

**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**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Физика плазмы**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

|                                                                                   |                                                    |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» |                              |
|                                                                                   | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ                       |                              |
|                                                                                   | Владелец                                           | Будаев В.П.                  |
|                                                                                   | Идентификатор                                      | Rd3677197-BudayevVP-5d24f851 |

В.П. Будаев

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

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

М.В.  
Лукашевский

Заведующий  
выпускающей  
кафедрой

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

А.В. Дедов

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Готов анализировать и моделировать технологические процессы, используемые в атомной энергетике, термоядерных исследованиях, плазменных установках

ИД-2 Владеет способами решения физико-технических и инженерных проблем современных термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы типа токамак как прототипов энергетического термоядерного экспериментального реактора

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Письменная работа

1. Движение частиц в электрическом и магнитном полях (Контрольная работа)
2. Колебания и волны в плазме (Контрольная работа)
3. Столкновения. Гидродинамическое приближение (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Вторая часть домашнего задания. Волны в плазме. Кинетическое описание плазмы (Домашнее задание)
2. Первая часть домашнего задания. Движение частиц во внешних полях. Гидродинамика плазмы (Домашнее задание)

## БРС дисциплины

1 семестр

| Раздел дисциплины                                                                                          | Веса контрольных мероприятий, % |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|                                                                                                            | Индекс КМ:                      | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 |
|                                                                                                            | Срок КМ:                        | 4    | 8    | 10   | 12   |
| Плазма: основные понятия и характеристики. Движение частиц во внешних полях. Упругие столкновения в плазме |                                 |      |      |      |      |
| Плазма: основные понятия и характеристики                                                                  | +                               |      |      | +    |      |
| Движение частиц во внешних полях                                                                           | +                               |      |      | +    |      |
| Упругие столкновения в плазме                                                                              | +                               |      |      | +    |      |
| Гидродинамические модели. Коэффициенты переноса в замагниченной плазме                                     |                                 |      |      |      |      |
| Однокомпонентные модели. Магнитная гидродинамика                                                           |                                 | +    |      | +    |      |

|                                                         |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Двухкомпонентные модели. Коэффициенты переноса в плазме |    | +  |    | +  |    |
| Волны в плазме. Методы волновой диагностики плазмы      |    |    |    |    |    |
| Колебания и волны в плазме. Основные понятия            |    |    | +  |    | +  |
| Волны в холодной плазме                                 |    |    | +  |    | +  |
| Волны в теплой плазме                                   |    |    | +  |    | +  |
| Кинетическое описание плазмы                            |    |    |    |    |    |
| Кинетическая теория бесстолкновительной плазмы          |    |    |    |    | +  |
| Уравнение Больцмана                                     |    |    |    |    | +  |
| Вес КМ:                                                 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

| Индекс компетенции | Индикатор                                                                                                                                                                                                                         | Запланированные результаты обучения по дисциплине                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Контрольная точка                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1               | ИД-2ПК-1 Владеет способами решения физико-технических и инженерных проблем современных термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы типа токамак как прототипов энергетического термоядерного экспериментального реактора | Знать:<br>основные подходы к описанию плазмы и плазмодинамики<br>механизмы распространения и затухания волн и колебаний в плазменных средах<br>Уметь:<br>выполнять оценки ключевых плазменных параметров<br>оценивать параметры дрейфовых движений частиц в полевых конфигурациях установок для удержания плазмы, а также параметры релаксации частиц в столкновениях<br>выполнять оценку параметров колебательных процессов в плазме | Движение частиц в электрическом и магнитном полях (Контрольная работа)<br>Столкновения. Гидродинамическое приближение (Контрольная работа)<br>Колебания и волны в плазме (Контрольная работа)<br>Первая часть домашнего задания. Движение частиц во внешних полях. Гидродинамика плазмы (Домашнее задание)<br>Вторая часть домашнего задания. Волны в плазме. Кинетическое описание плазмы (Домашнее задание) |

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. Движение частиц в электрическом и магнитном полях

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Письменное выполнение задания

