

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

_____ М.Ю. Глявин

« _____ 20__ г.

Рабочая программа дисциплины

Методы магнитного удержания плазмы

Уровень высшего образования
Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки / специальность
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность образовательной программы
01.04.08 «Физика плазмы»

Квалификация (степень)
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

20__

1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Методы магнитного удержания плазмы» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование представления о физических основах реализации управляемого термоядерного синтеза в системах с магнитным удержанием плазмы;
- формирование профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.08 «Физика плазмы».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и этап формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта (этап освоения – базовый)</i>	<i>З1 (ПК-2) Знать основные направления современных научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</i> <i>У1 (ПК-2) Уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного.</i> <i>В1 (ПК-2) Владеть навыками проведения научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.</i>
ПК-3 <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки) (этап освоения – базовый)</i>	<i>З1 (ПК-3) Знать основные разделы дисциплины, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач</i> <i>У1 (ПК-3) Уметь применять полученные в ходе освоения дисциплины знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач</i> <i>В1 (ПК-3) Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях</i>

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
1. Термоядерная реакция и условия её реализации в магнитных системах	9	3		3	6
2. Дрейфовая теория движения частиц в магнитных полях.	9	3		3	6
3. Магнитная гидродинамика (МГД)	9	3		3	6
4. Крупномасштабные МГД - неустойчивости	9	3		3	6
5. Дрейфовые неустойчивости	9	3		3	6
6. Кинетические неустойчивости	8	3		3	5
7. Удержание плазмы в прямых ловушках	8	3		3	5
8. «Новое поколение» прямых ловушек	8	3		3	5
9. Основные принципы удержания плазмы в тороидальных системах	8	3		3	5
10. Движение частиц в тороидальных системах	8	3		3	5
11. Режим диффузии Пфирша – Шлютера	7	2		2	5
12. Режим диффузии Галеева – Сагдеева	7	2		2	5
13. О связи процессов токообразования и диффузии в замагниченной плазме (бутстрэп – ток).	7	2		2	5
в т.ч. текущий контроль			4		
Промежуточная аттестация – зачет				2	
Итого		108			

Содержание разделов дисциплины

Термоядерная реакция и условия её реализации в магнитных системах.

Понятие о термоядерной реакции. Почему термоядерное горючее должно оказаться в состоянии плазмы? Скорость реакции. Критерий Лоусона. Самоподдерживающиеся термоядерные реакции и термоядерные реакции с внешним вводом энергии. Характерные времена потерь в «свободной» плазме. Понятие о магнитном удержании. Теорема Бора - Ван Левен; почему плазма в магнитной системе принципиально неравновесна? Основные механизмы распада магнитоактивной плазмы.

Дрейфовая теория движения частиц в магнитных полях.

Дрейфовое приближение. Почему дрейфовое приближение «обязано» работать в установках УТС? Производящая задача о дрейфе в «скрещенных» постоянных электрическом и магнитном полях. Метод квазичастиц. Всегда ли эквивалентны выражения для сил, действующих на электрический и магнитный диполи? Дрейфы поперёк магнитного поля в стационарных полях: градиентарный дрейф и дрейф из-за кривизны силовых линий. Дрейф под действием нестационарной силы (инерционный дрейф); «поперечная» статическая поляризуемость замагниченной плазмы. Первый адиабатический инвариант. Сохраняется ли магнитный момент при учёте релятивистских эффектов? Движение частиц в магнитных трубках с переменным сечением.

Магнитная гидродинамика.

Уравнения двухжидкостной магнитной гидродинамики. Уравнение переноса массы. Уравнение для тока (закон Ома). Закон Ома в «одножидкостном» приближении и условия его применимости. Закон Ома в «двухжидкостном» приближении и условия его применимости; отличия «двухжидкостного» приближения для ВЧ и НЧ полей. Приближение несжимаемости. Приближение «вмороженности». Что возможно и что невозможно в рамках идеальной магнитогидродинамики? «Вмороженность» в электроны при медленных движениях. Различные представления для объёмной плотности силы Ампера; «упругость» силовых линий. «Автоматически амбиполярная» диффузия поперёк магнитного поля в полностью ионизованной плазме: МГД-подход и кинетический подход.

Крупномасштабные МГД-неустойчивости.

