

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра физики плазмы**



**Рабочая программа дисциплины  
ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	144	32	32		58	18	2			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу,  
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	5
5. Перечень учебной литературы. ....	12
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	13
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	13
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	13
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	13
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	14

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Основы физики плазмы» представляет собой начальный курс физики плазмы, предназначенный для обучения студентов-физиков, специализирующихся в области физики плазмы, включая разделы основ кинетики плазмы, движения заряженных частиц в электромагнитных полях и элементарные процессы в плазме.

Цель курса – дать понимание базовых законов физики плазмы, привить практические навыки использования этих законов и подготовить основу для изучения последующих разделов физики плазмы. Основное внимание в курсе уделяется движению частиц в электромагнитном поле и кинетике плазмы, включающей теорию кулоновских столкновений, тормозного, рекомбинационного излучения и ряда других элементарных процессов. Курс должен служить основой для последующих спецкурсов кафедры физики плазмы.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-1</b> Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p>	<p><b>Знать</b> основные математические модели, уравнения и граничные условия, которые применяются в физике плазмы, физические явления, которые описываются в рамках кинетической и гидродинамической моделей плазмы, некоторые базовые методы, необходимые для работы с этими типами моделей.</p> <p><b>Уметь</b> решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения; объяснять причинно-следственные связи физических процессов, возникающих в плазме; подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи.</p> <p><b>Владеть</b> навыками самостоятельной работы со специализированной литературой; навыками применения современного математического инструментария для решения задач в области физики плазмы.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Основы физики плазмы» реализуется в осеннем семестре 3-го курса бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики плазмы. Курс должен предшествовать остальным теоретическим и экспериментальным курсам кафедры, а также выполнению квалификационной работы по данной специализации, т.к. дает студенту необходимые знания и представления о плазме в рамках подготовки его квалификационной работы.

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	144	32	32		58	18	2			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: опрос студентов на практических занятиях;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 4 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 58 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа;

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 68 часов.

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

Дисциплина «Основы физики плазмы» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 4 зачётные единицы, 144 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Общие сведения о плазме	1	7	2	2	3	
2	Электростатическая экранировка	2	7	2	2	3	
3	Ионизационное равновесие	3	8	2	2	4	
4	Движение заряженных частиц	4	8	2	2	4	
5.	Адиабатические инварианты	5	8	2	2	4	
6.	Кулоновские столкновения	6	8	2	2	4	
7.	Излучение плазмы	7	8	2	2	4	
8.	Элементарные процессы в плазме	8	8	2	2	4	
9.	Термоядерные реакции	9	8	2	2	4	
10.	Кинетическое уравнение	10-11	12	4	4	4	
11.	Интеграл столкновений	12	8	2	2	4	
12.	Двухжидкостная магнитная гидродинамика	13	8	2	2	4	
13.	Уравнения переноса	14	8	2	2	4	
14	Процессы переноса в магнитном поле	15	8	2	2	4	
15	Одножидкостная магнитная гидродинамика	16	8	2	2	4	
16	Консультации		2				2
17.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
18.	Экзамен		2				2
<b>Всего</b>			<b>144</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>58</b>	<b>22</b>

## Программа и основное содержание лекций (32 часов)

### Раздел 1. Общие сведения о плазме (2 часа)

Плазма как состояние вещества. Квазинейтральность. Определение плазмы. Дебаевская экранировка. Ленгмюровские колебания. Применения плазмы.

### Раздел 2. Электростатическая экранировка (2 часа)

Экранирование пробного заряда. Энергия кулоновского взаимодействия в плазме. Плазменный параметр. Идеальная и неидеальная, классическая и вырожденная плазма.

### Раздел 3. Ионизационное равновесие (2 часа)

Уравнение Саха. Степень ионизации плазмы. Ограниченность теории Саха.

### Раздел 4. Движение заряженных частиц (2 часа)

Дрейфовое приближение. Движение в однородном магнитном поле. Электрический дрейф. Ведущий центр ларморовской орбиты. Дрейф под действием малой силы. Гравитационный дрейф. Эффект конечного ларморовского радиуса в электрическом дрейфе. Магнитные дрейфы. Градиентный дрейф. Центробежный дрейф. Поляризационный дрейф. Скорость движения ведущего центра.

