

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

02 2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
**ИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ УПРАВЛЯЕМОГО  
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

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

Профиль подготовки: 01.04.08 Физика плазмы

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

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

Санкт-Петербург

*Илларион*

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**Целями** учебной дисциплины являются:

- создание у аспирантов комплекса знаний о свойствах высокотемпературной плазмы, удерживаемой в магнитном поле, методах ее получения и исследования;
- формирование представлений о проблемах энергетики и роли термоядерных исследований в решении этих проблем;
- получение знаний об устройстве современных плазменных установок и принципах их работы, включая сведения о проекте экспериментального термоядерного реактора ИТЭР;
- ознакомление аспирантов с последними достижениями физики плазмы и УТС.

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

Рассматриваемая дисциплина входит в вариативную часть в ООП подготовки аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.08 Физика плазмы.

При изучении данной дисциплины 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 физики плазмы, диагностики плазмы, статистической физики и термодинамики.

Актуальность изучения дисциплины определяется важной ролью исследований в области высокотемпературной плазмы и УТС, направленных на разработку физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики.

Тематика курса соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации: «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

## 3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Инженерные вопросы УТС» 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 бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану 72 часа -2 ЗЕ.

##### 4.2. Разделы дисциплины и виды занятий

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. Горячая плазма для решения проблем УТС.</b>						
Тема 1.1 Потребности в источниках энергии, основные направления движения к термоядерному реактору.		12	6		6	
Тема 1.2. Плазма в магнитном поле, установки типа токамак		12	6		6	
Тема 1.3. Равновесие плазмы в токамаке		12	6		6	
Всего по разделу		36	18		18	
<b>Раздел 2. Сценарий разряда плазмы в токамаке</b>						
Тема 2.1. Начальная стадия разряда		12	6		6	
Тема 2.2. Системы нагрева плазмы и поддержания тока.		12	6		6	
Тема 2.3. Анализ экспериментальных данных по начальной стадии разряда в токамаках		12	6		6	
Всего по разделу		36	18		18	
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>36</b>		<b>36</b>	Зачет

##### 4.3. Содержание разделов и тем

## Раздел 1. Горячая плазма для решения проблем УТС

Тема 1.1. Потребности в источниках энергии, основные направления движения к термоядерному реактору.

Высокотемпературная плазма, параметры высокотемпературной плазмы, реакции синтеза, критерий Лоусона. Инерциальный термоядерный синтез. Термоизоляция плазмы магнитным полем.

Тема 1.2. Плазма в магнитном поле, установки типа токамак.

Движение заряженных частиц в магнитном поле, ларморовский радиус. Дрейф заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Адиабатические инварианты. Замкнутые магнитные конфигурации. Вращательное преобразование. Идея установки типа токамак. Устройство токамака. Параметры современных токамаков. Демонстрационные эксперименты с D-T реакцией. Проект ИТЭР. Поиск оптимальной структуры энергетики.

Тема 1.3. Равновесие плазмы в токамаке.

Силы, действующие на плазменный виток. Тепловое давление плазмы. Математические модели для описания плазмы. Уравнение Грэда-Шафранова. Граничные условия. Расчет и реконструкция равновесия. Методы реконструкции равновесных магнитных конфигураций. Управление положением плазмы. Типы равновесных магнитных конфигураций. Дивертор и его роль в термоядерных устройствах. Сферические токамаки.

## Раздел 2. Сценарий разряда плазмы в токамаке

Тема 2.1. Начальная стадия разряда.

Безэлектродный пробой вихревым электрическим полем. Критерии пробоя. Структура полоидального магнитного поля в стадии пробоя. Оценки эффективной длины силовых линий. Особенности пробоя при большом отношении напряженности электрического поля к давлению газа, убегающие электроны. Критерии перехода к конфигурации плазмы с замкнутыми магнитными поверхностями.

Тема 2.2. Системы нагрева плазмы и поддержания тока.

Омический нагрев плазмы. Индуктор для возбуждения тока плазмы. Проблема индукционного возбуждения тока плазмы в сферическом токамаке. Стабилизация тока плазмы. СВЧ предионизация. Безындукционный старт и поддержание тока для стационарного режима работы токамака. Источники для дополнительного нагрева плазмы и безындукционного поддержания тока

Тема 2.3. Анализ экспериментальных данных по начальной стадии разряда в токамаках

Методы диагностики на начальной стадии разряда. Код SCENPLINT для анализа экспериментальных данных. Анализ старта разряда в установках Глобус-М и Т-10. Старт разряда с применением электромагнитного ЭЦР излучения на установках JT-60, Tore Supra, KSTAR. Расчет начальной стадии разряда в ИТЭРе.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Инженерные вопросы УТС» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа;
- 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 «Инженерные вопросы УТС» 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 и степени их соответствия результатам обучения.

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

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов реализуется в виде выступлений на семинарах по индивидуальным домашним заданиям, ответам на тестовые вопросы, проведением теоретических зачетов.

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

1. Термоядерные реакции как источник энергии. Критерий Лоусона.
2. Инерциальный термоядерный синтез и магнитная термоизоляция плазмы.
3. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Адиабатические инварианты.
4. Удержание плазмы в замкнутых магнитных конфигурациях с вращательным преобразованием.
5. Устройство и принцип действия токамака.
6. Параметры современных токамаков.
7. Эксперименты с D-T реакцией на установках JET и TFTR.
8. Назначение и параметры экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.
9. Поиск оптимальной структуры источников энергии. Идея гибридной схемы синтеза.
10. Магнитное равновесие плазмы. Силы, действующие на плазменный виток.
11. Уравнение Грэда-Шафранова.
12. Методы реконструкции равновесных магнитных конфигураций.

13. Типы равновесных магнитных конфигураций. Дивертор и его роль в термоядерных устройствах.
14. Сферические токамаки.
15. Особенности пробоя плазмы в токамаке.
16. Критерии перехода к конфигурации плазмы с замкнутыми магнитными поверхностями в начальной стадии разряда.
17. Методы диагностики на начальной стадии разряда.
18. Индукционное возбуждение тока плазмы. Режим омического нагрева.
19. Способы безындукционного старта и поддержания тока плазмы.
20. Крупнейшие современные токамаки.

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

### **7.1. Основная литература**

1. Арцимович Л.А., Установки токамак. В кн. «Избранные труды. Атомная физика и физика плазмы». – М., «Наука», 1978, с.98-164
2. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака. – М., «Энергоатомиздат», 1985

### **7.2. Дополнительная литература**

1. В.А.Беляков, А.А.Кавин, С.А.Лепихов, А.Б.Минеев, А.Д.Овсянников. ТОКАМАК: начальная стадия разряда. Учебное пособие. – СПб. Издательство «Лань», 2014

### **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
4. Компьютерный класс
5. Диагностическое и технологическое оборудование действующих плазменных установок типа токамак
6. Экспериментальные базы данных действующих плазменных установок типа токамак