

**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>	Явления переноса в плазме
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Термоядерные и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет  
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: К.В. Чукбар, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 31.03.2025

## Аннотация

Курс "Явления переноса в плазме" предусматривает освоение студентами фундаментальных знаний в области физики сплошных сред, изучение основных современных подходов к описанию транспорта в различных флюидах.

Задачи курса:

- формирование базовых знаний в области физики плазмы как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов принципам описания и расчёта переноса частиц, энергии, электромагнитного поля и других субстанций в экспериментальных установках и природных объектах;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Базовое уравнение электронной магнитной гидродинамики (ЭМГ)
2. Выход за пределы диффузионной парадигмы
3. Диссипация в идеальных течениях
4. Диффузионные модели конвективного турбулентного транспорта
5. Понятие об ЭМГ-сопротивлении
6. Пучки заряженных частиц в плазме
7. Роль инерции электронов в ЭМГ-явлениях
8. Специфика гидродинамического описания сплошных сред
9. Статистика и модели развитой турбулентности
10. Фундаментальность закона вмороженности
11. Эволюция магнитного поля в модели ЭМГ
12. Базовое уравнение лучистого энергопереноса

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области физики сплошных сред, изучение основных современных подходов к описанию транспорта в различных флюидах.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики плазмы как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов принципам описания и расчёта переноса частиц, энергии, электромагнитного поля и других субстанций в экспериментальных установках и природных объектах;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

<p>решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты</p>	<p>ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели</p>
	<p>ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты</p>

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

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

уметь:

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

владеть:

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

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Базовое уравнение электронной магнитной гидродинамики (ЭМГ)		3		
2	Выход за пределы диффузионной парадигмы		3		
3	Диссипация в идеальных течениях		3		15
4	Диффузионные модели конвективного турбулентного транспорта		3		
5	Понятие об ЭМГ-сопротивлении		3		

6	Пучки заряженных частиц в плазме		3		
7	Роль инерции электронов в ЭМГ-явлениях		3		
8	Специфика гидродинамического описания сплошных сред		3		
9	Статистика и модели развитой турбулентности		2		
10	Фундаментальность закона вмерзженности		2		
11	Эволюция магнитного поля в модели ЭМГ		2		
12	Базовое уравнение лучистого энергопереноса		3		
13	Глобальное описание лучистого транспорта		3		
14	Излучение/поглощение в дискретном спектре		3		
15	Недиффузионные блуждания квантов		3		
16	Особенности излучения в корональной плазме		3		
17	Приближение лучистой теплопроводности		3		
18	Роль излучения в термоядерном горении		2		
19	Специфика описания фотонного газа		3		
20	Тормозное излучение/поглощение		3		
21	Фоторекомбинационное излучение и фотоэффект		2		
22	Элементарные процессы в плазме с участием электронов и фотонов		2		30
Итого часов			60		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Базовое уравнение электронной магнитной гидродинамики (ЭМГ)

Двужидкостная гидродинамика и вмерзженность ротора обобщённого импульса. Базовые уравнения ЭМГ. Ограничения на параметры модели. Энергия, импульс и вектор Пойнтинга в этом приближении. Зависимость эффектов от геометрии.

##### 2. Выход за пределы диффузионной парадигмы

Эффект скоррелированного сноса. Специфика нестационарной конвекции. Роль пространственной размерности в стохастике. Примеры недиффузионных режимов, номенклатура процессов.

##### 3. Диссипация в идеальных течениях

Стационарные течения «без просвета». Проблемы с бездиссипативным описанием. Нагрев плазмы и движение ионов. Тензор удельного сопротивления плазмы: магнетосопротивление и эффект Холла. Трёхкомпонентная среда.

#### 4. Диффузионные модели конвективного турбулентного транспорта

Специфика турбулентного конвективного переноса. Стационарный двумерный случай и «затравочная» диффузия. Две теоремы и понятие эффективной диффузии. Три точно решаемые модели. Общий одномасштабный случай, фракталы.

#### 5. Понятие об ЭМГ-сопротивлении

ЭМГ-повышение диссипации. «Эффективная проводимость» с формальной и полевое представление ЭМГ-сопротивления. Универсальная формула 30 и/с Ом. Мелкомасштабные флуктуации концентрации и мезоскопическое усреднение. Геометрические эффекты.