### Раздел 5. Адиабатические инварианты (2 часа)

Магнитный момент. Первый адиабатический инвариант. Система уравнений ведущего центра. Траектории частиц в пробкотроне. Иерархия адиабатических инвариантов.

### Раздел 6. Кулоновские столкновения (2 часа)

Сечение процесса. Длина и частота столкновений. Дифференциальное и транспортное сечение. Рассеяние на кулоновском центре. Приближение далёких пролётов. Кулоновский логарифм. Парные столкновения. Торможение и остывание пробной частицы. Поле Драйсера. Динамика установления теплового равновесия.

### Раздел 7. Излучение плазмы (2 часа)

Типы радиационных переходов. Виды спектров. Тормозное излучение. Рекомбинационное излучение. Длина пробега излучения. Циклотронное излучение.

### Раздел 8. Элементарные процессы в плазме (2 часа)

Ионизация электронным ударом. Тройная рекомбинация. Фоторекомбинация и фотоионизация. Ступенчатые процессы. Корональное равновесие. Резонансная перезарядка.

### Раздел 9. Термоядерные реакции (2 часа)

Физика ядерных реакций. Топливные циклы. Кулоновский барьер. Критерий Лоусона. Управляемый термоядерный синтез.

### Раздел 10. Кинетическое уравнение (4 часа)

Функция распределения как плотность в фазовом пространстве. Уравнение Власова и самосогласованное поле. Уравнение Фоккера-Планка.

### Раздел 10. Интеграл столкновений (2 часа)

Интеграл столкновений Ландау. Законы сохранения в столкновениях частиц. Упрощение интеграла столкновений. H-теорема.

### Раздел 11. Двухжидкостная магнитная гидродинамика (2 часа)

Динамика установления теплового равновесия. Моменты кинетического уравнения. Уравнения двухжидкостной гидродинамики.

### Раздел 12. Уравнения переноса (2 часа)

Кинетические коэффициенты. Метод Чепмена-Энскога. Теплопроводность и проводимость плазмы. Термосила. Тензор вязких напряжений. Анизотропия плазмы в магнитном поле. Амбиполярная и Бомовская диффузия. Закон Ома. Эффект Холла.

### Раздел 13. Одножидкостная магнитная гидродинамика (2 часа)

Уравнения одножидкостной магнитной гидродинамики. Резистивная и идеальная МГД.

## Программа практических занятий (32 часов)

### Практическое занятие 1: Общие сведения о плазме (2 часа)

- (1) Подсчитать дебаевский радиус и плазменную частоту для солнечного ядра, солнечной короны, солнечного ветра, межзвёздного газа, газового разряда, магнитного и инерциального УТС.
- (2) Оценить дебаевский радиус для плазмы, состоящей из электронов и ионов с зарядом  $Z \gg 1$ .
- (3) В момент времени  $t = 0$  электроны плазмы приобрели скорость  $v_x = v_0 \cos(kx_0)$ , где  $x_0$  — начальная координата электрона. Считая ионы неподвижными, а начальное распределение электронов однородным с заданной плотностью  $n_0$ , описать движение электронов.
- (4) Облако электронов, имеющее форму длинного однородного цилиндра, удерживается от разлёта магнитным полем, направленным вдоль оси цилиндра. Показать, что под влиянием собственного электрического поля облако вращается вокруг своей оси. Найти частоту вращения и предельную плотность, при которой магнитное поле способно воспрепятствовать разлёту электронов. Вычислить электрическое поле в системе отсчёта, вращающейся вместе с облаком.

### Практическое занятие 2: Электростатическая экранировка (2 часа)

- (1) Можно ли разлагать экспоненту в распределении Больцмана, как это сделано при выводе дебаевского потенциала, учитывая, что его решение обращается в бесконечность при  $r = 0$ ? Убедиться, что в идеальной плазме минимальное расстояние  $r_*$ , на котором разложение ещё допустимо, меньше, чем межчастичное расстояние  $n^{-\frac{1}{3}}$ .

- (2) Плотность ионов в плазме задана как функция координат и имеет вид ступеньки: она равна  $n_0$ , при  $x < 0$  и  $n_0 + n_1$  при  $x > 0$ , причём . Найти распределение потенциала и плотности электронов, если электронная температура равна  $T$ .
- (3) Найти условие идеальности лоренцевской плазмы, состоящей из электронов и многократно ионизованных ионов с большим зарядовым числом  $Z \gg 1$ .
- (4) Найти электрическое поле при смещении электронов на 1 мм относительно ионов, плотность плазмы  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ .
- (5) Вычислить энергию Ферми и среднюю кинетическую энергию электрона в вырожденном идеальном электронном газе с нулевой температурой. Вычислить дебаевскую длину в вырожденном электронном газе с нулевой температурой. Оценить плотность, при которой вырожденная электронная плазма становится релятивистской.