Плазменные пинчи: «змейки» и «перетяжки». Идеальный плазменный шнур с «кривой» границей. Граничные условия. Дисперсионное уравнение для МГД-колебаний идеального плазменного шнура. Желобковая и винтовая неустойчивости. Упрощенный подход к анализу желобковой неустойчивости; стабилизирующая роль неколлинеарности магнитного поля и «желобка».

Дрейфовые неустойчивости.

Квазиэлектростатическая мода в плавнонеоднородной плазме. Динамические уравнения в приближении низких частот и больших масштабов. Уравнения для тока: приближение квазинейтральности. Решение динамических уравнений: за какие члены ответственны различные механизмы дрейфа? Бесстолкновительная плазма: дисперсионное уравнение для дрейфовой волны. Столкновительная плазма: диссипативная неустойчивость. Другие примеры диссипативных неустойчивостей. Диффузия частиц на дрейфовых волнах. Феноменологическая теория диффузии Бома. Почему бомовская диффузия не стала фатальным фактором для программы УТС?

Кинетические неустойчивости.

О различных подходах к исследованию неустойчивостей в неравновесных коллективах заряженных частиц. О методе квантовых аналогий в классической теории излучения. Что такое фотон в среде? Сопоставление квантовых и классических характеристик случайных полей: число квантов и спектральная интенсивность, спектральная мощность излучателя. Излучение волн частицами: уровни Ландау, законы сохранения. Условие Доплера, нормальный и аномальный эффекты Доплера. Метод коэффициентов Эйнштейна; переход от дискретных уровней к непрерывному энергетическому спектру. Критерий неустойчивости; переход к формуле Ландау для черенковской неустойчивости. Возможно ли получить спонтанное излучение в рамках метода кинетического уравнения?

Удержание плазмы в прямых ловушках.

«Конус потерь» в прямой ловушке. Кулоновские потери: первая задача Будкера. Амбиполярные режимы удержания: гиперболоид потерь; формула Пастухова.

Стабилизация неустойчивых по желобковой неустойчивости конфигураций проводящими торцами; баллонная неустойчивость. Касповая конфигурация. Устойчивые по желобковой неустойчивости конфигурации типа «рыбий хвост». Стабилизирующие обмотки («палки Иоффе», «Инь-Янь»); конфигурация «Бейсбол». Критерий интегральной устойчивости. Аксиально симметричные магнитные якоря. Вторая задача Будкера.

«Новое поколение» прямых ловушек.

Идея амбиполярного удержания. Потенциал Юшманова; создание популяции анизотропных ионов в тандемной конфигурации. Уравнение для потенциала; идея термобарьера. «Плещущиеся ионы» и анизотропные электроны: роль циклотронного нагрева. Неоклассическая диффузия в аксиальнонесимметричных конфигурациях: второй адиабатинвариант и дрейфовые поверхности; расщепление резонансных дрейфовых поверхностей; «банановый» режим диффузии. Газодинамическая ловушка; ловушка с вращающейся плазмой.

Основные принципы удержания плазмы в тороидальных системах.

Проблема устойчивости по большому радиусу. Стабилизация вертикальным полем. Стабилизация винтовым полем: система магнитных поверхностей. Стелларатор. Токамак: случай барона Мюнхаузена. Комбинация винтового и вертикального полей в токамаке: устойчивость системы вложенных магнитных поверхностей; шафрановский сдвиг. МГД-устойчивость тороидальных систем; критерий Шафранова-Крускала. Резонансные магнитные поверхности; образование «магнитных островов».

Движение частиц в тороидальных системах.

Неоднородность тороидального поля. Дрейф и «вращение» по магнитной поверхности: что в результате? Пролётные частицы. Последовательность «магнитных зеркал» вдоль силовой линии в тороидальной системе, «конус захвата» в фазовом пространстве; банановые частицы.

Режимы диффузии Пфирша-Шлютера и Галеева-Сагдеева.

К чему приводит конечная проводимость? КвазиМГД подход. Дрейфовый ток и ток проводимости в режиме квазинейтральности. «Усредненный» дрейф через магнитную поверхность. Коэффициент диффузии Пфирша-Шлютера; критерии справедливости квазиМГД подхода.

Переходы «Пролёт»-«Банан»-«Пролёт» в фазовом пространстве; времена переходов. Коэффициент диффузии Галеева-Сагдеева; критерии корректности разделения фазового пространства на «пролётную» и «банановую» области. Общая картина диффузии в тороидальной системе; режим «плато»; общее понятие о неоклассических эффектах.

О связи процессов токообразования и диффузии в замагниченной плазме.

