

**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)**

<b>по дисциплине:</b>	Физика плазмы
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Термоядерная энергетика и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Экзамен

8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 150 всего, в том числе:

лекции: 90 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 150 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 360, всего зач. ед.: 8

Программу составил: П.В. Попов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Физика плазмы" предусматривает освоение студентами фундаментальных знаний в области физики плазмы, математических методов исследования плазменных процессов, происходящих в наиболее известных плазменных устройствах типа токамак, а также в природных условиях.

Задачи курса:

- формирование базовых знаний в области физики плазмы, освоение студентами теоретических методов анализа плазменных явлений, проявляющихся как в экспериментальных установках, так и в природе;
- развитие у студентов творческого подхода к выбору методов теоретического анализа различных плазменных явлений;
- подготовка студентов к работе на реальных экспериментальных установках по управляемому термоядерному синтезу (ТОКАМАК).

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- историю становления направления развития теоретической физики – физики плазмы;
- основные теоретические модели описания плазмы;
- пределы применимости гидродинамического и кинетического описания процессов в плазме;
- представление о равновесии плазмы;
- распространение магнитогиродинамических волн в плазме;
- потенциальные волны в плазме;
- неустойчивости плазмы;
- затухание волн в плазме;
- перенос вещества и энергии в плазме;
- перспективы нагрева плазмы в ТОКАМАКЕ.

Уметь:

- быстро осваивать новые экспериментальные методы и теоретические модели в плазменных исследованиях;
- квалифицированно анализировать результаты экспериментальных и теоретических исследований;
- доводить до сведения научной общественности (выступление на семинарах, конференциях, публикации в научных журналах) результаты проведённой научной работы.

Владеть:

- навыками освоения большого объёма информации;
- навыками работы в коллективе лаборатории и самостоятельной работы;
- умением искать теоретические объяснения экспериментальным результатам и экспериментальные подтверждения теоретическим моделям

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

Темы и разделы:

1. Гидродинамическое описание плазмы
2. Движение заряженных частиц в магнитном поле
3. Двухжидкостная гидродинамика
4. Джоулева диссипация магнито – гидродинамических волн
5. Методы рассмотрения волновых процессов
6. Непотенциальные волны в плазме с магнитным полем (магнито-гидродинамические волны)
7. Потенциальные волны в плазме с электронными и ионными потоками
8. Потенциальные и непотенциальные волны в пространственно неоднородной плазме
9. Термодинамика плазмы
10. Трёхкомпонентная гидродинамика
11. Электростатические колебания в плазме
12. Затухание волн в плазме с магнитным полем (черенковское и циклотронное)

13. Кинетические неустойчивости
14. Колебания и волны в пылевой плазме
15. Механизм затухания Ландау ленгмюровских и ионно-звуковых волн
16. Моменты функции распределения. Получение уравнений гидродинамики из кинетического уравнения
17. Неустойчивость не полностью ионизованной плазмы (ионизационная, дрейфово-диссипативная неустойчивость звука, пучково-резистивная неустойчивость)
18. Неустойчивость плазмы
19. Неустойчивость токового шнура, границы «плазма-магнитное поле» (желобковая неустойчивость). Пучковые неустойчивости
20. Статический метод описания плазмы
21. Физические процессы в пылевой плазме
22. Явления переноса в плазме

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области физики плазмы, математических методов исследования плазменных процессов, происходящих в наиболее известных плазменных устройствах типа токамак, а также в природных условиях.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики плазмы, освоение студентами теоретических методов анализа плазменных явлений, проявляющихся как в экспериментальных установках, так и в природе;
- развитие у студентов творческого подхода к выбору методов теоретического анализа различных плазменных явлений;
- подготовка студентов к работе на реальных экспериментальных установках по управляемому термоядерному синтезу (ТОКАМАК).