**Краткое содержание задания:**

Выбрать варианты ответов и решить задачи

**Контрольные вопросы/задания:**

|                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уметь: оценивать параметры дрейфовых движений частиц в полевых конфигурациях установок для удержания плазмы, а также параметры релаксации частиц в столкновениях | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Вычислить дебаевский радиус, плазменную частоту и плотность тепловой энергии плазмы в термоядерной установке, если ее плотность <math>10^{14} \text{ см}^{-3}</math>, а температура 2 эВ.</li><li>2. Вычислить ларморовский радиус и циклотронную частоту электрона с энергией 3 кэВ движущегося в однородном магнитном поле 0.1 Т под углом 45° к силовым линиям;</li><li>3. Вычислить скорость дрейфа ядра гелия в скрещенных электрическом (<math>E = 1000 \text{ В/м}</math>) и магнитном (<math>H = 1 \text{ Т}</math>) полях.</li><li>4. Вычислить среднюю скорость ионов дейтерия в максвелловской плазме с температурой 10 кэВ</li><li>5. Плазма медленно сжимается магнитным полем с <math>B_1 = 1 \text{ Тл}</math> до <math>B_2 = 5 \text{ Тл}</math>. Столкновений нет. Во сколько раз вырастет полная кинетическая энергия частицы, если в начальный момент времени распределение по скоростям определяется соотношением <math>v_x = v_y = v_z</math>. (помним, что нормально полю направлены две оси свободы).</li></ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 85

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## **КМ-2. Столкновения. Гидродинамическое приближение**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Письменное выполнение задания

**Краткое содержание задания:**

Выберите правильный ответ и решите задачи

**Контрольные вопросы/задания:**

|                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Знать: основные подходы к описанию плазмы и плазмодинамики | 1.Проводимость полностью ионизованной плазмы зависит от плотности электронов $n_e$ и температуры как?<br>а) не зависит от $n_e$ б)растет с температурой как $T^{3/2}$ в) растет с ростом $n_e$ г) падает с ростом температуры<br>2.Времена установления равновесного распределения по температуре в электронной подсистеме и выравнивания температур ионов и электронов соотносятся как ( $\tau_{ee}:\tau_{ei}$ )<br>а) 1:43 б)1:2000 в)1:1 г) 43:1 д) 2000:1<br>3.Классический коэффициент диффузии плазмы поперек силовых линий магнитного поля зависит от его напряженности как<br>а) $D \sim H^{-2}$ б) $D \sim H^{-1}$ в) $D \sim H$ г) не зависит |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 85*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 75*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто, выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## **КМ-3. Колебания и волны в плазме**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 20**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Письменное выполнение задания

**Краткое содержание задания:**

Выберите правильный ответ и решите задачи

**Контрольные вопросы/задания:**

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Знать: механизмы распространения и затухания волн и колебаний в плазменных средах | 1. Электромагнитная волна может распространяться в плазме, если её частота<br>а) выше плазменной б) ниже плазменной в) выше ионной циклотронной частоты<br>2. В холодной плазме в присутствии магнитного поля могут существовать следующие виды волн:<br>а) альфвеновская б) ионный звук в) электромагнитная волна<br>3. При распространении низкочастотных волн <i>вдоль</i> магнитного поля частотами отсечки являются:<br>а) нижнегибридная частота б) плазменная частота в) ионная и электронная циклотронные частоты |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 85*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

**КМ-4. Первая часть домашнего задания. Движение частиц во внешних полях.**

**Гидродинамика плазмы**

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Домашнее задание

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 20**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент сдает выполненное задание. Преподаватель при беседе выборочно просит объяснить задачи и выполнить более простые упражнения на оценку основных величин

**Краткое содержание задания:**

Решите все задачи задания

Вычислите плазменную частоту, дебаевский радиус, число частиц в сфере Дебая в следующих случаях:

- а) тлеющий разряд ( $n_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e = 1.5 \text{ эВ}$ );
- б) ионосфера Земли ( $n_e = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e = 0,1 \text{ эВ}$ );
- в)  $\theta$ -пинч ( $n_e = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e = 800 \text{ эВ}$ ).

Характерный размер возмущения электрического поля вокруг внесённого в плазму ленгмюровского зонда равен 15 мкм. Найти концентрацию электронов плазмы, если их температура  $T_e = 5 \text{ кэВ}$ .

В токамаке круглого сечения Т-10 с большим радиусом  $R = 1,5 \text{ м}$  и радиусом плазмы  $a = 30 \text{ см}$  удерживается водородная плазма с концентрацией электронов  $n = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T = 1 \text{ кэВ}$ . На сколько градусов можно нагреть ею стакан воды объемом 200 мл? Считать, что одна калория равна 4,186 Дж.