Магнитное поле с прямыми силовыми линиями как пример для демонстрации различных подходов при расчёте тока: из условий равновесия; из анализа движения частиц; через диффузионный поток (холловский режим). Продольный ток в цилиндре с диффундирующей замагниченной плазмой. Квазидиамагнитный ток банановых частиц. Неоклассическое увлечение пролётных частиц; бутстрэп ток.

4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Методы магнитного удержания плазмы» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Используются следующие виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

Зачтено	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов.
Не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.

6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

1. Критерий Лоусона.
2. Амбиполярная ловушка (тандем).
3. Инерциальный дрейф частиц.
4. Движение пролетных и банановых частиц в тороидальных системах.
5. Дрейф частиц в неоднородном стационарном магнитном поле.
6. Диффузия полностью ионизованной плазмы в магнитном поле.
7. Условия МГД - равновесия плазмы.
8. Дрейфово – диссипативная неустойчивость и диффузия Бома.
9. МГД – устойчивые конфигурации пробкотронов.
10. Равновесие плазмы в тороидальной системе.
11. Желобковая неустойчивость.
12. Разрушение магнитных поверхностей токамаков в области целочисленных q .

13. Критерий возникновения кинетических неустойчивостей.
14. Задача о ловушке с вращающейся плазмой.
15. Кулоновское время жизни в пробкотронах.
16. Неоклассическая диффузия (диффузия Галеева–Сагдеева) в тороидальных системах.
17. Диффузия Пфирша – Шлютера.
18. Винтовая неустойчивость и критерий Шафранова – Крускала.
19. Амбиполярные потери плазмы в пробкотронах.
20. Задача о преобразовании «конуса потерь» в пробкотронах в «гиперболоид потерь».
21. Бутстрэп – ток.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

- 1) Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 10: Физическая кинетика. – 4 экз.
- 2) Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. – 5 экз.
- 3) *Б.Б. Кадомцев.* Коллективные явления в плазме. М.: Наука, -304 с. -4 экз.
- 4) *Л.А. Арцимович, Р.З. Сагдеев.* Физика плазмы для физиков. Атомиздат, 1979. -317 с. – 5 экз.
- 5) Сборник научных трудов «Высокочастотный нагрев плазмы», под.ред. А.Г. Литвака. ИПФ АН. 1983. [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН]
<http://www.iapras.ru/biblio/img/vnp.pdf>

б) дополнительная литература:

- 1) *С.В. Мирнов.* Физические процессы в плазме токамаков. М.: Энергоатомиздат, 1985. -185 с. –2 экз.
- 2) *В.Е. Голант, А.П. Жилинский, А.С. Сахаров.* Основы физики плазмы. Атомиздат, 1977. -384 с. –1 экз.
- 3) Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968. – 2 экз.
- 4) Фортов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: ОИХФ, 1984. – 3 экз.
- 5) Proceedings of the International Workshop Strong Microwaves in Plasmas, V.1, 2006 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН]
http://www.iapras.ru/biblio/smp/SMP2005_1.pdf
- 6) Proceedings of the International Workshop Strong Microwaves in Plasmas, V.2, 2006 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН]
http://www.iapras.ru/biblio/smp/SMP2005_2.pdf
- 7) Proceedings of the International Workshop Strong Microwaves in Plasmas, V.1, 2003 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН]
http://www.iapras.ru/biblio/smp/SMP2003_1.pdf
- 8) Proceedings of the International Workshop Strong Microwaves in Plasmas, V.2, 2003 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН]
http://www.iapras.ru/biblio/smp/SMP2003_2.pdf

в) Интернет-ресурсы

- 1) Physics of Plasmas <http://phys.org/journals/physics-of-plasmas/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);

- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.08 Физика плазмы.

Автор программы _____ А.В. Сидоров

Ответственный за направление подготовки _____ Вл.В. Кочаровский

Рецензент:

Зав.сектором нелинейной и квантовой оптики
конденсированных и плазмоподобных сред

_____ М.Д. Токман,
д.ф.м.н., профессор

Программа принята на заседании Ученого совета Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОФПиЭБМ _____ О.С. Моченева

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОГИиЦГ _____ М.В. Шаталина

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОНДиО _____ А.В. Коржиманов

Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

ПК-2: Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные направления современных научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного.	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками проведения научных исследований в области управляемого термоядерного синтеза с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %

ПК-3: Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные разделы дисциплины, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь применять полученные в ходе освоения дисциплины знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %