

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Равновесие и устойчивость плазмы в токамаке
<b>по направлению:</b>	Ядерные физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра плазменной энергетики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Н.В. Чукашев

Программа обсуждена на заседании кафедры плазменной энергетики 05.04.2023

## Аннотация

В курсе «Равновесие и устойчивость плазмы в токамаке» излагаются основы физики удержания высокотемпературной плазмы в замкнутых (тороидальных) системах. Объём материала рассчитан на 1 семестр и включает в себя законы движения частиц в электромагнитном поле, элементы магнитной гидродинамики, ключевые закономерности поведения плазмы в тороидальных системах с магнитным удержанием (токамаки, стеллараторы). Основная часть курса посвящена основам теории равновесия и устойчивости плазмы в токамаках как наиболее перспективным на роль термоядерного реактора системам. Рассматриваются условия равновесия и крупномасштабные неустойчивости плазмы, представляющие собой одно из главных препятствий на пути к управляемому термоядерному синтезу.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- Получение студентами знаний о физических принципах удержания высокотемпературной плазмы в магнитном поле;
- усвоение студентами основных закономерностей поведения плазмы в токамаке, условий её равновесия и крупномасштабной устойчивости;
- подготовка студентов к работе над проблемой управляемого термоядерного синтеза, в частности, в области теоретической физики плазмы токамака;

#### Задачи дисциплины

- Сформировать у студентов целостные представления об основных проблемах удержания термоядерной плазмы в магнитном поле;
- дать ключевые определения, терминологию, историческую справку и классификацию физических моделей, позволяющие студентам свободно ориентироваться в огромном массиве научной информации по теории равновесия и устойчивости плазмы;
- развить владение аппаратом МГД-уравнений как основным инструментом исследования равновесия и устойчивости плазмы в тороидальных системах;
- дать строгое введение в основные разделы теории равновесия и устойчивости плазмы в токамаке.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Способен составлять общий план работы по заданной теме, предлагать методы исследования и способы обработки результатов, проводить исследования по согласованному с руководителем плану, представлять полученные результаты
	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме
	ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов

ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования, применять знания в области профессиональной деятельности для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.1 Знает методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Основные понятия теории равновесия и устойчивости плазмы в магнитном поле;
- отличительные черты тороидальных систем (токамак, стелларатор, пинч с обращённым полем);
- условия равновесия плазмы, их вывод из МГД-уравнений и пределы применимости;
- модели и методы теоретического исследования равновесия и устойчивости плазмы в токамаке, классификацию мод неустойчивостей, критерии стабилизации;
- ключевые сложности создания термоядерного реактора на основе токамака.

уметь:

- Различать различные тороидальные системы, типы равновесных конфигураций, моды неустойчивостей;
- абстрагироваться от несущественных явлений при моделировании физических процессов;
- использовать полученные знания для решения практических задач теории равновесия и устойчивости;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах.

владеть:

- Аппаратом МГД-уравнений для анализа равновесия плазмы в токамаке;
- математическим формализмом теории устойчивости;
- культурой постановки и решения модельных физических задач в области плазменной энергетики;
- навыками самостоятельной работы с учебной, научной и справочной литературой, поиска и обработки научной и технической информации.

### 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	Движение заряженных частиц в магнитном поле	2	2		3
2	Геометрия магнитного поля в токамаке	2	2		3
3	МГД-уравнения и законы сохранения	2	2		3
4	Диффузия плазмы в тороидальном магнитном поле	2	2		3
5	Уравнение Грэда-Шафранова и его следствия	2	2		3
6	Условия равновесия плазмы в токамаке	2	2		3
7	Магнитная диагностика плазмы токамака	2	2		3
8	МГД-устойчивость равновесия плазмы	2	2		3
9	Идеальные МГД-моды и моды резистивного кожуха: винтовые и осесимметричные моды	2	2		3
10	Желобковые и баллонные неустойчивости	4	4		6
11	Резистивные (тиринг-) моды и срывы	4	4		6
12	Конфигурации с некруглым сечением плазменного шнура	2	2		3
13	Актуальные проблемы физики токамаков-реакторов	2	2		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Задачи и краткий обзор содержания курса. Проблема магнитного удержания плазмы. Уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле. Ларморовское вращение, движение в скрещенных полях. Дрейфовое приближение, центробежный и градиентный дрейфы. Адиабатический инвариант, магнитные пробки.

