

**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>      | Излучение термоядерной плазмы   |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий<br>Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В.<br>Курчатова<br>кафедра физики и химии плазмы |
| <b>курс:</b>               | 4   |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: В.С. Лисица, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Введение в физику плазмы" предусматривает ознакомление студентов с основными понятиями о роли излучения в энергобалансе и диагностике термоядерной плазмы.

Задачи курса:

- обучение основам оценочных и расчетных методов для процессов, ответственных за излучение плазмы.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- основы классической механики, электродинамики, квантовой и атомной механики.

Уметь:

- оперировать с основными формулами классической механики и электродинамики, использовать персональный компьютер для составления простейших расчетных программ.

Владеть:

- способами численных оценок, необходимых для использования вероятностей различных физических процессов применительно к условиям термоядерных установок, в первую очередь – токамаков.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Радиационные процессы в непрерывном спектре – тормозное и рекомбинационное излучение
2. Процессы в дискретном спектре – ионизация атомов и ионов
3. Диэлектронная рекомбинация
4. Расчеты ионизационного равновесия и радиационных потерь плазмы на примесных ионах

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- ознакомление студентов с основными понятиями о роли излучения в энергобалансе и диагностике термоядерной плазмы.

### Задачи дисциплины

- обучение основам оценочных и расчетных методов для процессов, ответственных за излучение плазмы.

## 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 |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов  | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей                                     |

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основы классической механики, электродинамики, квантовой и атомной механики.

уметь:

- оперировать с основными формулами классической механики и электродинамики, использовать персональный компьютер для составления простейших расчетных программ.

владеть:

- владеть способами численных оценок, необходимых для использования вероятностей различных физических процессов применительно к условиям термоядерных установок, в первую очередь – токамаков.

### 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                     | Радиационные процессы в непрерывном спектре – тормозное и рекомбинационное излучение | 8   |          |                 | 4              |
| 2                     | Процессы в дискретном спектре – ионизация атомов и ионов                             | 6   |          |                 | 4              |
| 3                     | Диэлектронная рекомбинация   | 8   |          |                 | 3              |
| 4                     | Расчеты ионизационного равновесия и радиационных потерь плазмы на примесных ионах    | 8   |          |                 | 4              |
| Итого часов           |  | 30  |          |                 | 15             |
| Подготовка к экзамену |  | 0 час.  |          |                 |                |
| Общая трудоёмкость    |  | 45 час., 1 зач.ед.  |          |                 |                |

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

Семестр: 8 (Весенний)

1. Радиационные процессы в непрерывном спектре – тормозное и рекомбинационное излучение

Классические методы расчета интенсивностей тормозного и рекомбинационного излучения, формулы Крамерса, потери энергии на излучение в континууме, радиационная рекомбинация.

2. Процессы в дискретном спектре – ионизация атомов и ионов

Формула Томсона для ионизации, особенности ионизации многозарядных ионов, ионизация через возбуждение автоионизационных состояний.

3. Диэлектронная рекомбинация

Процессы, проходящие через образование атомных комплексов, диэлектронная рекомбинация электронов на ионах с электронным остовом, основные каналы распада автоионизационных состояний, сравнение с трехчастичной и радиационной рекомбинацией.

#### 4. Расчеты ионизационного равновесия и радиационных потерь плазмы на примесных ионах

Ионизационное равновесие примесных ионов в термоядерной плазме как баланс процессов ионизации-рекомбинации, роль транспорта примесных ионов, расчеты кинетики заселения и радиационных потерь в простейшей двухуровневой схеме атомных состояний.

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

учебная аудитория, оснащенная ученической доской, видеопроектором и экраном.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Л.Д. Ландау Теоретическая физика: в 10 т. Т.2: Теория поля. 7-е изд. исправ. - М.: Наука, 1988
2. Г.Голдстейн Классическая механика (перевод с англ. Ю.В. Колесниченко) - М.: Ижевск, Ижевский институт компьютерных исследований, 2012.

#### Дополнительная литература

1. В.А. Астапенко, В.С. Лисица Столкновительные процессы в низкотемпературной плазме - М.: МФТИ, 2007

### 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<br>Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В.<br>Курчатова<br>кафедра физики и химии плазмы |
| <b>курс:</b>   | <u>4</u>  |
| <b>квалификация:</b>   | бакалавр  |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет |   |
| <b>Разработчик:</b>  | В.С. Лисица, д-р физ.-мат. наук, профессор  |

## 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 |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов  | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей                                     |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Излучение термоядерной плазмы» обучающийся должен:

### знать:

- основы классической механики, электродинамики, квантовой и атомной механики.

### уметь:

- оперировать с основными формулами классической механики и электродинамики, использовать персональный компьютер для составления простейших расчетных программ.

### владеть:

- владеть способами численных оценок, необходимых для использования вероятностей различных физических процессов применительно к условиям термоядерных установок, в первую очередь – токамаков.

## 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 дифференцированному зачету:

1. Распределение радиационных потерь по длинам волн в приближении Крамерса
2. Оценка радиационных потерь энергии на тормозное излучение в термоядерной плазме
3. Оценка скорости радиационной рекомбинации
4. Вычисление скоростных коэффициентов ионизации для атомов и ионов
5. Оценка увеличения коэффициента ионизации на возбуждение автоионизационных уровней в сложных ионах
6. Оценка каналов автоионизационного распада и радиационной стабилизации для дважды возбужденных уровней многозарядных ионов
7. Сравнение скоростей диэлектронной и фото-рекомбинации сложных примесных ионов
8. Расчет кинетической модели заселения состояний в двухуровневой системе – корональный и больцмановский предел для заселенностей
9. Радиационные потери в двухуровневой системе в корональном и больцмановском пределах

## Примеры билетов:

### Пример 1.

1. Оценка скорости радиационной рекомбинации
2. Вычисление скоростных коэффициентов ионизации для атомов и ионов
3. Оценка увеличения коэффициента ионизации на возбуждение автоионизационных уровней в сложных ионах

### Пример 2.

1. Сравнение скоростей диэлектронной и фото-рекомбинации сложных примесных ионов
2. Расчет кинетической модели заселения состояний в двухуровневой системе – корональный и больцмановский предел для заселенностей
3. Радиационные потери в двухуровневой системе в корональном и больцмановском пределах

## 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**

Оценка за дифференцированный зачет выставляется по результатам письменной контрольной работы (теста) и устной беседы по вопросам контрольной работы.