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- историю становления направления развития теоретической физики – физики плазмы;
- основные теоретические модели описания плазмы;
- пределы применимости гидродинамического и кинетического описания процессов в плазме;
- представление о равновесии плазмы;
- распространение магнитогидродинамических волн в плазме;
- потенциальные волны в плазме;
- неустойчивости плазмы;
- затухание волн в плазме,
- перенос вещества и энергии в плазме;
- перспективы нагрева плазмы в ТОКАМАКЕ.

уметь:

- быстро осваивать новые экспериментальные методы и теоретические модели в плазменных исследованиях;
- квалифицированно анализировать результаты экспериментальных и теоретических исследований;
- доводить до сведения научной общественности (выступление на семинарах, конференциях, публикации в научных журналах) результаты проведённой научной работы.

владеть:

- навыками освоения большого объёма информации;
- навыками работы в коллективе лаборатории и самостоятельной работы;
- умением искать теоретические объяснения экспериментальным результатам и экспериментальные подтверждения теоретическим моделям.

#### 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	Гидродинамическое описание плазмы	3	4		9
2	Движение заряженных частиц в магнитном поле	4	4		9
3	Двухжидкостная гидродинамика	3	2		9
4	Диссипация	3	2		10
5	Методы рассмотрения волновых процессов	3	2		10
6	Непотенциальные волны в плазме с магнитным полем (магнито-гидродинамические волны)	6	2		9
7	Волны в плазме	3	2		5
8	Потенциальные и непотенциальные волны в пространственно неоднородной плазме	3	2		3
9	Термодинамика плазмы	6	4		5
10	Трехкомпонентная гидродинамика	3	2		3
11	Электростатические колебания в плазме	8	4		3
12	Затухание волн в плазме	3	2		9
13	Кинетические неустойчивости	2	2		9
14	Колебания волн	4	3		9
15	Механизм затухания Ландау ленгмюровских и ионно-звуковых волн	4	4		9

16	Моменты функции распределения. Получение уравнений гидродинамики из кинетического уравнения	4	2		9
17	Неустойчивость не полностью ионизованной плазмы	3	4		3
18	Неустойчивость плазмы	3	2		3
19	Неустойчивость токового шнура, границы «плазма-магнитное поле»	6	2		9
20	Статический метод описания плазмы	6	2		3
21	Физические процессы в пылевой плазме	4	3		3
22	Явления переноса в плазме	6	4		9
Итого часов		90	60		150
Подготовка к экзамену		60 час.			
Общая трудоёмкость		360 час., 8 зач.ед.			

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

##### Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Гидродинамическое описание плазмы

Гидродинамическое описание плазмы. Уравнения магнитной гидродинамики. Магнитная гидродинамика идеально проводящей жидкости. Свойство «вмороженности» магнитного поля в плазму. Скинирование высокочастотного поля.

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

Движение заряженных частиц в магнитном поле. Дрейфы частиц (электрический, центробежный, в неоднородном магнитном поле, поляризационный). Адиабатические инварианты. Магнитная ловушка.

##### 3. Двухжидкостная гидродинамика

Двухжидкостная гидродинамика. Обобщенный закон Ома, анизотропия проводимости. Пределы применимости одножидкостной гидродинамики.

##### 4. Диссипация

Джоулева диссипация магнито – гидродинамических волн.

##### 5. Методы рассмотрения волновых процессов

Методы рассмотрения волновых процессов. Дисперсные уравнения.

##### 6. Непотенциальные волны в плазме с магнитным полем (магнито-гидродинамические волны)

Непотенциальные волны в плазме с магнитным полем (магнито-гидродинамические волны). Дисперсия магнито – гидродинамических волн. Коэффициенты преломления. Зависимость дисперсии от угла между волновым вектором и магнитным полем. Высокочастотные волны в магнитной плазме.

##### 7. Волны в плазме

Потенциальные волны в плазме с электронными и ионными потоками.

#### 8. Потенциальные и непотенциальные волны в пространственно неоднородной плазме

Потенциальные и непотенциальные волны в пространственно неоднородной плазме (дрейфовые, ионно-звуковые, альфвеновские).