Вычислить равновесную степень ионизации паров ртути при  $T = 4 \text{ кК}$ ,  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Мультиплетность термов принять равной  $g = (2J+1)$ . Таблица уровней доступна на ([https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/levels\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/levels_form.html)) . Потенциал ионизации ртути 10,4 эВ.

Выразить концентрацию трижды ионизованного кислорода  $\text{O IV}$  в плазме, где кислород присутствует в виде малой примеси. (указание: уравнение Саха можно применить к последовательным реакциям ионизации).

В установке термоядерного синтеза плазма нагревается посредством инъекции нейтральных атомов дейтерия с энергией 200 кэВ, которые, войдя в магнитное поле, из-за перезарядки превращаются в ионы дейтерия с атомным номером  $A = 2$  и с той же энергией. Такие ионы могут удерживаться в ловушке, только если их ларморовский радиус много меньше  $R_a$ , где  $R_a = 0,6 \text{ м}$  — меньший радиус плазменного тора. Проверьте, выполняется ли это условие, вычислив максимальный ларморовский радиус иона в магнитном поле  $B = 5 \text{ Тл}$ .

Пусть  $n_e = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . При какой величине магнитного поля электронная циклотронная частота сравняется с плазменной?

Вычислить ларморовский радиус и циклотронную частоту для

А) дейтона с энергией 15 КэВ, движущегося в однородном магнитном поле 0.85 Т под углом 60° к силовым линиям;

Б) электрона с энергией 10 КэВ движущегося в однородном магнитном поле 0.6 Т под углом 45° к силовым линиям

Плазма, находящаяся в зеркальной ловушке с пробочным отношением  $Rm = 9$ , имеет изотропное распределение частиц по скоростям. Столкновения отсутствуют, так что

частицы, попавшие в конус потерь, сразу уходят, а не попавшие – остаются. Определить долю захваченных частиц.

Заряженный пучок электронов плотностью  $n_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и радиусом  $a = 1 \text{ см}$  движется вдоль магнитного поля 2Тл. Найти скорость  $E \times B$  дрейфа в собственном поле пучка

Рассчитать проводимость водородной плазмы при  $T = 1 \text{ keV}$ ,  $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Бесстолкновительная водородная плазма удерживается в торе, внешние обмотки которого создают магнитное поле. Плазма в начальный момент максвелловская, ее температура  $T = 1 \text{ кэВ}$ . Начиная с  $t = 0$ , магнитное поле  $B$  за 100 мкс увеличивается с 1 Тл до 3 Тл, в результате чего плазма сжимается.

а) Покажите, что магнитный момент как у ионов, так и у электронов остается инвариантным.

б) Вычислите температуры распределений по полю и нормально ему после сжатия.

### Контрольные вопросы/задания:

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уметь: выполнять оценки ключевых плазменных параметров | 1. Рассчитать проводимость полностью ионизованной водородной плазмы при $T = 1 \text{ кэВ}$<br>2. Оценить дебаевский радиус и плазменную частоту для $T = 1 \text{ кэВ}$ и $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$<br>3. Оценить ларморовский радиус и ларморовскую частоту для ионов дейтерия с $B = 5 \text{ Тл}$ |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения задания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 85*

*Описание характеристики выполнения задания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения задания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения задания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено*

### КМ-5. Вторая часть домашнего задания. Волны в плазме. Кинетическое описание плазмы

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Домашнее задание

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент сдает выполненное задание. Преподаватель при беседе выборочно просит объяснить задачи и выполнить более простые упражнения на оценку основных величин

**Краткое содержание задания:**

Оценить соотношение между холловским током и током проводимости в полностью ионизованной плазме водорода при  $n=10^{12} \text{ см}^{-3}$  при температуре электронов 10 эВ в поле 2 Тл. (указание: частоту столкновений вычислить из времени замедления электронов на ионах).

В цилиндрическом плазменном столбе в поле  $B$  концентрация распределена по закону  $n(r)=n_0 \exp(-r^2/r_0^2)$ , при этом электроны находятся в равновесии с полем:

$$n_e = n_0 \exp(e\phi/Te)$$

$$r_0 = 1 \text{ см}$$

а) Найти скорости диамагнитного и электрического дрейфа

б) Вычислить диамагнитный ток, считая  $t_0=10^{16}$ ,  $Te=Ti=0.25 \text{ кэВ}$ ,  $B=0.4 \text{ Тл}$

На поверхности солнца возник протуберанец диаметром 1000 км, скорость выброса плазмы в котором составляет 500 км/с. Температура выбрасываемой плазмы  $T \sim 2 \text{ эВ}$ . На какое расстояние будут вытягиваться вместе с плазмой силовые линии магнитного поля? Плазму считать полностью ионизованной.

Перед спускаемым аппаратом в верхних слоях атмосферы образуется мощная ударная волна, температура за которой достаточна для ионизации воздуха. Формирующаяся плазма препятствует радиосвязи. Связь с кораблем осуществляется на длине волны 300 МГц. Оцените минимальную плотность плазмы.

Микроволны, которые в свободном пространстве имеют длину волны  $\lambda_0 = 1 \text{ см}$ , проходят через слой плазмы плотностью  $n_0 = 2,8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  и толщиной 10 см, помещенный в постоянное магнитное поле  $B_0 = 1,07 \text{ Тл}$ . Вычислите число длин волн, укладывающихся внутри слоя, если:

а) волновод ориентирован так, что вектор электрического поля волны  $E$  параллелен магнитному полю;

б) волновод ориентирован так, что вектор  $E$  параллелен оси  $y$ .

СВЧ интерферометр используется для определения плотности плазмы в бесконечном плоском слое толщиной 10 см. Интерферометр работает на длине волны 8 мм. Рассчитайте плотность плазмы, если сдвиг составляет 1/10 интерференционной полосы. Вычислите альфвеновскую скорость в области магнитосферы, где  $B = 10^{-8} \text{ Тл}$ ,  $n = 10^8 \text{ м}^{-3}$ , а  $M = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Корабль движется в атмосфере Юпитера со скоростью 100 км/с параллельно магнитному полю напряженностью 10-5 Тл. Если движение является сверхзвуковым, то перед кораблем образуется ионно-звуковая ударная волна. Если скорость корабля также выше Альфвеновской, то перед ним существует магнитозвуковая ударная волна. Известно, что наблюдаются ударные волны только первого типа. Найти пределы, в которых меняются плотность и температура плазмы. Считать, что верхние слои атмосферы Юпитера

состоят из холодных, однократно ионизованных молекул и атомов со средней молекулярной массой 10.

В однородной плазме, помещенной в поле 0.1 Тл изучается фарадеево вращение СВЧ волн с длиной волны 8мм. Обнаружено, что при прохождении 1 м длины столба поляризация повернулась на 900. Какова плотность плазмы?

Рассчитайте частоты верхне - и нижне - гибридного резонанса для плазмы плотность  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  в поле напряженность 2 Тл.

В плазме с  $n=10^{15} \text{ м}^{-3}$  и  $T=10 \text{ эВ}$  возбуждается электронная плазменная волна с длиной волны 1см. Затем источник возбуждения отключается. Оцените время бесстолковительного затухания волны в  $e$  раз.

Плотность ионного тока насыщения, приходящего на плоский зонд  $10 \text{ мА/см}^2$ .  
Вычислить плотность плазмы, если температура электронов равна 5 эВ.

#### Контрольные вопросы/задания:

|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уметь: выполнять оценку параметров колебательных процессов в плазме | 1.Рассчитайте частоту отсечки СВЧ излучения в плазме с концентрацией электронов $10^{12} \text{ см}^{-3}$<br>2.Рассчитайте набег фазы обыкновенной волны в плазме длиной 2м с концентрацией $10^{12} \text{ см}^{-3}$ , при длине волны в вакууме 5мм.<br>3.Рассчитайте ионный ток насыщения на зонд при $10^{12} \text{ см}^{-3}$ , $T_e=1 \text{ эВ}$ |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 80

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 1 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Зачет

### Пример билета

1. Основные понятия физики плазмы. Квазинейтральность, временной и пространственный масштабы разделения зарядов
2. Сечение кулоновских соударений
3. Вычислить ларморовский радиус и циклотронную частоту дейтона с энергией 1 КэВ, движущегося в однородном магнитном поле 0.3 Т под углом 45° к силовым линиям

### Процедура проведения

Студент получает билет, на подготовку ответа отводится до 40 минут. Знания оцениваются при беседе с преподавателем. Кроме вопросов билета, могут быть заданы дополнительные вопросы.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-2<sub>ПК-1</sub> Владеет способами решения физико-технических и инженерных проблем современных термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы типа токамак как прототипов энергетического термоядерного экспериментального реактора

### Вопросы, задания

- 1.1. Поле точечного заряда в плазме.
2. Проводимость плазмы в кинетическом подходе.
3. Вычислить скорость дрейфа электрона в неоднородном магнитном поле напряженностью 3 Тл, напряженность которого меняется в поперечном направлении со скоростью  $dB/dy = 0.01 \text{ Тл/см}$ . Температуру электронов принять равной 1 кэВ.
- 2.1 Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.
- 2 Магнитный звук.
- 3 Вычислить дебаевский радиус и плазменную частоту в термоядерной установке, если плотность плазмы  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а её температура 10 кэВ.
- 3.
1. 1 Градиентный и центробежный дрейфы
2. 2 Кинетический подход в теории плазмы. Кинетическое уравнение без столкновений.
3. Вычислить ларморовский радиус и циклотронную частоту электрона с энергией 15 кэВ движущегося в однородном магнитном поле 0.1 Т под углом 30° к силовым линиям;
- 4.1 Одножидкостная модель плазмы, основные уравнения.
- 2 Интеграл столкновений. Условия нормировки.
- 3 Оценить плотность тепловой энергии плазмы в термоядерной установке, если её плотность  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а температура 1 кэВ

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Дать определение плазмы  
Ответы:

Плазма - квазинейтральная смесь нейтральных и заряженных частиц, проявляющая коллективные взаимодействия

Ионизованный газ

Энергонасыщенная среда

Плазма - квазинейтральная смесь нейтральных и заряженных частиц

Верный ответ: Плазма - квазинейтральная смесь нейтральных и заряженных частиц, проявляющая коллективные взаимодействия

2. Дать определение и критерий существования идеальной плазмы

Ответы:

1. Идеальная плазма - среда для которой применимо уравнение состояния идеального газа. Критерий идеальности - большое количество частиц в сфере Дебая
2. Идеальная плазма - среда для которой применимо уравнение состояния идеального газа. Критерий идеальности - малое количество частиц в сфере Дебая
3. Любая плазма идеальна
4. Идеальная плазма - среда для которой применимо уравнение состояния идеального газа. Критерий идеальности - малость ларморовского радиуса по сравнению с дебаевским

Верный ответ: Идеальная плазма - среда для которой применимо уравнение состояния идеального газа. Критерий идеальности - большое количество частиц в сфере Дебая

3. Каковы критерии замагниченности плазмы?

Ответы:

Ларморовский радиус больше кулоновского, частота столкновений выше плазменной частоты

Ларморовский радиус меньше характерных размеров задачи, частота столкновений меньше ларморовской частоты

Частота столкновений меньше ларморовской частоты, ларморовский радиус - любой

Частота ион-электронных столкновений выше ларморовской частоты

Верный ответ: Ларморовский радиус меньше характерных размеров задачи, частота столкновений меньше ларморовской частоты

4. Квазинейтральность в плазме соблюдается

Ответы:

На масштабах больше дебаевского радиуса и временах больше обратной плазменной частоты

На масштабах больше ларморовского радиуса и временах больше обратной циклотронной частоты

На масштабах больше длины свободного пробега и временах больше обратной частоты соударений

На масштабах больше радиуса электронной оболочки атомов и временах больше периода обращения электрона по орбите

Верный ответ: На масштабах больше дебаевского радиуса и временах больше обратной плазменной частоты

5. Какие виды дрейфа в магнитном поле не зависят от параметров (массы и заряда) частицы

Ответы:

Дрейф в однородных скрещенных магнитном и электрическом полях

Градиентный дрейф

Центробежный дрейф

Инерционный дрейф

Верный ответ: Дрейф в однородных скрещенных магнитном и электрическом полях

6. Кулоновский логарифм это

Ответы:

Логарифм отношения кулоновского радиуса к дебаевскому

Логарифм отношения дебаевского радиуса к кулоновскому

Логарифм отношения ларморовского радиуса к кулоновскому

Логарифм отношения кулоновского радиуса к комптоновскому

Верный ответ: Логарифм отношения дебаевского радиуса к кулоновскому

7. Проводимость полностью ионизованной плазмы следующим образом зависит от параметров плазмы

Ответы:

Растет пропорционально концентрации электронов, не зависит от температуры

Растет с температурой как  $T^{3/2}$ , не зависит от концентрации электронов

Падает с температурой как  $T^{-3/2}$ , растет пропорционально концентрации электронов

Растет пропорционально температуре и плотности электронов

Верный ответ: Растет с температурой как  $T^{3/2}$ , не зависит от концентрации электронов

8. Классический коэффициент диффузии в плазме следующим образом зависит от магнитного поля:

Ответы:

Коэффициент диффузии больше вдоль силовых линий магнитного поля, поперек силовых линий падает как  $D \sim B^{-2}$

Коэффициент диффузии меньше вдоль силовых линий магнитного поля, поперек силовых линий падает как  $D \sim B^{-1}$

Коэффициент диффузии меньше вдоль силовых линий магнитного поля, поперек силовых линий растет как  $D \sim B^2$

Коэффициент диффузии больше вдоль силовых линий магнитного поля, поперек силовых линий растет как  $D \sim B^2$

Верный ответ: Коэффициент диффузии больше вдоль силовых линий магнитного поля, поперек силовых линий падает как  $D \sim B^{-2}$

9. Холловский ток в плазме возникает из-за

Ответы:

$E \times B$  дрейфа электронов

Столкновительного дрейфа электронов

Кулоновского взаимодействия частиц плазмы

Ларморовского вращения ионов

Верный ответ:  $E \times B$  дрейфа электронов

10. При рассмотрении движений плазмы в магнитном поле можно пренебречь её упругостью по сравнению с электромагнитными силами, если

Ответы:

Магнитное давление намного выше газового

Магнитное давление намного ниже газового

Плазма является идеальной

Сжимаемость плазмы изотропна

Верный ответ: Магнитное давление намного выше газового

11. Магнитное поле искажается движением плазмы, если

Ответы:

Магнитное число Рейнольдса велико

Магнитное число Рейнольдса мало

Длина магнитного скин-слоя много меньше размеров системы

Длина магнитного скин-слоя много больше размеров системы

Верный ответ: Магнитное число Рейнольдса велико

12. Альфвеновскую и магнитозвуковую волны в плазме можно коротко описать как:

Ответы:

Колебания электронов относительно неподвижных ионов  
Изгибные и продольные колебания плазмы с замороженным магнитным полем  
Звуковую волну с разделением зарядов электронов и ионов  
Электромагнитную волну в высокочастотном пределе  
Верный ответ: Изгибные и продольные колебания плазмы с замороженным магнитным полем

13. Ионно-звуковая волна может распространяться в плазме с холодными ионами благодаря

Ответы:

Амбиполярному электрическому полю, возникающему в волне  
Экранированию низкочастотных колебаний в плазме  
Вмороженности магнитного поля в среду  
Не может распространяться

Верный ответ: Амбиполярному электрическому полю, возникающему в волне

14. Уравнение Власова описывает

Ответы:

Эволюцию функции распределения в самосогласованном поле в отсутствие столкновений  
Эволюцию функции распределения под действием столкновений  
Проводимость полностью ионизованной плазмы

Верный ответ: Эволюцию функции распределения в самосогласованном поле в отсутствие столкновений

15. Приведите пример коллективного процесса в плазме

Ответы:

Альфвеновская волна  
Ларморовское вращение  
Столкновительный дрейф  
Электронный звук

Верный ответ: Альфвеновская волна Электронный звук

16. Отражение и поглощение падающей на границу плазмы волны происходит при:

Ответы:

Отражение- при фазовой скорости стремящейся к бесконечности, поглощение- к нулю  
Отражение- при фазовой скорости стремящейся к скорости света в вакууме, поглощение- к нулю  
Отражение- при фазовой скорости стремящейся к нулю, поглощение- к скорости света  
Отражение- при фазовой скорости стремящейся к нулю, отражение- к скорости света в вакууме

Верный ответ: Отражение- при фазовой скорости стремящейся к бесконечности, поглощение- к нулю

17. Плазменная частота это -

Ответы:

Частота колебаний свободных электронов относительно неподвижных ионов  
Частота вращения электронов по ларморовским окружностям  
Частота низкочастотных волн в замагниченной плазме  
Частота колебаний плазмы как целого

Верный ответ: Частота колебаний свободных электронов относительно неподвижных ионов

## **II. Описание шкалы оценивания**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 80

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

*Оценка:* 4

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 70

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 50

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно.

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

### ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***