### Практическое занятие 3: Ионизационное равновесие (2 часа)

- (1) Оценить степень ионизации для межзвёздного газа, грозового канала, термоядерного реактора и в центре Солнца.
- (2) Почему при фиксированной температуре степень ионизации тем выше, чем меньше плотность?
- (3) Водород с плотностью  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  нагрет до температуры 0,3 эВ. Чтобы увеличить проводимость плазмы, в неё добавляют калий. Какова должна быть доля примесных атомов, чтобы число свободных электронов увеличилось в 2 раза? Энергия ионизации калия равна 4,339 эВ, а его основное состояние двукратно вырождено.
- (4) Получить уравнение ионизационной адиабаты, связывающее плотность и температуру ионизованного газа при сжатии газа без подвода тепла.

### Практическое занятие 4: Движение заряженных частиц (2 часа)

- (1) Найти силу, действующую на заряженную частицу в системе отсчёта ведущего центра.
- (2) При каких условиях скорость электрического дрейфа мала по сравнению с тепловой скоростью частиц плазмы? Для оценки принять, что плазма имеет форму цилиндра с радиусом  $a$  и заряжена до потенциала порядка температуры плазмы,  $\varphi \sim \frac{T}{e}$ .
- (3) Найти скорость дрейфа заряженной частицы в однородном постоянном магнитном поле и однородном, медленно меняющемся электрическом поле, выполнив приближённое интегрирование уравнений движения.
- (4) Найти магнитное поле системы коаксиальных катушек по заданному полю  $B_0(z)$  на оси системы. Найти форму силовой линии.
- (5) Вычислить скалярный потенциал магнитного поля с прямой осью.

### Практическое занятие 5: Магнитные дрейфы (2 часа)

- (1) Найти силу, действующую на заряженную частицу в системе отсчёта ведущего центра.
- (2) Действие малой силы на релятивистскую частицу (без электрического дрейфа).
- (3) Найти скорость градиентного и центробежного дрейфов релятивистской частицы.



- (4) Исследовать форму дрейфовых траекторий в токамаке. Дрейф частиц в токамаке при  $B_\varphi = 0$ , траектория ларморовского центра в случае, когда  $B_\varphi$  создаётся продольным током с плотностью  $j = \text{const}$ .
- (5) За какое время протон с энергией 5 кэВ совершит полный оборот вокруг Земли, если он стартует из экваториальной плоскости, его скорость вдоль магнитного поля равна нулю, а расстояние до центра Земли составляет 20 000 км. Считать, что магнитное поле создаётся диполем с величиной  $7,8 \times 10^{19} \text{ Гс} \times \text{м}^3$ , который расположен в центре Земли.

### Практическое занятие 6: Адиабатические инварианты (2 часа)

- (1) Вычислить магнитный момент заряженной релятивистской частицы в магнитном поле.
- (2) Доказать, что отношение  $\frac{p_\perp^2}{B}$  является адиабатическим инвариантом, выполнив усреднение уравнений движения частицы в системе отсчёта ведущего центра.
- (3) При какой начальной энергии и питч-угле частицы, инжектированные в центральное сечение пробкотрона, теряются (пробочное отношение  $K$  задано, электростатический потенциал — нулевой)?
- (4) Предыдущая задача, при ненулевом потенциале. Для простоты решения задаём магнитное поле  $\frac{B}{B_0} = 1 + (K - 1) \left(\frac{z}{z_m}\right)^2$  и потенциал  $\frac{\varphi}{\varphi_0} = 1 - \left(\frac{z}{z_m}\right)^2$ .
- (5) В пробочное магнитное поле захвачен пучок заряженных частиц с одинаковым питч-углом. Пучок отражается в точке, где  $B = B_*$ , а его плотность в минимуме поля  $B_{\min}$  равна  $n_0$ . Найти распределение плотности пучка вдоль силовой линии, определив её зависимость от величины магнитного поля  $B$  при  $B_0 < B < B_*$ .
- (6) Найти область абсолютного удержания в аксиально-симметричном пробкотроне.
- (7) Найти период баунс-колебаний для частиц в поле из задачи (4) без учёта электростатического потенциала.
- (8) (Механизм Ферми ускорения космических лучей.) Протон захвачен в ловушку с пробочным отношением 5. В начальный момент энергия протона равна 1 кэВ, а питч-угол в минимуме магнитного поля составляет 45 градусов. Магнитные пробки сближаются со скоростью 10 км/сек. До какой энергии разгонится протон, прежде чем покинет ловушку?