##### 2. Геометрия магнитного поля в токамаке

Уравнения Максвелла. Представление магнитного поля в аксиально-симметричной системе. Дрейф ведущего центра в тороидальном поле. Вращательное преобразование: токамаки и стеллараторы. Полоидальный и тороидальный магнитные потоки, запас устойчивости. Структура магнитного поля, магнитные поверхности. Расщепление магнитных поверхностей. Магнитные острова.

##### 3. МГД-уравнения и законы сохранения

Магнитогидродинамическое (МГД) описание плазмы. Пределы применимости. Модель электронно-ионной жидкости (двухжидкостная МГД). Закон вмороженности, диффузия магнитного поля в плазму. Уравнения одножидкостной МГД. Баланс сил в плазме. Теорема вириала.

#### 4. Диффузия плазмы в тороидальном магнитном поле

Столкновительная (классическая) диффузия плазмы в тороидальном поле. МГД-описание, приближение отдельных частиц. Пролётные и запертые частицы, банановые траектории. Неоклассическая диффузия плазмы в токамаке (диффузия Галеева-Сагдеева). Бомовская диффузия.

#### 5. Уравнение Грэда-Шафранова и его следствия

Вывод уравнения Грэда-Шафранова из уравнения баланса сил. Внутренняя и внешняя задачи равновесия, граничные условия. Частные решения в окрестности магнитной оси, профили Соловьёва. Принцип виртуального кожуха.

#### 6. Условия равновесия плазмы в токамаке

Решение внешней задачи равновесия для плазмы с круглым поперечным сечением (без вывода). Роль внешнего удерживающего поля. Шафрановское смещение. Токи равновесия в плазме, ток Пфирша-Шлютера. Равновесный предел давления плазмы.

#### 7. Магнитная диагностика плазмы токамака

Магнитные зонды (зонды Мирнова). Определение смещения плазмы с помощью магнитных измерений. Диамагнетизм плазмы и диамагнитные петли. Связь величины диамагнитного сигнала с давлением внутри плазменного шнура.

#### 8. МГД-устойчивость равновесия плазмы

Неустойчивость равновесия плазмы: ключевые причины. Простейшие неустойчивости цилиндрического шнура: неустойчивость перетяжки и винтовая неустойчивость. Линеаризация МГД-уравнений по малым возмущениям равновесия. Задача на собственные значения, инкременты мод. Энергетический принцип.

#### 9. Идеальные МГД-моды и моды резистивного кожуха: винтовые и осесимметричные моды

Винтовые возмущения границы плазменного шнура. Классификация мод, волновые числа. Резонансные магнитные поверхности. Критерий Крускала-Шафранова. Влияние стенки вакуумной камеры, роль омической диссипации. Идеальные МГД-моды и моды резистивного кожуха (Resistive Wall Modes, RWMs).

#### 10. Желобковые и баллонные неустойчивости

Устойчивость границы плазмы. Желобковые (перестановочные) возмущения. Магнитная яма и магнитный шир. Моды, локализованные вблизи резонансной магнитной поверхности. Критерий Сайдема. Баллонные моды.

#### 11. Резистивные (тиринг-) моды и срывы

Учёт конечной проводимости плазмы. Магнитное перезамыкание. Резистивные неустойчивости (тиринг-моды) и генерация магнитных островов. Осцилляции Мирнова. Бутстрэп-ток. Неоклассические тиринг-моды. Пилообразные колебания. Срывы: малый (внутренний) срыв, тепловой срыв (Thermal Quench, TQ) и срыв тока (Current Quench, CQ).

#### 12. Конфигурации с некруглым сечением плазменного шнура

Способы повышения давления плазмы. Переход от круглой к вытянутой (D-образной) форме границы плазмы. Дополнительные методы нагрева плазмы. Дивертор и диверторные конфигурации. L- и H-моды. Неустойчивость вертикального положения плазмы (Vertical Displacement Events, VDE).

### 13. Актуальные проблемы физики токамаков-реакторов

Нерешённые задачи физики токамаков. Моды, локализованные на границе плазмы (Edge Localized Modes, ELMs). Тороидальные альфвеновские моды (Toroidal Alfvén Eigenmodes, TAE-modes). Токамак ИТЭР. Наведённые поля (Error fields). Силы, действующие на стенку вакуумной камеры при срывах. Гашение срывов.

