

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

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физика плазмы
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Пучково-плазменные системы и технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра логистических систем и технологий
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Н.Л. Александров, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры логистических систем и технологий 04.06.2020

## Аннотация

В курсе рассматриваются основные свойства низкотемпературной плазмы и процессы в ней, включая равновесную плазму и плазму, далекую от термодинамического равновесия.

Курс содержит в себе элементы термодинамики плазмы, гидродинамики плазмы и кинетической теории плазмы. Демонстрируется связь между перечисленными разделами физики плазмы. Значительное внимание уделяется элементарным процессам в плазме, в том числе – процессам ионизации и рекомбинации плазмы. Рассматриваются процессы переноса заряда, частиц, импульса и энергии в низкотемпературной плазме. Демонстрируется связь между свойствами плазмы и ее многочисленными современными приложениями. Обращается внимание на новые быстро развивающиеся направления в низкотемпературной плазме – от пылевой плазмы до микроплазмы.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

ознакомление студентов с фундаментальными физическими процессами в плазме, на основе которых строятся современные плазменные технологии.

### Задачи дисциплины

- Ознакомление студентов с физическими процессами в плазме, определяющими ее отличие от других состояний вещества.
- Ознакомление студентов с основными свойствами плазмы в природе и современных технологиях.
- Ознакомление студентов с основными подходами при оптимизации плазменных технологий.
- Выработка у студентов навыков количественных оценок основных параметров, характеризующих процессы в низкотемпературной плазме

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

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

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- физические процессы в плазме, определяющие ее отличие от других состояний вещества;
- основные свойства плазмы в природе и современных технологиях;
- основные подходы при оптимизации плазменных технологий.

уметь:

- применять на практике знания об основных физических процессах в плазме;
- выполнять оценки основных параметров, характеризующих плазму в различных условиях, включая естественные условия и условия в плазменных технологиях;
- выполнять оценки основных параметров, характеризующих плазму в различных условиях;
- выполнять физическое и компьютерное моделирование фундаментальных явлений в плазме.

владеть:

- навыками освоения большого объема междисциплинарной и специальной информации;
- культурой постановки задач в области физики плазмы; навыками оценок параметров и свойств плазменных систем.

### 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	Термодинамика плазмы.	2	2		
2	Неидеальная плазма и ее описание.	1	1		
3	Гидродинамика плазмы.	2	2		
4	Столкновения частиц в плазме. Классическая теория рассеяния.	2	2		
5	Процессы переноса в плазме.	2	2		
6	Процессы рождения и гибели заряженных частиц в плазме.	2	2		
7	Распад плазмы.	2	2		
8	Кинетическая теория разрядной и пучковой плазмы.	2	2		30
Итого часов		15	15		30
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

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

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Термодинамика плазмы.

Принцип детального баланса. Термодинамический подход для определения степени ионизации и состава плазмы. Уравнение Саха. Уравнение состояния. Полная система термодинамических уравнений в случае однокомпонентного газа и многокомпонентной смеси.

##### 2. Неидеальная плазма и ее описание.

Параметры неидеальности плазмы. Средняя энергия электростатического взаимодействия в плазме. Уравнение состояния для неидеальной плазмы. Система уравнений для определения состава неидеальной плазмы.

##### 3. Гидродинамика плазмы.

Гидродинамическое описание газов и плазмы. Уравнения баланса и коэффициенты переноса. Связь между гидродинамическим и термодинамическим описаниями плазмы. Условия справедливости гидродинамического описания.

##### 4. Столкновения частиц в плазме. Классическая теория рассеяния.

Сечение рассеяния для электронов, ионов и нейтральных частиц в плазме. Упругие и неупругие столкновения, сверхупругие столкновения. Относительная роль парных и тройных столкновений. Следствия из законов сохранения для рассеяния частиц в плазме.

##### 5. Процессы переноса в плазме.

Особенности переноса заряда, частиц, импульса и энергии в плазме. Амбиполярная диффузия и термодиффузия. Синергетический эффект в электропроводности. Вклад неупругих процессов в теплопроводность плазмы.

##### 6. Процессы рождения и гибели заряженных частиц в плазме.

Ионизация электронным ударом и при участии возбужденных частиц. Ступенчатая ионизация. Диссоциативная, тройная и фоторекомбинация электронов с положительными ионами. Процессы образования и гибели отрицательных ионов. Ионная рекомбинация.

