

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Введение в физику токамаков
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.Д. Пустовитов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 29.05.2020

Аннотация

Курс "Введение в физику токамаков" предусматривает освоение студентами фундаментальных знаний в области физики термоядерной плазмы в системах с магнитным удержанием, изучение основных подходов к их описанию.

Задачи курса:

- формирование базовых знаний в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов устройству, принципам работы, инженерному и аппаратному обеспечению современных установок «токамак»;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Аксиально-симметричная тороидальная плазма.
2. Баланс сил и вращение плазмы.
3. Геометрия магнитного поля в токамаке.
4. Краевые моды плазмы токамака.
5. МГД-модели устойчивости плазмы.
6. Проблемы стационарного токамака.
7. Равновесие плазмы в токамаках и стеллараторах.
8. Тороидальные эффекты и замыкание токов равновесия.
9. Управление устойчивостью плазмы в токамаках.
10. Устойчивость равновесия плазмы.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области физики термоядерной плазмы в системах с магнитным удержанием, изучение основных подходов к их описанию.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов устройству, принципам работы, инженерному и аппаратному обеспечению современных установок «токамак»;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- ☐ принципы симметрии и законы сохранения;
- ☐ новейшие открытия естествознания;
- ☐ постановку проблем физико-химического моделирования;
- ☐ о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- ☐ эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- ☐ представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- ☐ работать на современном экспериментальном оборудовании;
- ☐ абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ использовать вероятностные модели для конкретных процессов и проводить необходимые расчеты в рамках построенной модели;
- ☐ моделировать процессы и анализировать модели с использованием информационных технологий.

владеть:

- ☐ научным методом как исходным принципом познания объективного мира;
- ☐ методологией выбора адекватных методов исследования (наблюдений, теоретических и экспериментальных методов исследований);
- ☐ системным анализом;
- ☐ логикой в научном творчестве;
- ☐ научной картиной мира;
- ☐ математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Аксиально-симметричная тороидальная плазма.	2	1		2
2	Баланс сил и вращение плазмы.	1	2		2
3	Геометрия магнитного поля в токамаке.	2	1		2
4	Краевые моды плазмы токамака.	1	2		2
5	МГД-модели устойчивости плазмы.	2	1		2
6	Проблемы стационарного токамака.	1	2		2
7	Равновесие плазмы в токамаках и стеллараторах.	2	2		2

8	Тороидальные эффекты и замыкание токов равновесия.	1	1		2
9	Управление устойчивостью плазмы в токамаках.	2	2		12
10	Устойчивость равновесия плазмы.	1	1		2
Итого часов		15	15		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Аксиально-симметричная тороидальная плазма.

Аксиально-симметричная тороидальная плазма. Уравнение Грэда-Шафранова. Интегральные следствия. Ток Пфирша-Шлютера. Смещение Шафранова. Круглая и некруглая плазма.

2. Баланс сил и вращение плазмы.

Баланс сил и вращение плазмы. Вращательная стабилизация плазмы. Идеальная плазма с неидеальными граничными условиями. Запирание мод. Срывы.

3. Геометрия магнитного поля в токамаке.

Геометрия тороидального магнитного поля. Магнитные поверхности. Вращательное преобразование. Магнитное дифференциальное уравнение. Эффекты тороидальности. Расщепление магнитных поверхностей. Магнитные острова. Тиринг-моды.

4. Краевые моды плазмы токамака.

Моды, локализованные на краю плазмы (Edge Localized Modes). Нерешенные проблемы токамака-реактора. Актуальные задачи физики плазмы токамака ИТЭР.

5. МГД-модели устойчивости плазмы.

МГД-модели устойчивости. Идеальная плазма. Роль граничных условий. Стабилизация идеальной стенкой.

6. Проблемы стационарного токамака.

Проблемы стационарного токамака. Тиринг-моды и неоклассические тиринг-моды. Нелинейные эффекты. Винтовое равновесие. Внешние винтовые моды. Стабилизация резистивной стенкой. Динамическая стабилизация. Роль диссипации.

7. Равновесие плазмы в токамаках и стеллараторах.