#### 9. Термодинамика плазмы

Термодинамика плазмы. Температура тепловая и кулоновская энергия плазмы. Дебаевское экранирование. Кулоновская поправка к уравнению состояния идеального газа. Равновесная ионизация, формула Саха. Неидеальная плазма.

#### 10. Трехкомпонентная гидродинамика

Трехкомпонентная гидродинамика. Процессы переноса (проводимость, диффузия, амбиполярная диффузия).

#### 11. Электростатические колебания в плазме

Электростатические колебания в плазме: высокочастотные (электронные ленгмюровские), низкочастотные (ленгмюровские, ионно-звуковые). Дисперсия волн.

Семестр: 8 (Весенний)

#### 12. Затухание волн в плазме

Затухание волн в плазме с магнитным полем (черенковское и циклотронное).

#### 13. Кинетические неустойчивости

Кинетические неустойчивости (явления убегающих электронов, пучково-резистивная неустойчивость в бесстолкновительной плазме).

#### 14. Колебания волн

Колебания и волны в пылевой плазме.

#### 15. Механизм затухания Ландау ленгмюровских и ионно-звуковых волн

Механизм затухания Ландау ленгмюровских и ионно-звуковых волн. Условие слабого затухания.

#### 16. Моменты функции распределения. Получение уравнений гидродинамики из кинетического уравнения

Моменты функции распределения. Получение уравнений гидродинамики из кинетического уравнения. Уравнения переноса. Обобщение двухжидкостной гидродинамики для полностью ионизированной плазмы.

#### 17. Неустойчивость не полностью ионизированной плазмы

Неустойчивость не полностью ионизированной плазмы (ионизационная, дрейфово-диссипативная неустойчивость звука, пучково-резистивная неустойчивость).

#### 18. Неустойчивость плазмы

Устойчивость плазмы. Методы исследования (энергетический принцип, метод собственных колебаний). Классификация неустойчивостей (кинетические, гидродинамические, апериодические, колебательные, сносные).

#### 19. Неустойчивость токового шнура, границы «плазма-магнитное поле»

Неустойчивость токового шнура, границы «плазма-магнитное поле» (желобковая неустойчивость). Пучковые неустойчивости.

#### 20. Статический метод описания плазмы

Статический метод описания плазмы. Применимость кинетического уравнения для плазмы. Учет дальних и ближних взаимодействий. Кинетическое уравнение с самосогласованным полем. «Столкновительные» члены кинетического уравнения (в форме Больцмана, Ландау, Крука). Уравнение Фоккера – Планка.

#### 21. Физические процессы в пылевой плазме

Физические процессы в пылевой плазме. Электростатический потенциал вокруг пылевой частицы. Взаимодействие между пылевыми частицами.

#### 22. Явления переноса в плазме

Явления переноса в плазме (диффузия, термодиффузия, вязкость, теплопроводность, электропроводность, потоки тепла, обмен энергии между электронами и ионами). Качественные оценки коэффициентов переноса. Влияние магнитного поля на явления переноса.

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

учебная аудитория, персональные компьютеры с доступом в Интернет.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. Изд. дом Интеллект, 2008г.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Физическая кинетика. Теор. физика, т.10, 2001
3. Фортис В.Е. и др. Пылевая плазма. УФН май 2004г. т. 174, №5 с 495-544.
4. Игнатов А.М. Физические процессы в пылевой плазме. Физика плазмы 2005 г. т 31 №1 с 52-63. Basics of Dusty Plasma A. M. Ignatov p.46 abstract.

#### Дополнительная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред Теор. физика, т.8, 1982г
2. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. Наука, 1976 г.

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

1. [http://www.maik.ru/contents/plasphys/plasphys\\_1\\_5v31cont.htm](http://www.maik.ru/contents/plasphys/plasphys_1_5v31cont.htm)
2. [http://mipt.ru/study/net\\_libr/](http://mipt.ru/study/net_libr/).