##### 7. Распад плазмы.

Распад плазмы в диффузионном режиме, в режиме электронионной рекомбинации и в режиме прилипания электронов к нейтральным частицам. Релаксация энергии электронов во время распада плазмы. Процессы с участием возбужденных частиц при распаде плазмы.

##### 8. Кинетическая теория разрядной и пучковой плазмы.

Неравновесная плазма и условия ее поддержания. Неравновесная функция распределения электронов и ионов по энергиям. Коэффициенты переноса и константы скорости элементарных процессов в неравновесной плазме.

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

учебная аудитория: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Fridman A., Kennedy L.A. Plasma Physics and Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2011.
2. Chen F.F., Chang J.P. Principles of Plasma Processing. New York: Plenum Publishers, 2002.
3. Piel A. Plasma Physics. New York: Springer, 2010.
4. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

### Дополнительная литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. - 592 с.
2. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 362с.

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

1. Российская государственная библиотека - [www.rsl.ru](http://www.rsl.ru), [www.leninka.ru](http://www.leninka.ru)
2. Университетская библиотека ONLINE <http://biblioclub.ru/>

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Microsoft Word, приложение для подготовки презентаций Microsoft Power Point, Matlab, Excel.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение дисциплины требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной основной и дополнительной литературы;
- знакомство с публикациями по тематике предполагаемых проектов.

Руководство и контроль самостоятельной работы студента осуществляется преподавателем при заслушивании презентаций, подготавливаемых студентами, а также в ходе дискуссий во время практических занятий.

Основными показателями владения материалом являются умения демонстрировать знания, полученные из материалов лекций и рекомендуемой литературы, правильность и полнота ответов на вопросы преподавателя, которые им задаются при проведении занятий и сопутствующих дискуссий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Пучково-плазменные системы и технологии  
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий  
кафедра логистических систем и технологий  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Н.Л. Александров, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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 «Физика плазмы» обучающийся должен:

### знать:

- физические процессы в плазме, определяющие ее отличие от других состояний вещества;
- основные свойства плазмы в природе и современных технологиях;
- основные подходы при оптимизации плазменных технологий.

### уметь:

- применять на практике знания об основных физических процессах в плазме;
- выполнять оценки основных параметров, характеризующих плазму в различных условиях, включая естественные условия и условия в плазменных технологиях;
- выполнять оценки основных параметров, характеризующих плазму в различных условиях;
- выполнять физическое и компьютерное моделирование фундаментальных явлений в плазме.

### владеть:

- навыками освоения большого объема междисциплинарной и специальной информации;
- культурой постановки задач в области физики плазмы; навыками оценок параметров и свойств плазменных систем.

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



### **3. Перечень типовых вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Текущий контроль проводится в период аудиторной и самостоятельной работы студентов в установленные сроки по расписанию.

- оценка ответов на вопросы в процессе краткого (до 5 мин) выборочного устного опроса перед началом каждого практического занятия по материалам предыдущего занятия;
- оценка умения решать типовые примеры и/или задачи, рассматриваемые на практических занятиях;
- оценка активности и ответов на вопросы в соответствии с программой практических занятий.

Обучающийся должен проявить всестороннее, систематическое и глубокое знание учебно-программного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоить основную литературу и быть знакомым с дополнительной литературой, рекомендованной программой дисциплины, усвоить взаимосвязь основных понятий дисциплины, решать предложенные преподавателем задачи.

Примеры вопросов к текущему контролю.

1. Термодинамический подход для описания плазмы. Его ограничения и условия применимости. Полная система термодинамических уравнений в случае однокомпонентного газа и многокомпонентной смеси.

2. Гидродинамический подход для описания плазмы. Уравнения баланса и коэффициенты переноса. Связь между гидродинамическим и термодинамическим описаниями плазмы. Условия справедливости гидродинамического описания.

3. Особенности переноса заряда, частиц, импульса и энергии в плазме. Амбиполярная диффузия и условия, когда применим амбиполярный режим. Синергетический эффект в электропроводности. Влияние неупругих процессов на теплопроводность плазмы.

4. Особенности сечений рассеяния частиц в плазме. Энергетическая зависимость сечений рассеяния. Относительная роль парных и тройных столкновений. Следствия из законов сохранения для рассеяния частиц в плазме.

5. Почему основным каналом ионизации в плазме обычно является ионизация электронным ударом. Роль возбужденных частиц в процессах ионизации. Механизмы рекомбинации электронов с положительными ионами в атомарной и молекулярной плазме. Прилипание электронов к нейтральным частицам и отрыв электронов от отрицательных ионов. Механизмы ион-ионной рекомбинации.

