

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
природоподобных, плазменных и  
ядерных технологий им. И.В.**

**Курчатова**

**Т.Е. Григорьев**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Гидродинамика плазмы
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

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

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 27.03.2025

## Аннотация

Курс "Гидродинамика 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
Итого часов		45	30		75
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	180 час., 4 зач.ед.
--------------------	---------------------

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

Семестр: 6 (Весенний)

##### 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.

## 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

Фонд литературы кафедры

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. Фортов 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

Фонд литературы кафедры

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>	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	<u>3</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (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 «Гидродинамика 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 6 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.

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.