

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ НАГРЕВ И ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА В ПЛАЗМЕ  
МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы (далее – программа аспирантуры)

## **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 ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

2.1. Дисциплина «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек» входит в факультативную часть программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

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**

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут

**знать:**

- основные механизмы поглощения электромагнитных волн в высокотемпературной плазме;

- основные методы ВЧ нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием;
- основные методы поддержания безындукционного тока в плазме токамака;

**уметь:**

- определять локализацию области выделения ВЧ мощности в плазме в конкретных экспериментальных условиях;
- оценивать оптическую толщину плазмы в условиях эксперимента;

**владеть опытом:**

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами высокочастотного нагрева плазмы.

#### 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.

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>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 ионного гибридного резонанса		13	2		11	
Всего по разделу		39	4		35	
<b>Раздел 3. Электронный циклотронный нагрев плазмы.</b>						
Тема 3.1. Доступность электронного циклотронно-		8	1		7	

го резонанса.						
Тема 3.2. Поглощения энергии волн необыкновенной поляризации при ЭЦР на первой гармонике		8	1		7	
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 нагреве.		13	2		11	
Всего по разделу	1	45	7		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 нижнегибридными 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;

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**

### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступление на семинарах.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

## **6.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

На зачете аспирант должен продемонстрировать высокий научный уровень и научные знания по дисциплине «Дополнительный нагрев и генерация тока в плазме магнитных ловушек».

*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. ИЦ поглощение в режиме малой добавки резонансной примеси.
8. Поглощение быстрой магнито-звуковой волны в режиме ион-ионного гибридного резонансе.
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 Высоочастотные 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. Шаfranова. – 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));

#### **Отечественные журналы в переводе:**

1. Plasma Physics Reports (<http://link.springer.com/journal/11452>);

2. Radiophysics and Quantum Electronics

(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141>);

#### **Иностранные журналы:**

1. Contributions to Plasma Physics

(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291521-3986>);

2. EPL (Europhysics Letters) (<http://iopscience.iop.org/0295-5075/>);

3. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html>);

4. Physics of Fluids B: Plasma Physics (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofb>);

5. Physics of Plasmas (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop>);



6. Plasma Physics and Controlled Fusion (<http://iopscience.iop.org/0741-3335/>);
7. Plasma Chemistry and Plasma Processing (<http://link.springer.com/journal/11090>);
8. Plasma Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/1009-0630/>);
9. Plasma Sources Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/0963-0252/>);

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИ- ПЛИНЫ**

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

Программу разработал:  
заведующий лабораторией физики  
высокотемпературной плазмы,  
д-р физ.-мат. наук, Гусаков Е.З.