

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА РАЗРЕЖЕННЫХ СИСТЕМ**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.Ч.10
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	2 семестр - 3;
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	108 часов
<b>Лекции</b>	2 семестр - 32 часа;
<b>Практические занятия</b>	2 семестр - 16 часов;
<b>Лабораторные работы</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Консультации</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>Самостоятельная работа</b>	2 семестр - 59,7 часа;
<b>в том числе на КП/КР</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Иная контактная работа</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>включая:</b>	
<b>Проверочная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Зачет с оценкой</b>	2 семестр - 0,3 часа;

**Москва 2023**

## ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Елецкий А.В.
	Идентификатор	Rd77ddbe5-YeletskyAV-fcb275b5

(подпись)

А.В. Елецкий

(расшифровка подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Лукашевский М.В.
	Идентификатор	Re4b7e3cb-LukashevskyMV-6844ab

(подпись)

М.В.  
Лукашевский

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей  
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Дедов А.В.
	Идентификатор	R72c90f41-DedovAV-d71cc7f4

(подпись)

А.В. Дедов

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Освоение современных принципов и подходов физической кинетики разреженных систем, позволяющих разобраться в физических основах процессов, протекающих в разреженных системах.

### Задачи дисциплины

- Ознакомление с физическими процессами, протекающими в неравновесных газообразных или слабоионизованных системах.;
- Усвоение основных подходов, применяемых при анализе работы систем, содержащих неравновесные газообразные или слабоионизованные субстанции.;
- Приобретение навыков принятия и обоснования конкретных технических решений, требующих знаний физических особенностей, присущих неравновесным газообразным и плазменным системам.;
- Формирование у студентов основ научного мышления и понимания границ применимости физических понятий и теорий физической кинетики разреженных систем..

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-1 Готов анализировать и моделировать технологические процессы, используемые в атомной энергетике, термоядерных исследованиях, плазменных установках	ИД-4 <sub>ПК-1</sub> Владеет основными подходами, применяемыми при анализе работы систем, содержащих неравновесные газообразные или слабоионизованные субстанции и объекты атомной физики	знать: - методы оценки вклада того или иного процесса в общую картину работы практически значимых систем, содержащих неравновесные газы или плазму; - основные типы неравновесных разреженных систем.  уметь: - выбирать адекватный подход к определению влияния того или иного неравновесного процесса на рабочие характеристики соответствующей системы или устройства; - разбираться во временной иерархии неравновесных процессов и оценивать характерные скорости их протекания в условиях работы практически значимых систем.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Базируется на уровне среднего общего образования.

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.



### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Основы физической кинетики	8	2	4	-	2	-	-	-	-	-	2	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Основы физической кинетики"</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Основы физической кинетики" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по изученному в разделе "Основы физической кинетики" материалу. Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Основы физической кинетики"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 3-14</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу</p>	
1.1	Разреженные системы	8		4	-	2	-	-	-	-	-	-	2		-
2	Неравновесная плазма	28		8	-	4	-	-	-	-	-	-	16		-
2.1	Явления переноса в	14	4	-	2	-	-	-	-	-	-	8	-		



														материалу. Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам. <b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Неустойчивость газового разряда" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 40-51 [2], 47-57
4	Перенос излучения	24	8	-	4	-	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Перенос излучения"
4.1	Перенос резонансного излучения в газах	12	4	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по изученному в разделе "Перенос излучения" материалу. Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам. <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Перенос излучения" <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Перенос излучения" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 51-56 [3], 503-515
4.2	Кинетика образования зародышей и роста кластеров в неравновесных газах и парах	12	4	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	

	<b>Всего за семестр</b>	<b>108.0</b>		<b>32</b>	<b>-</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>42</b>	<b>17.7</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>108.0</b>		<b>32</b>	<b>-</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>42</b>	<b>17.7</b>	<b>59.7</b>	

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация



## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Основы физической кинетики

#### 1.1. Разреженные системы

Функция распределения частиц в физике. Одночастичная функция распределения. Приближение идеального газа. Принцип детального равновесия. Симметрия кинетических коэффициентов. Уравнение Смолуховского. Кинетическое уравнение Больцмана. H-теорема Больцмана. Уравнение Фоккера-Планка..

### 2. Неравновесная плазма

#### 2.1. Явления переноса в равновесном газе

Диффузия частиц в газе. Теплопроводность газа. Вязкость газа. Термодиффузия. Решения уравнения Больцмана в  $\tau$ -приближении. Коэффициенты переноса в приближении твердых сфер. Приближение Чепмена-Энскога. Теплопроводность с учетом внутренних степеней свободы. Теплопроводность молекулярных газов с учетом химических превращений..

#### 2.2. Неравновесная слабоионизованная плазма

Кинетическое уравнение для электронов в электрическом поле. Функция распределения электронов по энергиям в электрическом поле с учетом упругих соударений электронов с атомами. Соотношение Эйнштейна. Средняя энергия, дрейфовая скорость, коэффициенты диффузии и термодиффузии электронов в газе. Диффузия и дрейф ионов в собственном и чужом газе под действием электрического поля. Амбиполярная диффузия. Баланс энергии электронов в молекулярных газах и газовых смесях. Ионизационная и рекомбинационная неравновесность слабоионизованной плазмы. Ионизационно-перегревная неустойчивость..