#### 6. Пучки заряженных частиц в плазме

Генерация пучков в диодах, релятивизм. Пучки в плазме, соотношение кинетических и полевых составляющих энергии и импульса частиц. Дрейфовое движение в сильноточном пучке, кинетика. Диффузные и скинированные пучки-пинчи. Усиление взаимодействия со средой.

#### 7. Роль инерции электронов в ЭМГ-явлениях

Размер и роль инерции при генерации малых масштабов в ЭМГ. Нетривиальность двумерных стационарных течений при общем законе вмороженности. Задача о скине, конвективные волны и ЭМГ-сопротивление с учётом инерции электронов. Инжекция пучков в плазму: дополнительна конвекция и эффект объёмного «размораживания».

#### 8. Специфика гидродинамического описания сплошных сред

Уравнения гидродинамики. Законы сохранения. Вмороженность. Магнитная гидродинамика заряженной жидкости. Связь с кинетикой.

#### 9. Статистика и модели развитой турбулентности

Турбулентность с широким инерционным интервалом, закон Колмогорова-Обухова. Относительная диффузия и закон Ричардсона. Усреднение по реализациям. Специфика статистики. Размешивание лагранжевых инвариантов.

#### 10. Фундаментальность закона вмороженности

Механическая подоплёка вмороженности. Физические примеры, классические и квантовые. Двумерный случай: потоковая функция и скобка Пуассона. Бездиссипативная ЭМГ в двумерных геометриях: стационарные течения.

#### 11. Эволюция магнитного поля в модели ЭМГ

Динамика магнитного поля в среде с обычным законом Ома. Нестационарный снос в ЭМГ, определяющие параметры и роль диссипации. Задача о скине: точные решения и простые аналогии. Вектор Пойнтинга и общий баланс энергии. Зависимость от геометрии – тонкие плёнки.

Семестр: 2 (Весенний)

#### 12. Базовое уравнение лучистого энергопереноса

Этапы прохождения света сквозь среду. Основное уравнение лучистого переноса в общем случае и в равновесной плазме. Установление равновесия излучения с веществом. Общее решение задачи в базовом варианте.

### 13. Глобальное описание лучистого транспорта

Излучение однородного плоского слоя. Проблемы спектра: излучение в узком диапазоне, неоднородная нагретость. Усреднённое описание объёмного излучения. Диффузия в оптически толстой среде.

### 14. Излучение/поглощение в дискретном спектре

Сечение поглощения в линиях. Максимально возможное излучение и минимальный росселандов пробег. Циклотронное излучение, его запырание. Ток Брагинского-Пиза в задаче о z-пинче.

### 15. Недиффузионные блуждания квантов

Специфика блуждания в линиях. Уравнения в дробных производных. Притягивающая автомодельность и «забывание». Особенности процесса и его связь с матстатистикой.

### 16. Особенности излучения в корональной плазме

Корональное равновесие по возбуждениям. Максимально возможное излучение для «богатых» электронных остовов. Доплеровское уширение линий. Другие механизмы уширения.

### 17. Приближение лучистой теплопроводности

Нелинейное уравнение диффузии. Автомодельные решения. Влияние гидродинамического движения. «Сквозное» описание лучистых потерь.

### 18. Роль излучения в термоядерном горении

Критерий Лоусона. Универсальность параметра. Понятие о детонации как физическом явлении, ядерная и термоядерная детонация. Использование лучистой энергии для термояда.

### 19. Специфика описания фотонного газа

Кинетическое описание квантов. Кинетика и термодинамика чёрного излучения. Причины равновесности, влияние плазмы. Классификация процессов излучения, поглощения и рассеяния.

### 20. Тормозное излучение/поглощение

Тормозное излучение, стандартный вывод. Отличия в физике при малых и больших частотах. Суммарная интенсивность излучения и пробеги. Макроскопический подход к задаче. Связь процессов рассеяния электронов с излучением.