## 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. МГД - неустойчивости [Текст]/Г. Бейтман, -М., Энергоиздат, 1982
2. Основы физики плазмы и управляемого синтеза [Текст] = Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion / К. Миямото ; пер. с англ. под общ. ред. В. Д. Шаfranова ; ред. пер. В. В. Арсенин, В. И. Ильгисонис. — Учебное изд. — М. : Физматлит, 2007. — 424 с.
3. Freidberg J. P. Ideal MHD. New York: Cambridge University Press, 2014.
4. 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.
5. Wesson J. A. Tokamaks, 3rd ed. Oxford: Clarendon Press, 2004.

### Дополнительная литература

1. Физика плазмы для физиков [Текст]/Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев, -М., Атомиздат, 1979
2. Коллективные явления в плазме [Текст]/Б. Б. Кадомцев, -М., Наука, 1988
3. Неустойчивости плазмы в магнитных ловушках [Текст]/А. Б. Михайловский, -М., Атомиздат, 1978
4. Введение в плазмодинамику, Электронная версия печатной публикации / А. И. Морозов. — Москва, Физматлит, 2008
5. Кадомцев Б. Б. Гидромагнитная устойчивость плазмы // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 132.
6. Кадомцев Б. Б. Основы физики плазмы токамака // Итоги науки и техники, серия «Физика плазмы». Т. 10 / Под ред. В.Д. Шаfranова. М.: ВИНТИ, 1991. С. 5.
7. Морозов А. И., Соловьев Л. С. Геометрия магнитного поля // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 3.
8. Соловьев Л. С. Гидромагнитная устойчивость замкнутых плазменных конфигураций // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1972. Вып. 6. С. 210.
9. Шаfranов В. Д. Равновесие плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 92.

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

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://triniti.ru> - электронная библиотека АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ" на внутреннем сайте.
3. <https://user.iter.org> – информационный портал ИТЭР
4. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
5. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

**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 и понятия, 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.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра плазменной энергетики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Н.В. Чукашев



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Способен составлять общий план работы по заданной теме, предлагать методы исследования и способы обработки результатов, проводить исследования по согласованному с руководителем плану, представлять полученные результаты
	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования, применять знания в области профессиональной деятельности для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.1 Знает методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Равновесие и устойчивость плазмы в токамаке» обучающийся должен:

**знать:**

- Основные понятия теории равновесия и устойчивости плазмы в магнитном поле;
- отличительные черты тороидальных систем (токамак, стелларатор, пинч с обращённым полем);
- условия равновесия плазмы, их вывод из МГД-уравнений и пределы применимости;
- модели и методы теоретического исследования равновесия и устойчивости плазмы в токамаке, классификацию мод неустойчивостей, критерии стабилизации;
- ключевые сложности создания термоядерного реактора на основе токамака.

**уметь:**

- Различать различные тороидальные системы, типы равновесных конфигураций, моды неустойчивостей;
- абстрагироваться от несущественных явлений при моделировании физических процессов;
- использовать полученные знания для решения практических задач теории равновесия и устойчивости;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах.

**владеть:**

- Аппаратом МГД-уравнений для анализа равновесия плазмы в токамаке;
- математическим формализмом теории устойчивости;
- культурой постановки и решения модельных физических задач в области плазменной энергетики;
- навыками самостоятельной работы с учебной, научной и справочной литературой, поиска и обработки научной и технической информации.

### **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 или в конце занятия по пройденной теме. Примеры контрольных вопросов:

1. Уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле (в нерелятивистском случае). Основные типы дрейфового движения. Условия применимости дрейфового приближения.
2. Необходимость вращательного преобразования в тороидальных системах. Мера вращательного преобразования. Отличия токамака и стелларатора.
3. Уравнения двухжидкостной МГД. Границы применимости одножидкостной МГД, двухжидкостные эффекты.
4. Типы диффузии плазмы в токамаке. Отличие столкновительной диффузии в токамаке от неоклассической в приближении отдельных частиц.
5. Скалярное уравнение равновесия цилиндрической плазменного шнура. Условия равновесия плазмы в z- и тэта-пинче.
6. Следствия из уравнения баланса сил. Граничные условия задачи равновесия.
7. Механизм токов равновесия и их влияние на равновесие плазмы.
8. Виды магнитной диагностики, измеряемые величины и определяемые параметры плазмы.
9. Устойчивость плазмы в токамаке. Стабилизирующие и дестабилизирующие факторы. Характерные времена.
10. Классификация мод с помощью волновых чисел. Критерий Крускала-Шафранова и его роль в проектировании токамаков. Идеальные моды и роль омической диссипации в стенке вакуумной камеры.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Закон движения заряженной частицы в дрейфовом приближении.
2. Общие свойства магнитного поля. Уравнение силовой линии (магнитное дифференциальное уравнение) и его следствия.
3. Уравнения МГД в модели двух жидкостей. Условия применимости гидродинамического описания плазмы. Вмороженность магнитного поля в плазму.
4. Пролётные и запертые частицы в токамаке, их траектории. Влияние на диффузию плазмы.