### Практическое занятие 7: Кулоновское рассеяние (2 часа)

- (1) Дифференциальное и транспортное сечения рассеяния твёрдых шариков.
- (2) Вычислить вклад в транспортное сечение близких столкновений с рассеянием на угол  $\theta > \pi/2$ .
- (3) Найти транспортное сечение рассеяния ультрарелятивистского электрона на неподвижном кулоновском центре.
- (4) Как кулоновские столкновения влияют на поглощение высокочастотных волн в плазме?
- (5) Полупространство  $x > 0$  занято однородной плазмой, которая удерживается магнитным полем. В плазму по нормали к её границе влетает быстрый нейтральный атом и сразу же ионизуется. Найти координату  $x$  иона после его полного торможения, если вначале ларморовский радиус иона был равен  $\rho_0$ . (можно иногда заменять на классическую задачу — дрейф при наличии градиента плотности плазмы).

### Практическое занятие 8: Кулоновские столкновения (2 часа)

- (1) Верно ли для пробной частицы равенство  $d\varepsilon = v^{\vec{}} \cdot d\mathbf{p}^{\vec{}}$ , связывающее приращение импульса и энергии частицы?
- (2) Вычислить силу трения для пробной частицы в плазме с максвелловским распределением по скоростям. Оценить угловой разброс.
- (3) Вычислить скорость изменения энергии пробной частицы в плазме с максвелловским распределением по скоростям.
- (4) На примере пучка быстрых электронов и пучка быстрых ионов в плазме сравнить частоты столкновений  $\nu_{ee}^{(p)}$ ,  $\nu_{ei}^{(p)}$ ,  $\nu_{ie}^{(p)}$  и  $\nu_{ii}^{(p)}$ .
- (5) На примере пучка быстрых электронов и пучка быстрых ионов в плазме сравнить частоты столкновений  $\nu_{ee}^{(\varepsilon)}$ ,  $\nu_{ei}^{(\varepsilon)}$ ,  $\nu_{ie}^{(\varepsilon)}$  и  $\nu_{ii}^{(\varepsilon)}$ .
- (6) Оценить угловой разброс пучка быстрых частиц, прошедших через слой плазмы небольшой толщины.
- (7) Оценить длину свободного пробега электронов с энергией 1 МэВ в плазме с плотностью  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Можно ли нагреть плазму релятивистским пучком в лабораторной установке за счёт кулоновских столкновений.
- (8) Оценить поле Драйзера.

### Практическое занятие 9: Излучение плазмы (2 часа)

- (1) Оценить удельную мощность, время остывания и длину пробега излучения для плазмы ГДЛ, термоядерного реактора (магнитного и инерциального), газового разряда, центра Солнца; для Солнца оценить время выхода излучения.
- (2) Оценить мощность тормозного и рекомбинационного излучения в случае  $\frac{mv^2}{2} \ll I_z$ , когда в процессе излучения доминируют близкие столкновения с заметным искривлением траектории электрона.
- (3) Определить зависимость сечения тормозного излучения от частоты.
- (4) Найти спектр тормозного излучения в плазме с максвелловским распределением электронов по скоростям.

### Практическое занятие 10: Элементарные процессы в плазме (2 часа)

- (1) Вычислить коэффициент прямой ударной ионизации при  $T_e \ll I$ , усреднив сечение ионизации по максвелловской функции распределения электронов.
- (2) Вычислить константу скорости прямой тройной рекомбинации непосредственно в основное состояние, минуя захват электрона на возбуждённые уровни.
- (3) Подсчитать степень ионизации в солнечной короне, сравнить с формулой Саха.
- (4) Оценить сечение резонансной перезарядки.