### 21. Фоторекомбинационное излучение и фотоэффект

Фоторекомбинационное излучение VS тормозного. Сечение фотоэффекта. Значения и различия. Малые параметры фоторекомбинации и корональное равновесие. Роль диэлектронной рекомбинации.

### 22. Элементарные процессы в плазме с участием электронов и фотонов

Элементарные процессы возбуждения и излучения. Различные типы ионизационного равновесия. «Подавленность» обратных процессов в плазме. Диэлектронная рекомбинация. Аппроксимационные формулы для  $z$  и «эффективные» показатели адиабаты. Томсовновское рассеяние, эффекты когерентности.

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

учебная аудитория, персональные компьютеры и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Лекции по явлениям переноса в плазме: Учебное пособие/ Чукбар К.В., Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2008. — 256 с.
2. Электронная магнитная гидродинамика/ Кингсеп А.С., Чукбар К.В., Яньков В.В. В сб. Вопросы теории плазмы, вып.16/ под ред. Кадомцева Б.Б., М: Энергоатомиздат, 1987, с.209.

### **Дополнительная литература**

1. Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков/ Рудаков Л.И. и др. М: Энергоатомиздат, 1990. — 234 с.
2. Percolation, statistical topography and transport in random media/ Isichenko M.B. Review of Mod-ern Physics, 1992, v.64, p.961.
3. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений/ Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., М: БИНОМ. ЛЗ, 2008. — 656 с. ISBN 978-5-92210-9383.
4. Атомные процессы в плазме/ Лисица В.С., Коган В.И. В сб. Итоги науки и техники. Физика плазмы, т.3, М: ВИНТИ, 1982, с.5.
5. Радиационные процессы в плазме/ Лисица В.С., Коган В.И. В сб. Итоги науки и техники. Физика плазмы, т.4, М: ВИНТИ, 1983, с.194.

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

Информационные ресурсы: Журналы по физике плазмы (Физика плазмы, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, ЖТФ, Письма в ЖТФ, Physics of Plasmas, Physical Review E, Physical Review Letters и др.), доступные через Internet: <http://www.aip.org/> , <http://scitation.aip.org/>, <http://elibrary.ru/defaultx.asp>, <http://www.maikonline.com/maik/showCatalogs.do?type=alphabet&lang=ru>, электронные конспек-ты лекций, учебные пособия и сборники задач, разработанные для данного курса.

## **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>	Термоядерные и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	К.В. Чукбар, д-р физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

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

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Явления переноса в плазме» обучающийся должен:

### знать:

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

### уметь:

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

### владеть:

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

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачёта:

1) Сильноточный диод, пучки и альфвеновский ток. Понятие о равновесиях Беннета и Хаммера-Ростокера.

Особенности конвективного пекреноса примесей в двумерных стационарных течениях семестре:

2) Уравнения ЭМГ и пределы её применимости.

3) Стационарные течения в ЭМГ.

4) Конвективные волны магнитного поля. Скин-эффект в ЭМГ.

5) Понятие о магнетосопротивлении и ЭМГ-сопротивлении.

6) Учёт инерции электронов в ЭМГ и влияние «сторонних» токов на конвекцию поля.

7) Роль размерности, нестационарности и «затравочной» диффузии в турбулентном размешивании.

8) Турбулентность с широким инерционным интервалом. Относительная диффузия и закон Ричардсона.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1) Основное уравнение лучистого энергопереноса.

2) Объёмное излучение.

3) Лучистая теплопроводность.

4) Понятие о термодинамическом и корональном равновесиях.

5) Тормозное излучение.

6) Фоторекомбинационное излучение и сечение фотоэффекта.

7) Излучение в линиях и циклотронное излучение в термодинамически равновесной плазме.

8) Понятие о больцмановском и корональном излучателях.

9) Контуры спектральных линий в плазме.

10) Миграция излучения в корональной плазме.

11) Критерий Лоусона и детонация термоядерного горючего.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Основное уравнение лучистого энергопереноса.

2. Контуры спектральных линий в плазме.

Пример 2.

1. Понятие о термодинамическом и корональном равновесиях.

2. Излучение в линиях и циклотронное излучение в термодинамически равновесной плазме.

Критерии оценивания

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При проведении устного дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном дифференцированном зачете не должен превышать одного астрономического часа.