6. Особенности распада плазмы в диффузионном режиме, в режиме электрон-ионной рекомбинации и в режиме прилипания электронов к нейтральным частицам. Остывание электронов во время распада плазмы. Роль процессов с возбужденными частицами при распаде плазмы.

7. Кинетическое описание неравновесной плазмы. Неравновесная функция распределения электронов и ионов по энергиям в сильном электрическом поле. Коэффициенты переноса и константы скорости элементарных процессов в неравновесной плазме.

8. Неравновесная функция распределения электронов в пучковой плазме. Особенности ионизации и возбуждения нейтральных частиц в плазме, создаваемой

электронным пучком.

**Критерии оценивания по устному опросу**

Оценка	Критерии оценки
9-10 баллов	Выставляется, если обучающийся раскрыл содержание материала в объеме, предусмотренном программой, изложил материал грамотным языком в определенной логической последовательности, точно используя терминологию данного предмета как учебной дисциплины; отвечал самостоятельно без наводящих вопросов преподавателя; успешно ответил на тестовые задания, правильно и обоснованно решил ситуационные задачи. Возможны одна – две неточности при освещении второстепенных вопросов или в выкладках, которые обучающийся легко исправил по замечанию преподавателя.
7-8 баллов	Выставляется, если ответ обучающегося удовлетворяет в основном требованиям на отметку «отлично», но при этом имеет место один из недостатков: допущены одна - две неточности при освещении основного содержания ответа, исправленные по замечанию преподавателя; допущены ошибка или более двух неточностей при освещении второстепенных вопросов или в выкладках, легко исправленные по замечанию преподавателя.
4-6 баллов	Выставляется в следующих случаях: неполно или непоследовательно раскрыто содержание материала, имеются ошибки при ответах на тесты, неточности в решении ситуационных задач, но показано общее понимание вопроса и продемонстрированы умения, достаточные для дальнейшего усвоения материала, определенного учебной программой дисциплины.
1-3 балла	Выставляется в случаях, если не раскрыто основное содержание учебного материала; обнаружено незнание или неполное понимание обучающимся большей или наиболее важной части учебного материала; допущены грубые ошибки при ответах на вопросы собеседования, неправильно решены ситуационные задачи, допущены ошибки в ответах на тесты, допущены ошибки в определении понятий при использовании специальной терминологии в рисунках, схемах, выкладках, которые не исправлены после нескольких наводящих вопросов преподавателя.

**4. Перечень типовых вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся по итогам обучения**

Для проведения аттестации по итогам обучения используются вопросы и задания для самостоятельной работы и подготовки студентов к практическим занятиям:

### **Примеры экзаменационных билетов:**

#### **Экзаменационный билет № 1**

1. Термодинамический подход для описания плазмы. Его ограничения и условия применимости. Полная система термодинамических уравнений в случае однокомпонентного газа и многокомпонентной смеси.

2. Кинетическое описание неравновесной плазмы. Неравновесная функция распределения электронов и ионов по энергиям в сильном электрическом поле. Коэффициенты переноса и константы скорости элементарных процессов в неравновесной плазме.

#### **Экзаменационный билет № 2**

1. Особенности сечений рассеяния частиц в плазме. Энергетическая зависимость сечений рассеяния. Относительная роль парных и тройных столкновений. Следствия из законов сохранения для рассеяния частиц в плазме.

2. Неравновесная функция распределения электронов в пучковой плазме. Особенности ионизации и возбуждения нейтральных частиц в плазме, создаваемой электронным пучком.

#### **Экзаменационный билет № 3**

1. Особенности элементарных процессов в плазме, создаваемая электронными и ионными пучками, а также лазерным пучком. Отличие пучковой плазмы от плазмы газового разряда.

2. Уравнение состояния неидеальной плазмы. Система уравнений для определения состава неидеальной плазмы.

Экзамен по дисциплине «Физика плазмы» проводится по итогам текущей успеваемости и путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.

### **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 двух астрономических часов.

Преподавателю предоставляется право, помимо теоретических вопросов студентам дополнительные вопросы, уточняющие понимание содержания курса.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций и любой другой литературой.

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и любой другой литературой.

#### **Критерии оценивания экзамена:**

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплин;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на

вопросы по программе дисциплины;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.