### Практическое занятие 11: Термоядерные реакции (2 часа)

- (1) Во сколько раз энергия, которую можно извлечь из литра воды, если выделить весь дейтерий и «сжечь» его в термоядерном реакторе, больше теплотворной способности литра бензина?
- (2) При какой плотности ионов каждого сорта удельная мощность реакции ядерного синтеза максимальна, если в реакции участвуют ядра с зарядами  $Z_a$  и  $Z_b$ , а давление плазмы не может превышать заданной величины?
- (3) При какой плотности ионов каждого сорта отношение мощности тормозного излучения к мощности реакции ядерного синтеза минимально, если в реакции участвуют ядра с зарядами  $Z_a$  и  $Z_b$ .
- (4) Вычислить энергию Гамова.
- (5) Оценить сечение реакции  $D(d, \gamma)^4\text{He}$ .
- (6) Записать константу  $\langle \sigma_{ab} v \rangle$  реакции ядерного синтеза в виде интеграла по энергии  $\varepsilon$  относительного движения сталкивающихся ядер. Считать, что их функции распределения являются максвелловскими с заданной температурой  $T$ .

### Практическое занятие 12: Кинетическое уравнение (2 часа)

- (1) Проверить равенство  $\frac{\partial}{\partial p} \cdot [v \times B] = 0$ .
- (2) Доказать, что уравнение Фоккера-Планка сохраняет полное число частиц.
- (3) Вычислить плотность и давление плазмы, в которой распределение ионов описывается функцией распределения  $f = N \delta\left(\mu - \frac{\varepsilon}{B_*}\right) \delta(\varepsilon - \varepsilon_0)$ , где  $N$  — нормировочная константа,  $B_*$  — магнитное поле в точке остановки частиц, а  $\varepsilon_0$  — энергия ионов. Для простоты принять, что  $\varphi = 0$  (плазма с холодными электронами).
- (4) Найти радиус экранирования точечного заряда в плазме с изотропной, но не обязательно максвелловской функцией распределения.

### Практическое занятие 13: Интеграл столкновений (2 часа)

- (1) Доказать, что интеграл столкновений Ландау удовлетворяет закону сохранения импульса.
- (2) Доказать, что интеграл столкновений Ландау удовлетворяет закону сохранения энергии.
- (3) Проверить эквивалентность интеграла столкновений Розенблюта и интеграла столкновений Ландау.
- (4) Вычислить потенциалы Розенблюта для максвелловского распределения полевых частиц.
- (5) Упростить кинетическое уравнение применительно к анализу торможения быстрых ионов, возникающих при инжекции в плазму пучков нейтральных атомов. Считать, что плотность быстрых ионов мала по сравнению с плотностью плазмы, а их скорость значительно больше тепловой скорости ионов, но меньше тепловой скорости электронов.

### Практическое занятие 14: Двухжидкостная магнитная гидродинамика (2 часа)

- (1) Вычислить силу трения, предполагая, что распределение электронов описывается «сдвинутой» функцией Максвелла, причём средняя направленная скорость электронов мала по сравнению с их тепловой скоростью.

- (2) Используя решение предыдущей задачи, вычислить проводимость плазмы.
- (3) Вычислить удельную мощность  $Q_{ei}$  нагрева электронов ионами в простой плазме.

### Практическое занятие 15: Уравнения переноса (2 часа)

- (1) Вычислить поток тепла, связанный с протеканием тока в лоренцевой плазме.
- (2) Найти решение уравнения Фурье в безграничной среде, где в начальный момент имелось заданное распределение температуры  $T = T_0(x)$ .
- (3) Найти диффузионный поток в слабоионизованном газе.

### Практическое занятие 16: Процессы переноса в магнитном поле (2 часа)

- (1) Оценить «косую» силу трения, перпендикулярную как магнитному полю, так скорости движения электронов относительно ионов. Почему ею часто пренебрегают?
- (2) Оценить электронный поток тепла  $q_{\perp e}$  в магнитном поле.

Показать, что при наличии градиента температуры, перпендикулярного магнитному полю, возникает «косой» поток тепла в направлении, перпендикулярном как магнитному полю, так и градиенту температуры, и оценить его величину.