5. Уравнение Грэда-Шафранова и его физический смысл.
6. Внутренняя и внешняя задачи равновесия. Методы решения. Шафрановское смещение, равновесие по большому радиусу тора.
7. Ток Пфирша-Шлютера. Равновесный предел давления плазмы.
8. Диамагнетизм плазмы. Магнитная диагностика плазмы токамака.
9. Исследование устойчивости плазмы в магнитном поле. Задача на собственные значения. Энергетический принцип.
10. Идеальные МГД-неустойчивости и моды резистивного кожуха: винтовые и осесимметричные моды.

#### Примеры контрольных заданий

1. Получить закон дрейфа заряженной частицы в скрещенных полях из уравнений движения.
2. Получить смешанное представление магнитного поля в аксиально-симметричной геометрии (через полоидальные ток и поток).
3. Вывести уравнения одножидкостной МГД из двухжидкостной. Получить уравнение диффузии магнитного поля в плазму.
4. Найти коэффициенты классической и неоклассической диффузии плазмы в токамаке в гидродинамическом приближении.
5. Вывести уравнение Грэда-Шафранова из уравнения силового баланса.
6. Обосновать принцип виртуального кожуха для тороидальной равновесной плазмы.
7. Вывести уравнение для тока равновесия в токамаке.
8. В цилиндрическом приближении оценить величину диамагнитного сигнала плазмы.
9. Получить систему линеаризованных МГД-уравнений (относительно малого смещения плазмы). Вывести закон сохранения энергии в МГД.
10. Для консервативной системы (без омической диссипации в стенке токамака) сформулировать энергетический принцип. Записать критерий Крускала-Шафранова для плазмы с произвольной формой границы (без вывода).

#### Примеры экзаменационных билетов:

##### Билет 1.

1. Закон движения заряженной частицы в дрейфовом приближении
2. Пролётные и запертые частицы в токамаке, их траектории. Влияние на диффузию плазмы.

##### Билет 2.

1. Получить смешанное представление магнитного поля в аксиально-симметричной геометрии (через полоидальные ток и поток).
2. Уравнение Грэда-Шафранова и его физический смысл.

##### Билет 3.

1. Уравнения МГД в модели двух жидкостей. Условия применимости гидродинамического описания плазмы. Вмороженность магнитного поля в плазму.
2. Найти коэффициенты классической и неоклассической диффузии плазмы в токамаке в гидродинамическом приближении.

##### Билет 4.

1. Внутренняя и внешняя задачи равновесия. Методы решения. Шафрановское смещение, равновесие по большому радиусу тора.
2. Обосновать принцип виртуального кожуха для тороидальной равновесной плазмы.

##### Билет 5.

1. Уравнения МГД в модели двух жидкостей. Условия применимости гидродинамического описания плазмы. Вмороженность магнитного поля в плазму.
2. Получить систему линеаризованных МГД-уравнений (относительно малого смещения плазмы). Вывести закон сохранения энергии в МГД.

## Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он показал 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 (9)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые были самостоятельно обнаружены и исправлены;

оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые после указания экзаменатора были самостоятельно исправлены;

оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает неточности в ответе или делает несущественные ошибки при решении задач;

оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает небольшие ошибки в ответе и (или) при решении задач;

оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но отвечает неуверенно и (или) допускает ошибки при решении задач;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, если при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, не владеющему некоторыми разделами учебной программы, но умеющему применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;

оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, показавшему полное незнание учебной программы дисциплины.

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

При проведении устного экзамена студенту предоставляется 45 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене, как правило, длится около 1 астрономического часа, но не более 2-х часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, справочной литературой, вычислительной техникой и своими конспектами.