### 3. Неустойчивость газового разряда

#### 3.1. Неравновесные молекулярные газы

Теория теплового взрыва. Тепловое распространение пламени. Диффузионное распространение пламени. Обмен энергией между колебательной, поступательной и вращательными степенями свободы молекулярного газа. Формула Ландау-Теллера и ее уточнения. Неравновесный молекулярный газ с большим отрывом колебательной температуры от поступательной. Неустойчивость неравновесного состояния молекулярного газа. Распределение Тринора. Частичная инверсия. Методы получения неравновесных молекулярных газов. Газовый разряд. Газодинамическое сопло. Ударная волна. Тепловой взрыв в неравновесном молекулярном газе. Прилипательно-колебательная неустойчивость..

#### 3.2. Механизмы контракции газового разряда

Распределение заряженных частиц по сечению газоразрядной камеры. Условие контракции газового разряда. Контракция разряда в результате ионизационно-перегревной неустойчивости. Контракция разряда в молекулярных газах. Нетепловая контракция разряда..

### 4. Перенос излучения

#### 4.1. Перенос резонансного излучения в газах

Связь между механизмом пленения резонансного излучения и характером уширения спектральной линии. Эффективное время выхода резонансного фотона из среды в случае лоренцовского и доплеровского уширения. Профиль Фойхта. Фоторезонансная плазма..

4.2. Кинетика образования зародышей и роста кластеров в неравновесных газах и парах  
Уравнение Фоккера-Планка для роста кластеров. Критический размер зародыша. Рост  
водяных капель в атмосфере. Роль заряда в процессе роста капель..

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Основы физической кинетики разреженных систем. часть 1
2. Основы физической кинетики разреженных систем. часть 2
3. Явления переноса в равновесном газе.
4. Движение заряженных частиц в газе под действием электрического поля.
5. Перенос тепла и частиц при наличии тепловыделения. Тепловой взрыв. Неравновесные молекулярные газы.
6. Механизмы контракции газового разряда
7. Перенос резонансного излучения в газах.
8. Кинетика образования зародышей и роста кластеров в неравновесных газах и парах..

### **3.4. Темы лабораторных работ** не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

#### *Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)*

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Основы физической кинетики"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Неравновесная плазма"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Неустойчивость газового разряда"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Перенос излучения"

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ** Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
<b>Знать:</b>						
основные типы неравновесных разреженных систем	ИД-4ПК-1	+				Проверочная работа/Основы физической кинетики
методы оценки вклада того или иного процесса в общую картину работы практически значимых систем, содержащих неравновесные газы или плазму	ИД-4ПК-1		+			Проверочная работа/Неравновесная плазма
<b>Уметь:</b>						
разбираться во временной иерархии неравновесных процессов и оценивать характерные скорости их протекания в условиях работы практически значимых систем	ИД-4ПК-1				+	Проверочная работа/Перенос излучения
выбирать адекватный подход к определению влияния того или иного неравновесного процесса на рабочие характеристики соответствующей системы или устройства	ИД-4ПК-1			+		Проверочная работа/Неустойчивость газового разряда

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**2 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Неравновесная плазма (Проверочная работа)
2. Неустойчивость газового разряда (Проверочная работа)
3. Основы физической кинетики (Проверочная работа)
4. Перенос излучения (Проверочная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Зачет с оценкой (Семестр №2)*

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и зачетной составляющих.

В диплом выставляется оценка за 2 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Елецкий, А. В. Физическая кинетика разреженных систем : учебное пособие по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / А. В. Елецкий, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2016 . – 60 с. - ISBN 978-5-7046-1790-7 .  
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt\\_path\\_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=8733](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=8733);
2. Елецкий, А. В. Физические процессы в газовых лазерах / А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов . – М. : Энергоатомиздат, 1985 . – 150 с.;
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.- "Физическая кинетика", (2-е изд., испр.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2002 - (536 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2692](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2692).

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux;
3. Acrobat Reader.

### **5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:**

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>

4. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
5. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
6. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
7. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
8. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
9. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
10. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
11. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
14. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
15. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>
16. Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации - <https://minobrnauki.gov.ru>
17. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки - <https://obrnadzor>
18. Федеральный портал "Российское образование" - <http://www.edu.ru>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	А-302, Учебная аудитория "А"	парта со скамьей, стол преподавателя, стул, доска меловая
Помещения для самостоятельной работы	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы

		демонстрационного оборудования
Помещения для консультирования	А-208, Преподавательская	кресло рабочее, рабочее место сотрудника, стол, шкаф для документов, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки, компьютер персональный, принтер
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	А-025, Кладовка лабораторного оборудования	стеллаж, оборудование специализированное

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

## Физическая кинетика разреженных систем

(название дисциплины)

## 2 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Основы физической кинетики (Проверочная работа)  
 КМ-2 Неравновесная плазма (Проверочная работа)  
 КМ-3 Неустойчивость газового разряда (Проверочная работа)  
 КМ-4 Перенос излучения (Проверочная работа)

Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Основы физической кинетики					
1.1	Разреженные системы		+			
2	Неравновесная плазма					
2.1	Явления переноса в равновесном газе			+		
2.2	Неравновесная слабоионизованная плазма			+		
3	Неустойчивость газового разряда					
3.1	Неравновесные молекулярные газы				+	
3.2	Механизмы контракции газового разряда				+	
4	Перенос излучения					
4.1	Перенос резонансного излучения в газах					+
4.2	Кинетика образования зародышей и роста кластеров в неравновесных газах и парах					+
Вес КМ, %:			25	25	25	25