### Самостоятельная работа студентов (76 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	58
Подготовка к экзамену	18

### 5. Перечень учебной литературы.

1. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. М. : Бинум, 2013. 384 с. (24 экз.)
2. Котельников И. А. Магнитная гидродинамика. Новосибирск: НГУ. Размещены на сайте дистанционного обучения НГУ по адресу <http://www.phys.nsu.ru/lms/course/view.php?id=3>
1. Франк Каменецкий Д. А. Лекции по физике плазмы. 2-е изд. М. : Интеллект, 2008. 280 с.(50 экз.)
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный : Интеллект, 2009. 736 с., ISBN 978-5-91559-019-8 (6 экз.)
3. Трубников Б. А. Теория плазмы. М. : Энергоатомиздат, 1996. 461 с., ISBN 5283040186 (6 экз.)
4. Лукьянов С. Ю., Ковальский Н. Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М. : МИФИ, 1997. 430, ISBN 5726202341 (12 экз.)
5. Шафранов В. Д. Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 8. С. 877–86.
6. Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. Сборник задач по электродинамике. М. : РХД, 2002. 640 с.(130 экз.)

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.**

1. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. М. : Бином, 2013. 384 с.
2. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. М. : Электронное издание. Бином, 2014.
3. Котельников И. А. Магнитная гидродинамика. Новосибирск: НГУ. Размещены на сайте дистанционного обучения НГУ по адресу <http://www.phys.nsu.ru/lms/course/view.php?id=3>

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

1. ALADDIN // Atomic and Molecular Molecular Data. Vienna, Austria : IAEA. URL: <http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/> (online; accessed: 16.01.2012).
2. EXFOR // Experimental Nuclear Reaction Data. Vienna, Austria : IAEA, 2011. URL: <http://www-nds.iaea.org/exfor> (online; accessed: 16.01.2012).

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Основы физики плазмы» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области основ физики плазмы в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### **Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

**Таблица 10.1**

<b>Индикатор</b>	<b>Результат обучения по дисциплине</b>	<b>Оценочные средства</b>
------------------	---	---------------------------

<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p>	<p><b>Знать</b> основные математические модели, уравнения и граничные условия, которые применяются в физике плазмы, физические явления, которые описываются в рамках кинетической и гидродинамической моделей плазмы, некоторые базовые методы, необходимые для работы с этими типами моделей.</p> <p><b>Уметь</b> решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения; объяснять причинно-следственные связи физических процессов, возникающих в плазме; подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, экзамен</p>
<p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области</p>	<p><b>Владеть</b> навыками самостоятельной работы со специализированной литературой; навыками применения современного математического инструментария для решения задач в области физики плазмы.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, экзамен</p>

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Основы физики плазмы».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.

Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
----------------	--------	---	---	--	---

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Примерные вопросы на экзамен

1. Дебаевский радиус, ленгмюровская частота, условие квазинейтральности.
2. Дебаевский потенциал, энергия кулоновского взаимодействия в плазме (корреляционная и обменная энергия), плазменный параметр (число Дебая), условие идеальности плазмы, условие вырождения плазмы.
3. Ларморовский радиус, циклотронная частота.
4. Скорость электрического, градиентного и центробежного дрейфов.
5. Орбитальный магнитный момент заряженной частицы в магнитном поле, второй и третий адиабатические инварианты.
6. Кулоновский радиус, транспортное сечение, кулоновский логарифм, дифференциальное сечение рассеяния в кулоновском поле.
7. Тормозное и рекомбинационное излучение плазмы (зависимость мощности от  $Z$  и  $T$ ).
8. Формула Томсона для сечения ударной ионизации.
9. Термоядерные реакции DT цикла, критерий Лоусона.
10. Уравнение Власова, уравнение Фоккера-Планка.
11. Интеграл столкновений в тау-приближении.
12. Уравнения двухжидкостной МГД.
13. Оценки кинетических коэффициентов.
14. Уравнения идеальной МГД.

1. Дебаевский потенциал, корреляционная энергия в плазме.
2. Уравнение Саха.
3. Скорость градиентного дрейфа.
4. Скорость центробежного дрейфа.
5. Транспортное сечение (в приближении далёких пролетов).
6. Мощность тормозного излучения.
7. Уравнение Фоккера-Планка.
8. Интеграл столкновений Ландау.
9. Проводимость лоренцевой плазмы.
10. Коэффициент амбиполярной диффузии (в магнитном поле или в слабоионизованной плазме).

#### Пример экзаменационного билета

1. Степень ионизации термодинамически равновесной плазмы. Формула Саха.
2. Бомовский коэффициент диффузии.
3. Найти транспортное сечение рассеяния ультрарелятивистского электрона на неподвижном кулоновском центре.



Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Основы физики плазмы»  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного