ПК-3);

- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методы и средства решения поставленных задач (ПК-4).

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану 108 часов, 33Е.

Наименование разделов и тем	Трудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			лекции	Лаб. / практ	самостоятельная работа	контроль
1	2	3	4	5	6	7
<b>Раздел 1. ВЧ нагрев высокотемпературной плазмы. Задачи и подходы.</b>						
Тема 1.1. Оценки мощности необходимой для нагрева плазмы до термоядерных параметров. Резонансные методы нагрева.		7	1		6	
Тема 1.2. Поглощение энергии в циклотронном резонансе.		5	1		4	
Всего по разделу		12	2		10	
<b>1. Раздел 2. Ионный циклотронный нагрев плазмы</b>						
Тема 2.1. Поглощение энергии на первой гармонике ионного циклотронного резонанса.		13	1		12	
Тема 2.2. ИЦ поглощение в режиме малой добавки резонансной примеси.		13	1		12	
Тема 2.3. Поглощение БМЗ волны в режиме ионно-ионного гибридного резонансе		13	2		11	
Всего по разделу		39	4		35	
<b>Раздел 3. Электронный циклотронный нагрев плазмы.</b>						
Тема 3.1. Доступность электронного циклотронного резонанса.		8	1		7	
Тема 3.2. Поглощения энергии волн необыкновен-		8	1		7	



ной поляризации при ЭЦР на первой гармонике						
Тема 3.3. Поглощения энергии волн обыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике.		8	1		7	
Тема 3.4. Поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на второй гармонике.		8	1		7	
Тема 3.5. Искажения функции распределения электронов при ЭЦ нагрее.		13	2		11	
Всего по разделу	1	45	6		39	
<b>Раздел 4. Методы поддержания тока в токамаке электромагнитными волнами.</b>						
Тема 4.1. Оценка эффективности генерации безындукционного тока.		6	1		5	
Тема 4.2. Поддержания безындукционного тока нижегибридными волнами.		6	1		5	
Всего по разделу	1	12	2		10	
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>3</b>	<b>108</b>	<b>14</b>		<b>94</b>	зачет

#### 4.2. Содержание разделов и тем

##### Раздел 1. ВЧ нагрев высокотемпературной плазмы. Задачи и подходы.

Тема 1.1. Оценки мощности необходимой для нагрева плазмы до термоядерных параметров. Резонансные методы нагрева.

Нагрев высокотемпературной плазмы с помощью электромагнитных волн. Оценки мощности необходимой для нагрева плазмы до термоядерных параметров. Резонансные методы нагрева.

Тема 1.2. Поглощение энергии в циклотронном резонансе.

Расчёт мощности поглощаемой в единице объёма плазмы в условиях циклотронного резонанса.

##### Раздел 2. Ионный циклотронный нагрев плазмы

Тема 2.1. Поглощение энергии на первой гармонике ионного циклотронного резонанса.

Оценка постоянной поглощения и оптической толщины плазмы на первой гармонике ионного циклотронного резонанса. Эффект онуления резонансной поляризации в области ИЦР.

Тема 2.2. ИЦ поглощение в режиме малой добавки резонансной примеси.

Оценка постоянной поглощения и оптической толщины плазмы на первой гармонике ионного циклотронного резонанса для малой добавки.

Тема 2.3. Поглощение БМЗ волны в режиме ион-ионного гибридного резонанса

Поглощение быстрой магнито-звуковой волны в режиме ион-ионного гибридного резонанса и роль при этом трансформации в кинетическую альфеновскую волну и ионную Бернштейновскую моду.

##### Раздел 3. Электронный циклотронный нагрев плазмы.

Тема 3.1. Доступность электронного циклотронного резонанса.

Условия доступности электронного циклотронного резонанса для волн необыкновенной, обыкновенной поляризации и электронных бернштейновских волн.

Тема 3.2. Поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике.

Оценки эффективности поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике при малой плотности плазмы. Оценки эффективности поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике в условиях подавления резонансной поляризации греющей волны. Поглощение энергии в верхнем гибридном резонансе и электронный Бернштейновский нагрев.

Тема 3.3. Поглощения энергии волн обыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике.

Оценка постоянной поглощения и оптической толщины плазмы на первой гармонике электронного циклотронного резонанса.

Тема 3.4. Поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на второй гармонике.

Оценка постоянной поглощения и оптической толщины плазмы на второй гармонике электронного циклотронного резонанса.

Тема 3.5. Функции распределения электронов при ЭЦ нагреве.

Искажения функции распределения электронов при ЭЦ нагреве. Ограничение ускорения электронов в ЭЦР.

**Раздел 4.** Методы поддержания тока в токамаке электромагнитными волнами.

Тема 4.1. Оценка эффективности генерации безындукционного тока.

Эффективность генерации безындукционного тока ВЧ волнами. Оценки эффективности.

Тема 4.2. Поддержания безындукционного тока нижнегибридными волнами.

Поглощение нижнегибридных волн по механизму Ландау и возможность поддержания с их помощью безындукционного тока. Условия доступности для быстрой и медленной моды в нижнегибридном диапазоне частот. Оценка эффективности генерации тока нижнегибридными волнами.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- г) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;

В учебном процессе используются как активные, так и интерактивные формы проведения занятий: дискуссия, метод поиска быстрых решений в группе, мозговой штурм.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» и формирует необходимые компетенции;



- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Цель контроля - получение информации о результатах обучения.

### ***Комплект оценочных средств для текущего контроля***

Контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, осуществляется на зачете в конце семестра. Текущий контроль знаний аспирантов реализуется в виде опросов.

### ***Перечень контрольных вопросов, позволяющих оценить качество усвоения учебного материала:***

1. Нагрев высокотемпературной плазмы с помощью электромагнитных волн.
2. Оценки мощности необходимой для нагрева плазмы до термоядерных параметров.
3. Резонансные методы нагрева.
4. Поглощение энергии в циклотронном резонансе.
5. Оценка поглощения энергии на первой гармонике ионного циклотронного резонанса.
6. Эффект обнуления резонансной поляризации в области ИЦР.
7. ИЦР поглощение в режиме малой добавки резонансной примеси.
8. Поглощение быстрой магнито-звуковой волны в режиме ион-ионного гибридного резонанса.
9. Условия доступности электронного циклотронного резонанса для волн необыкновенной и обыкновенной поляризации.
10. Оценка эффективности поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике при малой плотности плазмы.
11. Оценка эффективности поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике в условиях подавления резонансной поляризации греющей волны.
12. Оценка эффективности поглощения энергии волн обыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике.
13. Оценка эффективности поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на второй гармонике.
14. Поглощение энергии в верхнем гибридном резонансе и электронный Бернштейновский нагрев.
15. Искажения функции распределения электронов при ЭЦ нагреве. Ограничение ускорения электронов в ЭЦР.
16. Методы поддержания тока электромагнитными волнами. Оценка эффективности генерации безындукционного тока.
17. Поглощение нижнегибридных волн по механизму Ландау и возможность поддержания с их помощью безындукционного тока.
18. Условия доступности для быстрой и медленной моды в нижнегибридном диапазоне частот.
19. Оценка эффективности генерации тока нижнегибридными волнами.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### 7.1. Основная литература

1. В.Е. Голант, В.И. Фёдоров Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных-термоядерных установках. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
2. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза/ Перевод с англ. Под общей ред. В.Д. Шафранова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 424 с.

### 7.2. Дополнительная литература

1. Электродинамика плазмы, под редакцией А.И. Ахиезера, монография, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1974, 719 с.

### 7.3 Интернет-ресурсы:

Отечественные журналы:

Физика плазмы ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=8251](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8251); доступ с 2007 по текущий год)

Отечественные журналы в переводе:

1. Plasma Physics Reports (<http://link.springer.com/journal/11452>; доступ с 2000 по текущий год)
2. Radiophysics and Quantum Electronics (<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141>; доступ с 1965 по текущий год)

Иностранные журналы:

1. Contributions to Plasma Physics (<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291521-3986>; доступ с 1960 по текущий год)
2. EPL (Europhysics Letters) (<http://iopscience.iop.org/0295-5075/>; доступ с 1986 по текущий год)
3. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html>; доступ с 1940 по текущий год)
4. Physics of Fluids B: Plasma Physics (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofb>; доступ за 1989-1993)
5. Physics of Plasmas (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop>; доступ с 1994 по текущий год)
6. Plasma Physics and Controlled Fusion (<http://iopscience.iop.org/0741-3335/>; доступ с 1967 по текущий год)
7. Plasma Chemistry and Plasma Processing (<http://link.springer.com/journal/11090>; доступ с 1981 по текущий год)
8. Plasma Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/1009-0630/>; доступ с 1999 по текущий год)
9. Plasma Sources Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/0963-0252/>; доступ с 1992 по текущий год)

**8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер