

**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**

академик РАН



УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ

А. Е. Бондарь

2020 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА**

направление подготовки: **03.03.02 Физика, Курс 3, семестр 6**  
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
6	144	32	32		58	18	2			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов - в интерактивных формах 32 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Разработчик:  
д.ф.-м.н., проф.

И. А. Котельников

И.о.зав. КФПл ФФ НГУ  
к.ф.-м.н., доцент

А. Д. Беклемишев

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

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2020

## Содержание

Аннотация.....**Ошибка! Закладка не определена.**

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	4
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. ....	5
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	6
5. Перечень учебной литературы. ....	10
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	11
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	11
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	11
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	11
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	12

## Аннотация

к рабочей программе дисциплины курса «Магнитная гидродинамика»

Направление: **03.03.02 Физика**

**Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика**

Программа курса «Магнитная гидродинамика» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню бакалавриата по направлению подготовки **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой физики плазмы в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами третьего курса физического факультета.

Цель курса – знакомство с одним из основных теоретических подходов описания плазмы – одножидкостной магнитной гидродинамики, а также дать понимание базовых законов физики плазмы, привить практические навыки использования этих законов

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

**ПК-1 – способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин.**

**ПК-2 способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты; основной математический аппарат, который используется для решения дифференциальных уравнений в рамках одножидкостной гидродинамики.
- **Уметь:** решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения; объяснять причинно-следственные связи физических процессов, возникающих в рамках одножидкостной магнитной гидродинамики; подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи.
- **Владеть:** навыками самостоятельной работы со специализированной литературой; навыками применения современного математического инструментария для решения задач в области физики плазмы.

Курс рассчитан на один семестр (6-й). Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, задачи для самостоятельного решения, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещаемости

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачетные единицы.

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

Дисциплина «Магнитная гидродинамика» является вторым теоритическим специальным курсом, которые изучают студенты кафедры физики плазмы, после зачисления на кафедру. Уровень изложения рассчитан на студентов, освоивших курсы электродинамики, механики, молекулярной физики, физика сплошных сред, а также дисциплина «Основы физики плазмы» в 5-м семестре. Курс должен служить основой для последующих спецкурсов кафедры Физики плазмы.

Целью освоения курса является ознакомление студентов с 1) одним из основных теоретических подходов описания плазмы – одножидкостной магнитной гидродинамики; 2) дать понимание базовых законов физики плазмы, привить практические навыки использования этих законов;

Профессиональная компетенция ПК-1 (способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин) в части формирования способности использовать специализированные знания по магнитной гидродинамике для освоения гидродинамического равновесия плазмы, видов гидродинамических неустойчивостей плазмы, и МГД волнах в плазме.

Профессиональная компетенция ПК-2 (способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе, сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта) в части использования полученных знаний в области магнитной гидродинамики в профессиональной деятельности.

Все практические занятия проводятся в интерактивной форме. Материал курса увязывается с общефизическими и математическими дисциплинами, изучаемыми студентами-физиками (электродинамика, высшая алгебра и т.д.) и спецкурсами, изучающимися по данной специальности на 4 курсе (Экспериментальные методы исследования плазмы, Коллективные явления в плазме).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**
  - учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты (ПК 1.1);
  - основной математический аппарат, который используется для решения дифференциальных уравнений в рамках одножидкостной гидродинамики. (ПК 2.1).
- **Уметь:**
  - решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения (ПК-1.2);
  - объяснять причинно-следственные связи физических процессов, возникающих в рамках одножидкостной магнитной гидродинамики; подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи. (ПК 2.2);
- **Владеть:**
  - навыками самостоятельной работы со специализированной литературой (ПК 1.3);
  - навыками применения современного математического инструментария для решения задач в области физики плазмы. (ПК 2.3).

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.**

Дисциплина «Магнитная гидродинамика» реализуется в весеннем 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. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, механика, молекулярная физика, физика сплошных сред, а также дисциплина «Основы физики плазмы». Он должен предшествовать выполнению квалификационной работы бакалавра по данной специализации, т.к. дает студенту необходимые знания, навыки.

### 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
6	144	32	32		58	18	2			2
Всего 144 часа / 4 зачётных единицы, из них: - контактная работа 68 часов - в интерактивных формах 32 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

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 и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контроль посещаемости;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 4 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часов;
- практические занятия – 32 часов;
- 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.

Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 32 часов (практические занятия).

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

Дисциплина «Магнитная гидродинамика» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 6 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачётные единицы, 144 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Консультации перед экзаменом (часов)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Одножидкостная магнитная гидродинамика	1-3	29	8	8	13			
2.	Равновесие плазмы	4-6	29	8	8	13			
3.	Уравнение Грэда-Шафранова	7	8	2	2	4			
4.	МГД волны	8	8	2	2	4			
5.	Неустойчивости плазмы	9	8	2	2	4			
6.	Неустойчивость Рэля-Тейлора	10	8	2	2	4			
7.	Неустойчивости пинча	11	8	2	2	4			
8.	Желобковая неустойчивость плазмы	12	8	2	2	4			
9.	Баллонная неустойчивость	13	8	2	2	4			
10.	Перезамыкание магнитных силовых линий	14	8	2	2	4			
11.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18		
12.	Консультации		2					2	
13.	Экзамен		2						2
<b>Всего</b>			<b>144</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>58</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

## **Программа и основное содержание лекций (32 часа)**

### **Раздел 1. Одножидкостная магнитная гидродинамика (6 часов)**

Плазма как сплошная среда. Резистивная магнитная гидродинамика. Идеальная магнитная гидродинамика. Вмороженность магнитного поля. Консервативные формы МГД уравнений. Холловская МГД. Гидродинамика бесстолкновительной плазмы. Тензор напряжений магнитного поля. Гидродинамика анизотропной плазмы. Адиабаты Чу-Голдбергера-Лоу. Гидродинамика бесстолкновительной плазмы.

### **Раздел 2. Равновесие плазмы (6 часов)**

Теорема вириала. Равновесие изотропной плазмы. Равновесие анизотропной плазмы. Плазма как диамагнетик. Равновесие в пинчах. -пинч. Z-пинч. Соотношение Беннетта. Бессиловые конфигурации. Пинч с обращённым полем. Равновесие в токамаке. Шинный эффект. Равновесие в гофрированном торе. Удельный объём. Магнитные поверхности. Поверхностные величины.

### **Раздел 3. Уравнение Грэда-Шафранова (2 часа)**

Уравнение Грэда-Шафранова. Магнитные острова

### **Раздел 4. МГД волны (2 часа)**

Уравнение малых колебаний. Альфвеновские волны. Быстрый и медленный магнитный звук. Полярные диаграммы

### **Раздел 5. Неустойчивости плазмы (2 часа)**

Гидромагнитная устойчивость плазмы. Метод малых колебаний. Энергетический принцип. Потенциальная энергия возмущений. Вариационный принцип

### **Раздел 6. Неустойчивость Рэля-Тейлора (2 часа)**

МГД устойчивость неоднородной плазмы. Неустойчивость Рэля-Тейлора. Неустойчивость Крускала-Шварцшильда. Неустойчивость Рэля-Тейлора при учёте сжимаемости плазмы.

### **Раздел 7. Неустойчивости пинча (2 часа)**

Перетяжки и змейки. Винтовая неустойчивость. Критерий Крускала-Шафранова. Неустойчивость скинированного пинча.

### **Раздел 8. Желобковая неустойчивость плазмы (2 часа)**

Желобковая неустойчивость. Критерий Розенблюта-Лонгмайра. Инкремент желобковой неустойчивости. Методы стабилизации.

### **Раздел 9. Баллонная неустойчивость (2 часа)**

Баллонная неустойчивость.

## Раздел 10. Перезамыкание магнитных силовых линий (2 часа)

Перезамыкание магнитных силовых линий. Резистивная тиринг-неустойчивость.

### Программа практических занятий (32 часа)

Задание 1: Одножидкостная магнитная гидродинамика

- (1) Доказать, что в малой окрестности любой точки любое магнитное поле можно представить в виде  $\mathbf{B} = \nabla\alpha \times \nabla\beta$ , где функции  $\alpha(\mathbf{r}, t)$  и  $\beta(\mathbf{r}, t)$  есть координаты силовых линий, то есть пересечение поверхностей  $\alpha = const$  и  $\beta = const$  определяет линию, которая везде касательна направлению магнитного поля.
- (2) Используя представление магнитного поля  $\mathbf{B} = \nabla\alpha \times \nabla\beta$ , доказать, что уравнение в замороженности выполняется, если  $d\alpha/dt = d\beta/dt = 0$ , где  $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$ . Означает ли это, что силовые линии движутся вместе с плазмой?

Из уравнения  $\text{rot } \mathbf{B} = \left(\frac{4\pi}{c}\right)\mathbf{j}$  следует, что  $\text{div } \mathbf{j} = 0$ . При этом из уравнения непрерывности вытекает, что  $\frac{\partial \rho_\varepsilon}{\partial t} = 0$ . Однако уравнение Максвелла  $\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho_\varepsilon$  вместе с законом Ома показывает, что  $\rho_\varepsilon$  вообще говоря, не константа и что  $\rho_\varepsilon \neq 0$ . Как разрешить это противоречие?

- (3) Система уравнений идеальной МГД не содержит параметров, характеризующих столкновения между частицами. Означает ли это, что её можно использовать для описания бесстолкновительной плазмы?
- (4) Вывести уравнения одножидкостной резистивной магнитной гидродинамики из уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики.

Задание 2: Одножидкостная магнитная гидродинамика II

- (1) Записать уравнение в замороженности и уравнение движения в консервативной форме.
- (2) Вывести уравнение переноса энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho V^2}{2} + \frac{p}{\gamma-1} + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \text{div} \left( \frac{\rho V^2}{2} \mathbf{V} + \frac{\gamma p \mathbf{V}}{\gamma-1} + \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] \right) = 0$$

и объяснить смысл каждого его члена. Можно ли считать, что оно эквивалентно уравне-

$$\frac{p}{\rho^\gamma} \frac{d \ln(p)}{dt} = \frac{j^2}{\sigma} ?$$

нию

Задание 3: Одножидкостная магнитная гидродинамика III

- (1) Вычислить тензор давления в плазме с бимаксвелловским распределением частиц по скоростям. Почему давление в пробках не обращается в ноль?
- (2) Вычислить дрейфовый ток, используя выражения для скорости дрейфа частиц.

Задание 4: Равновесие плазмы



- (1) Допустим, функция распределения удовлетворяет бесстолкновительному дрейфовому кинетическому уравнению. Вычислим для этой функции тензор давления. Будет ли он удовлетворять уравнениям равновесия? Верно ли обратное утверждение: если тензор давления удовлетворяет уравнениям равновесия, то функция распределения удовлетворяет кинетическому уравнению.
- (2) Доказать, что в рамках идеальной МГД сохраняется интеграл спиральности.
- (3) На примере тета-пинча показать, что дрейфовый ток противоположен по направлению диамагнитному току.

#### Задание 5: Двумерные равновесия плазмы

- (1) На примере тета-пинча вычислить отношение плотности дрейфового тока к плотности диамагнитного тока.
- (2) Спиральностью плазмы называют интеграл 
$$K = \int (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) d^4x,$$
 где  $\mathbf{A}$  — векторный потенциал и  $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ . Вычислить производную  $\frac{dK}{dt}$  и показать, что в пределе идеальной магнитной гидродинамики спиральность сохраняется при подходящем выборе граничных условий.
- (3) Найти магнитное поле, которое имеет минимальную энергию при заданной спиральности.

#### Задание 6: Трёхмерные равновесия плазмы

- (1) Пусть отрезок-пинча свернут в тор. Покажите, что равновесие изотропной плазмы в такой конфигурации невозможно.
- (2) Доказать, что магнитное поле в симметричном токамаке можно представить в виде  $\mathbf{B} = \nabla\phi \times \nabla\Psi / (2\pi) + rB_t \nabla\phi$ , где  $\Psi = \Psi(r, z)$  есть полоидальный магнитный поток,  $B_t = B_t(r, z)$  — тороидальная компонента магнитного поля,  $\phi$  — азимутальный угол.
- (3) Доказать, что в симметричном токамаке коэффициент запаса устойчивости  $q(\Psi) = d\Phi/d\Psi$  выражается рациональным числом на магнитной поверхности, на которой силовые линии замкнуты.

#### Задание 7: Уравнение Грэда-Шафранова

- (1) Проверить, уравнение Грэда-Шафранова, описывающее равновесие плазмы в токамаке, в пределе малого аспектного отношения переходит в уравнение равновесия цилиндрической плазмы.
- (2) Вывести граничные условия для уравнения Грэда-Шафранова на границе плазмы и вакуума.

#### Задание 8: МГД волны

- (1) Найти энергию альфвеновской волны.
- (2) Шланговая неустойчивость в анизотропной плазме.
- (3) Диамагнитная (зеркальная) неустойчивость в анизотропной плазме.

#### Задание 9: Неустойчивости плазмы

- (1) Какие из следующих операторов являются самосопряженными:  $F[\xi] = \xi$ ,  $F[\xi] = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ ,  $F[\xi] = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$ ?
- (2) Доказать свойство ортогональности собственных функций краевой задачи  $-\rho \omega_k^2 \xi_k = F[\xi_k]$ , где  $\rho$  – вещественная функция координат,  $\omega_k$  – собственные частоты,  $F[\xi_k]$  – самосопряженный оператор.
- (3) Сформулировать вариационный принцип на примере краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка (задача Штурма-Лиувилля).

**Задание 10: Неустойчивость Рэля-Тейлора**

- (1) Найти спектр неустойчивости Рэля-Тейлора для плазмы с резкой границей в магнитном поле с широм.
- (2) Найти спектр неустойчивости Рэля-Тейлора в стратифицированной среде, где плотность изменяется по экспоненциальному закону. Магнитное поле отсутствует.
- (3) Вывести уравнение малых колебаний стратифицированной плазмы в магнитном поле без шира, которое бы учитывало сжимаемость плазмы. Указать условия, при которых сжимаемость плазмы незначительна.

**Задание 11: Неустойчивости пинча**

- (1) Оценить инкремент винтовой неустойчивости тонкого провода с током в продольном магнитном поле.
- (2) Исследовать устойчивость скинированного пинча, вычислив частоты собственных колебаний вблизи границы устойчивости.

**Задание 12: Желобковая неустойчивость плазмы**

- (1) Доказать, что плазма в аксиально-симметричном пробкотроне неустойчива относительно желобковых возмущений.
- (2) Найти профиль магнитного поля в аксиально-симметричном пробкотроне, который обеспечивает минимизацию инкремента желобковой неустойчивости.
- (3) Получить критерий стабилизации желобковой неустойчивости плещущимися ионами.

**Задание 13: Баллонная неустойчивость**

**Задание 14: Перезамыкание магнитных силовых линий**

**Самостоятельная работа студентов (76 часов)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Выполнение домашних заданий	58
Подготовка к экзамену	18

**5. Перечень учебной литературы.**

## 5.1. Основная литература

1. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. М.: Бином, 2013. 384 с.
2. Котельников И. А. Магнитная гидродинамика. Новосибирск: НГУ. Размещены на сайте дистанционного обучения НГУ по адресу <https://el.nsu.ru>

## 5.2. Дополнительная литература

Не требуется

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

1. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. М. Электронное издание. Бином, 2017.

### 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

Не используются.

### 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 «Магнитная гидродинамика» 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 заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области магнитной гидродинамики 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 компетенций ПК-1 и ПК-2.

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.

### **Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Магнитная гидродинамика».**

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 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. 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 ПК 2.2	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 задачи с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3 ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

## 10.2 Примерные вопросы на экзамен

На проверку сформированности компетенции ПК-1:

1. Одножидкостная магнитная гидродинамика
  1. Плазма как сплошная среда
  2. Резистивная магнитная гидродинамика
  3. Идеальная магнитная гидродинамика
  4. Консервативные формы уравнений идеальной МГД
  5. Вмороженность и диффузия магнитного поля
  6. Холловская магнитная гидродинамика
2. Гидродинамика анизотропной плазмы
  1. Тензор напряжений магнитного поля
  2. Гидродинамика анизотропной плазмы
  3. Адиабаты Чу-Голдбергера-Лоу
3. Равновесие плазмы
  1. Теорема вириала
  2. Равновесие изотропной плазмы
  3. Равновесие анизотропной плазмы
  4. Плазма как диамагнетик
4. Равновесие в пинчах
  1. Тэта-пинч

2. Z-пинч
3. Винтовой пинч
4. Бессиловые конфигурации
5. Равновесие плазмы II
  1. Равновесие в токамаке
  2. Магнитные поверхности и удельный объём
  3. Уравнение Грэда-Шафранова
  4. Магнитные острова
6. МГД волны
  1. Уравнение малых колебаний
  2. Альфвеновские волны
  3. Быстрый и медленный магнитный звук
  4. Полярные диаграммы
7. Неустойчивости плазмы I
  1. Гидромагнитная устойчивость плазмы
  2. Метод малых колебаний
  3. Энергетический принцип
  4. Потенциальная энергия возмущений
  5. Вариационный принцип
8. Неустойчивости пинча
  1. Неустойчивость Рэля-Тейлора
  2. Неустойчивости пинча
  3. Критерий Крускала-Шафранова
9. Желобковая неустойчивость
  1. Желобковая неустойчивость плазмы
  2. Критерий Розенблюта-Лонгмайра
  3. Инкремент желобковой неустойчивости
  4. Методы стабилизации желобковой неустойчивости
  5. Баллонная неустойчивость
10. Перезамыкание магнитных силовых линий
  1. Перезамыкание магнитных силовых линий
  2. Тиринг-неустойчивость

*На проверку сформированности компетенции ПК-2:*

1. Доказать, что аксиально-симметричный пробкотрон неустойчив относительно желобковых возмущений.
2. Найти азимутальный ток в -пинче, суммируя дрейфовые и диамагнитные токи (радиальные профили параметров плазмы заданы).
3. Найти критерий шланговой неустойчивости в анизотропной плазме.
4. Пользуясь уравнением продольного равновесия плазмы, найти профиль  $p_{\perp}(B)$  (как функцию магнитного поля) на оси аксиально симметричного пробкотрона, считая, что  $p_{\perp}(B) = \text{const}$  вдоль оси, а  $p_{\parallel}(B) = 0$  в пробке.
5. Получить уравнение продольного равновесия анизотропной плазмы, интегрируя стационарное дрейфовое кинетическое уравнение:

$$v_{\perp} \frac{\partial f}{\partial s} - \frac{\mu}{m} \frac{\partial B}{\partial s} \left( \frac{\partial f}{\partial v_{\perp}} \right)_{\mu} = 0.$$

6. Идеально проводящая жидкая цилиндрическая оболочка с радиусом  $a$  и массой единицы длины  $\mu$  находится в продольном магнитном поле  $\mathbf{B}_0$ . Найти частоту малых радиальных колебаний оболочки.
7. Пусть в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) в плазме с плотностью  $\rho = \text{const}$ , находящейся в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}_0 = \{0, 0, B_0\}$ , создано малое возмущение скорости:  $\mathbf{V} = \Omega \{-y, x, 0\} \cos(kz)$ . Найти возмущение магнитного поля  $\delta \mathbf{B}$  в произвольный момент времени.
8. Найти решение уравнения  $\text{rot} \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ , где  $\lambda = \text{const}$ , в цилиндрической системе координат (пример бессилового конфигурации).

### Пример экзаменационного билета

#### Билет №1

1. Вмороженность и диффузия магнитного поля. (на проверку ПК-1)
2. Тиринг-неустойчивость. (на проверку ПК-1)
3. Доказать, что аксиально-симметричный пробкотрон неустойчив относительно желобковых возмущений. (на проверку ПК-2)

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p><b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b></p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</i></p> <p><b>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»</b> (Новосибирский государственный университет, НГУ)</p> <p><b>Физический факультет</b></p>	
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p>	
1.	.....
2.	.....
3.	.....
Составитель	_____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)
« _____ »	_____ 20 г.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации (приложение 1), 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 «Магнитная гидродинамика»  
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