Пределы по равновесию. Равновесие плазмы в токамаках и стеллараторах. Конфигурации, независимые от давления.

8. Тороидальные эффекты и замыкание токов равновесия.

Баланс сил в тороидальной системе с горячей плазмой. МГД модель. Тороидальные эффекты и замыкание токов равновесия. Удерживающее поле. Два подхода – токамаки и стеллараторы.

9. Управление устойчивостью плазмы в токамаках.

Управление устойчивостью плазмы в токамаках. Замыкание цепи обратной связи. Быстрая и медленная эволюция равновесной плазмы. Роль рассеянных полей. Усиление резонансного поля. Магнитная диагностика.

10. Устойчивость равновесия плазмы.

Устойчивость равновесия плазмы. Основные крупномасштабные неустойчивости плазмы в стационарных токамаках. Характерные инкременты и пределы. Критерий Тройона. Неустойчивость по вертикали. Управление равновесием.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. К. Миямото. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М.: Физматлит, 2007.
2. Hender T.C., Wesley J.C., Bialek J. et al. Progress in the ITER Physics Basis, Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. S128.
3. Бейтман Г. МГД неустойчивости. М.: Энергоиздат, 1982.

Дополнительная литература

1. Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы / Под ред. Леонтовича М.А. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 92.
2. Кадомцев Б.Б. Гидромагнитная устойчивость плазмы // Вопросы теории плазмы / Под ред. Леонтовича М.А. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 132.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

не предусмотрены.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
курс:	1
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.Д. Пустовитов, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в физику токамаков» обучающийся должен:

знать:

- ☐ место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- ☐ принципы симметрии и законы сохранения;
- ☐ новейшие открытия естествознания;
- ☐ постановку проблем физико-химического моделирования;
- ☐ о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- ☐ эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- ☐ представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- ☐ работать на современном экспериментальном оборудовании;
- ☐ абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ использовать вероятностные модели для конкретных процессов и проводить необходимые расчеты в рамках построенной модели;
- ☐ моделировать процессы и анализировать модели с использованием информационных технологий.

владеть:

- ☐ научным методом как исходным принципом познания объективного мира;
- ☐ методологией выбора адекватных методов исследования (наблюдений, теоретических и экспериментальных методов исследований);
- ☐ системным анализом;
- ☐ логикой в научном творчестве;
- ☐ научной картиной мира;
- ☐ математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

- 1) Получить скалярное уравнение равновесия цилиндрической плазмы.
- 2) В цилиндрическом приближении оценить величину диамагнитного сигнала в токамаке.
- 3) Привести уравнение МГД равновесия плазмы к тензорному виду.
- 4) Вывести уравнение для тока равновесия в токамаке.
- 5) Показать, что в токамаке невозможно получить конфигурацию, независимую от давления.
- 6) Из уравнения силовой линии получить выражение для запаса устойчивости в токамаке.
- 7) Получить выражение для магнитного поля в токамаке через полоидальный ток и поток.
- 8) Вывести уравнение Грэда-Шафранова из уравнений равновесия.
- 9) Обосновать принцип виртуального кожуха для тороидальной равновесной плазмы.
- 10) Получить выражение для тороидальной компоненты силы, действующей на плазму в «несимметричном» токамаке.
- 11) Получить условие разрушения магнитных поверхностей под действием малых возмущений.
- 12) Оценить изменение магнитной энергии в расширяющейся равновесной идеальной плазме в токамаке.
- 13) Получить условие разрешимости магнитного дифференциального уравнения в токамаке для периодических функций.
- 14) Оценить отношение полоидальной и тороидальной компонент длинноволновых возмущений в токамаке.
- 15) Методом разложения решить уравнение для магнитных поверхностей в стеллараторе.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Показать, что в токамаке невозможно получить конфигурацию, независимую от давления.
2. Оценить отношение полоидальной и тороидальной компонент длинноволновых возмущений в токамаке.

Пример 2.

1. Вывести уравнение для тока равновесия в токамаке.
2. Обосновать принцип виртуального кожуха для тороидальной равновесной плазмы.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.