### 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)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Термоядерная энергетика и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
7 (осенний) - Экзамен	
8 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	П.В. Попов, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика плазмы» обучающийся должен:

### знать:

- историю становления направления развития теоретической физики – физики плазмы;
- основные теоретические модели описания плазмы;
- пределы применимости гидродинамического и кинетического описания процессов в плазме;
- представление о равновесии плазмы;
- распространение магнитогиродинамических волн в плазме;
- потенциальные волны в плазме;
- неустойчивости плазмы;
- затухание волн в плазме;
- перенос вещества и энергии в плазме;
- перспективы нагрева плазмы в ТОКАМАКЕ.

### уметь:

- быстро осваивать новые экспериментальные методы и теоретические модели в плазменных исследованиях;
- квалифицированно анализировать результаты экспериментальных и теоретических исследований;
- доводить до сведения научной общественности (выступление на семинарах, конференциях, публикации в научных журналах) результаты проведённой научной работы.

### владеть:

- навыками освоения большого объёма информации;
- навыками работы в коллективе лаборатории и самостоятельной работы;
- умением искать теоретические объяснения экспериментальным результатам и экспериментальные подтверждения теоретическим моделям.

## 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 в 7 семестре:

- 1.Термодинамика плазмы, Дебаевское экранирование, кулоновская поправка к уравнению состояния идеального газа, равновесная ионизация. Неидеальная плазма.
- 2.Движение заряженных частиц в магнитном поле. Адиабатические инварианты.
- 3.Уравнения магнитной гидродинамики. «Вмороженность» магнитного поля в плазму, скинирование высокочастотного поля.
- 4.Двухжидкостная магнитная гидродинамика. Обобщённый закон Ома.

- 5.Трёхкомпонентная гидродинамика. Процессы переноса (проводимость, диффузия, амбиполярная диффузия).
- 6.Волновые процессы в плазме. Дисперсионные уравнения.
- 7.Электростатические колебания. Колебания в плазме с потоками электронов и ионов.
8. Магнито-гидродинамические (непотенциальные) волны.
- 9.Волны в пространственно неоднородной плазме.

Вопросы к экзамену в 8 семестре:

- 1.Классификация неустойчивостей плазмы. Методы исследования неустойчивостей.
- 2.Желобковая неустойчивость.
- 3.Пучковые неустойчивости.
- 4.Ионизационная неустойчивость.
- 5.Дрейфово-диссипативная неустойчивость звука.
- 6.Пучково-резистивная неустойчивость.
- 7.Статистический метод описания плазмы. Кинетическое уравнение с самосогласованным полем.
- 8.«Столкновительные» члены кинетического уравнения (в форме Больцмана, Крука, Ландау).
- 9.Уравнение Фоккера-Планка.
- 10.Механизм Ландау затухания потенциальных волн.
- 11.Циклотронное затухание волн в плазме с магнитным полем.
- 12.Кинетические неустойчивости (явление убегающих электронов, пучково-резистивная неустойчивость в бесстолкновительной плазме).
- 12.Получение уравнений гидродинамики из кинетического уравнения.
- 14.Явления переноса в плазме (диффузия, вязкость, теплопроводность, электропроводность, теплопроводность). Качественные оценки коэффициентов переноса.
- 15.Влияние магнитного поля на коэффициенты переноса.
- 16.Физические процессы в пылевой плазме. Электростатический потенциал вблизи пылевой частицы. Взаимодействие между пылевыми частицами.
- 17.Колебания и волны в пылевой плазме.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Термодинамика плазмы, Дебаевское экранирование, кулоновская поправка к уравнению состояния идеального газа, равновесная ионизация. Неидеальная плазма.
2. Трёхкомпонентная гидродинамика. Процессы переноса (проводимость, диффузия, амбиполярная диффузия).

Пример 2.

1. Пучковые неустойчивости.
2. Явления переноса в плазме (диффузия, вязкость, теплопроводность, электропроводность, теплопроводность). Качественные оценки коэффициентов переноса.

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