

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Плазмодинамика
<b>по направлению:</b>	Ядерные физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра плазменной энергетики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.М. Сафронов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры плазменной энергетики 04.06.2020

## Аннотация

Предметом исследования данного курса являются потоки плазмы и их применение в научных исследованиях и технологии. Существенное внимание уделяется также специальным устройствам для получения потоков плазмы – плазменным ускорителям. Рассматриваются физические основы плазменных ускорителей, механизмы ускорения плазмы, достигнутые параметры плазменных потоков и проводимые в настоящее время исследования для усовершенствования ускорителей. Дается информация о классификации плазменных ускорителей и областях применения различных типов ускорителей.

Обсуждаются вопросы взаимодействия плазменных потоков с магнитными полями различной геометрии и способах управления параметрами плазмы в процессе транспортировки потока в магнитном поле. Значительное внимание уделяется получению высокотемпературной плазмы при торможении плазменного потока в результате преобразования энергии направленного движения в тепловую энергию «стационарной» плазмы за счет формирования бесстолкновительных ударных волн. Анализируются способы применения высокоэнергетичных плазменных потоков для заполнения магнитных термоядерных ловушек ионно-горячей плазмой. Рассматриваются действующие и разрабатываемые схемы мощных источников нейтронного и рентгеновского излучения на основе столкновения встречных потоков плазмы, приводятся достигнутые результаты.

Представлены современные средства диагностики, применяемые для измерения параметров плазмы и исследования интересующих плазменных процессов.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Формирование базовых знаний о способах получения потоков плазмы и их применении в современной промышленности, науке и технологии.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физики и техники ускорения плазмы;
- приобретение знаний о физических основах ускорения плазмы, отработанных методах эффективной транспортировки плазмы, взаимодействии потоков плазмы с магнитными полями, способах управления характеристиками плазмы, термализации плазменных потоков при их торможении;
- приобретение знаний об использовании ускоренных пучков и потоков плазмы в современной промышленности, науке и технологии;
- приобретение сведений о современном состоянии и перспективах развития ускорителей плазмы;
- применение студентами полученных знаний в смежных и междисциплинарных научных областях.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Способен составлять общий план работы по заданной теме, предлагать методы исследования и способы обработки результатов, проводить исследование по согласованному с руководителем плану, представлять полученные результаты

	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно- исследовательских работ по предложенной теме
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.1 Знает методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- механизмы ускорения сгустков плазмы;
- основные физические процессы в канале ускорителя;
- характерные параметры потоков плазмы и способы их изменения;
- применения потоков плазмы в современной промышленности, науке и технологии.

уметь:

- проводить самостоятельно и в составе коллектива экспериментальные/ теоретические исследования в области плазмодинамики;
- уметь выбирать и применять на практике адекватные методы диагностики;
- получать максимально точные значения измеряемых величин и правильно оценивать степень их достоверность;
- анализировать и обобщать результаты экспериментальных/теоретических исследований;
- выявлять и оценивать имеющиеся проблемы/противоречия и ставить новые задачи исследований.

владеть:

- экспериментальными методами исследования движущейся плазмы;
- навыками проведения модельных расчетов;
- культурой представления своих результатов на семинарах и конференциях;
- навыками написания научных статей.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Предмет плазмодинамики. Потоки плазмы. Солнечный ветер.	1	1		2
2	Физические основы плазменных ускорителей. Механизмы разгона плазмы.	2	2		3
3	О многообразии плазменных ускорителей. Классификация ускорителей.	2	2		3
4	Плазмотроны. Принцип действия. Достигнутые параметры. Применение.	2	2		3
5	Плазменные космические двигатели. Формула Циолковского.	2	2		3
6	Импульсные ускорители плазмы. Пушка Маршалла. Плазменный фокус Филиппова и Мейзера.	2	2		3
7	Основные физические процессы в канале ускорителя.	2	2		3
8	Способы увеличения скорости и энергии плазменных потоков.	2	2		3
9	Взаимодействие движущейся плазмы с магнитными полями.	2	2		2
10	Методы диагностики движущейся плазмы.	2	2		3
11	Термализация плазменных потоков. Получение ионно-горячей плазмы.	2	2		3
12	Турбулентные механизмы торможения потоков.	2	2		3
13	Инжекция потоков плазмы в токамак.	2	2		3
14	Заполнение плазмой открытых магнитных ловушек. Газодинамическая ловушка (ГДЛ). Длинная антипробочная ловушка (ДАЛ).	2	2		3
15	Генерация мощных потоков плазмы тяжелых газов (Ar, Kr, Xe). Создание источников рентгеновского излучения.	2	2		3
16	Создание источников нейтронного излучения на базе плазменных ускорителей.	1	1		2
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Предмет плазмодинамики. Потоки плазмы. Солнечный ветер.

Способы ускорения вещества. Механические и газокINETические устройства, ускорители заряженных частиц, плазмодинамические системы. Космическая и лабораторная плазмодинамика. Солнечный ветер. Выброс плазмы на стенку токамака.

Плазменные ускорители – устройства для генерации потоков плазмы. Достигнутые параметры. Примеры применения плазменных ускорителей в научных исследованиях и технологии.

## 2. Физические основы плазменных ускорителей. Механизмы разгона плазмы.

Физические основы плазменных ускорителей. МГД уравнения движения плазмы. Микро- и макроскопическая картина ускорения плазмы. Механизмы разгона плазмы: газокINETический механизм, ускорение «электронным» ветром, ускорение электрическим полем. Условия существования электрического поля в плазме (случай Лорентца, Больцмана и Векслера). Роль магнитного поля. Физические ограничения на скорость потоков плазмы.

## 3. О многообразии плазменных ускорителей. Классификация ускорителей.

О многообразии плазменных ускорителей. Классификация ускорителей. Импульсные, квазистационарные и стационарные плазменные ускорители. Ускорители низко и высоко энергетичных потоков плазмы. Тепловые и электромагнитные ускорители. Неизотермические ускорители плазмы. Ускорители с внешним и собственным магнитным полем. «Рельсотрон». Торцевой ускоритель. Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов.

## 4. Плазмотроны. Принцип действия. Достигнутые параметры. Применение.

Стационарные источники плазменных потоков. Плазмотроны. (Принцип действия. Устойчивость разряда. Эрозия электродов. Достигнутые параметры. Технологические применения.)

## 5. Плазменные космические двигатели. Формула Циолковского.

Плазменные космические двигатели. Формула Циолковского. Электростатические и электромагнитные плазменные двигатели. Достигнутые параметры.

## 6. Импульсные ускорители плазмы. Пушка Маршалла. Плазменный фокус Филиппова и Мейзера.

Импульсные ускорители плазмы. Электродные и безэлектродные ускорители. Коаксиальный ускоритель. Пушка Маршалла. Фокусировка плазменного потока. Плазменный фокус Филиппова и Мейзера.

## 7. Основные физические процессы в канале ускорителя.

Основные физические процессы в канале ускорителя. Модель «снежного плуга». Подавление плазменных неустойчивостей.

## 8. Способы увеличения скорости и энергии плазменных потоков.

Особенности генерации мощных потоков плазмы. Согласование ускорителя с накопителем энергии. Геометрия ускорительного канала. Достигнутые параметры плазмы. Способы увеличения скорости и энергии плазменных потоков. Ускорители плазменных тороидов.

## 9. Взаимодействие движущейся плазмы с магнитными полями.

Взаимодействие движущейся плазмы с магнитным полем. Транспортировка плазменных потоков в магнитных полях различных конфигураций. Подавление крупномасштабных МГД неустойчивостей. Потери энергии при транспортировке плазмы в зависимости от величины и геометрии магнитного поля. Управление параметрами плазмы в процессе транспортировки. Сжатие потока, замагничивание плазмы, возбуждение ударных волн, изменение длительности потока.

#### 10. Методы диагностики движущейся плазмы.

Методы диагностики движущейся плазмы. Способы измерения скорости, плотности, температуры и полной энергии плазмы. Зондовые методы измерений, скоростная фотосъемка, калориметрия, болометрия, интерферометрия, спектроскопия оптического и ВУФ диапазонов, томсоновское лазерное рассеяние, нейтронные и рентгеновские детекторы.

#### 11. Термализация плазменных потоков. Получение ионно-горячей плазмы.

Термализация потоков плазмы - преобразование энергии направленного движения потока в тепловую энергию «стационарной» плазмы. Получение горячей плазмы. Термализация потоков плазмы на магнитном барьере. Условия торможения плазмы. Термализация потоков плазмы при их встречном взаимодействии. Границы кулоновского торможения плазменных потоков.

#### 12. Турбулентные механизмы торможения потоков.

Взаимодействие бесстолкновительных потоков. Турбулентные механизмы торможения потоков. Бесстолкновительные ударные волны. Ионно-звуковая и шланговая неустойчивости. Достигнутые параметры термализованной плазмы (плотность, температура, энергосодержание).

#### 13. Инжекция потоков плазмы в токамак.

Применение ускорителей в термоядерных исследованиях. Заполнение плазмой термоядерных ловушек. Ввод плазменных потоков в токамак и стелларатор. Поляризация плазменного потока. Дрейфовое движение плазмы поперек магнитного поля. Способы торможения плазмы на оси системы. Достигнутые параметры.

Инжекция мощных потоков сильно излучающей плазмы (Ne, Ar) в токамак для ослабления срывов тока.

#### 14. Заполнение плазмой открытых магнитных ловушек. Газодинамическая ловушка (ГДЛ). Длинная антипробочная ловушка (ДАЛ).

Заполнение открытых ловушек. Инжекция плазмы в ловушку через торцевые магнитные пробки. Условия прохождения магнитных барьеров. Получение горячей плазмы с  $\sim 1$  столкновением встречных потоков. Подавление крупномасштабных МГД-неустойчивостей. Поперечное удержание плазмы, достигнутые коэффициенты переноса. Результаты исследований газодинамической ловушки (ГДЛ) и длинной антипробочной ловушки (ДАЛ).

#### 15. Генерация мощных потоков плазмы тяжелых газов (Ar, Kr, Xe). Создание источников рентгеновского излучения.

Создание мощных источников светового излучения на основе плазменных ускорителей. Особенности генерации потоков неводородной плазмы. Преобразование энергии движущейся плазмы в излучение при торможении. Характеристики излучения в зависимости от параметров плазменных потоков. Радиационный барьер и условия его преодоления. Разгон плазмы тяжелых газов (Ar, Kr, Xe) до энергии ионов выше 100 кэВ. Разработка источников рентгеновского излучения на базе современных плазменных ускорителей.

#### 16. Создание источников нейтронного излучения на базе плазменных ускорителей.

Создание источников нейтронного излучения. Генерация нейтронов при столкновении потоков дейтериевой плазмы. Выход нейтронов при остановке потоков и при их пролете друг сквозь друга. Заполнение плазмой систем с дополнительным нагревом. Тета-пинч: сжатие и нагрев термализованной плазмы с внешним магнитным полем. Энергетическая эффективность системы, параметры плазмы, нейтронный выход. Тета-пинч с лайнером: сжатие плазмы с  $\ll 1$  металлической оболочкой. Достигнутые степени сжатия.

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

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Введение в плазмодинамику [Текст]/А. И. Морозов, -М., Физматлит, 2006
2. Плазменные ускорители [Текст]/под ред. Л. А. Арцимовича, С. Д. Гришина, Г. Л. Гродзовского [и др.], -М., Машиностроение, 1973
3. Морозов А. И. Плазмодинамика. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Вводный том III. Раздел IX, С. 383-574.
4. Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю., Подгорный И. М., Чуватин С. А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы. ЖЭТФ 33, 3-8 (1958)
5. Подгорный И. М., Чуватин С. А., Быков Г., Письменный В. Исследование процессов электродинамического ускорения сгустков плазмы. Физика плазмы и управляемых термоядерных реакций. М. АН СССР. 1958, Т. 4. с. 222.
6. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1978. 326 с.
7. Пергамент М. И. Методы исследования нестационарных потоков высокотемпературной плазмы.— В кн.: Физика и применение плазменных ‘ускорителей. Минск: Наука и техника, 1974, с. 261.
8. Козлов А.Н. Двумерный характер неустойчивости течений ионизирующего газа в канале плазменного ускорителя. // Изв. АН СССР МЖГ. 1983. № 2. с. 187.
9. Радиационная плазмодинамика. Под ред. Протасова Ю.С. М.: Энергоатомиздат, 1991. Т. 1. 574 с.
10. Skvortsov Yu.V. Research on pulsed and steady- state plasma guns and their applications in the Troitsk branch of Kurchatov Institute of Atomic Energy. // Physics of Fluids. 1992. B4. No.3. P.750.
11. Житлухин А.М., Сафронов В.М., Сиднев В.В., Скворцов Ю.В. Удержание высокотемпературной плазмы с  $\beta = 1$  в открытой ловушке. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т.39. №6. с.247.
12. Архипов Н.И., Житлухин А.М., Сафронов В.М., Скворцов Ю.В. Инжекция и удержание плотной высокотемпературной плазмы с  $\beta = 1$  в длинной антипробочной ловушке. // Физика плазмы. 1994. Т.20. №10. с.868.
13. Сиднев В.В., Скворцов Ю.В., Умрихин Н.М., Хамидуллин Ф.Р. Импульсные плазменные ускорители большой мощности. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 1983. Вып.2(12). с.12.
14. Сиднев В.В., Скворцов Ю.В., Соловьева В.Г., Умрихин Н.М. Особенности электродинамического ускорения плазмы до больших (108 см/с) скоростей. // Физика плазмы. 1984. Т.10. Вып.2. с.392.
15. Архипов Н.И., Житлухин А.М., Сафронов В.М., Сиднев В.В., Скворцов Ю.В. Бесстолкновительная ударная волна в сверхзвуковом плазменном потоке с  $\beta = 1$ . // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т.39. №5. с.205.
16. Ляшенко В.Н., Скворцов Ю.В., Струнников В.М., Церевитинов С.С. Транспортировка замагничивающихся на входном градиенте потоков плазмы в профилированном магнитном поле. // ЖЭТФ. 1983. Т.81. №1. С.71

### Дополнительная литература

1. Управляемые термоядерные реакции [Текст] / Л. А. Арцимович - М.Физматгиз,1961
2. Гидродинамическая теория космической плазмы [Текст], [монография]/В. Б. Баранов, К. В. Краснобаев, -М., Наука, 1977

3. Методы исследований в экспериментальной физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / М. И. Пергамент. — М. : Интеллект, 2010. — 304 с.
4. Гришин С.Д. Ионные и плазменные ракетные двигатели. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы./ Под ред. В.Е.Фортова. М.: Наука, 2000. Т.IV. с.291.
5. Житлухин А.М., Илюшин И.В., Сафронов В.М., Скворцов Ю.В. Исследование взаимодействия встречных плазменных потоков в продольном магнитном поле. // Физика плазмы. 1982. Т.8. №3. с.509.
6. Ландман И.С., Улинич Ф.Р. Потери плазмы из ловушек с остроугольной геометрией. // Физика плазмы. 1982. Т.8. №4. с.663.

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

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://triniti.ru> - электронная библиотека АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ" на внутреннем сайте.
3. <https://user.iter.org> – информационный портал ИТЭР
4. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
5. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
6. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

В настоящее время знания о способах получения потоков плазмы, достигнутых параметрах потоков, а также их возможных применениях необходимы специалистам в самых различных областях современной промышленности, науки и технологии. Поэтому студент, изучающий курс "Плазмодинамика", должен с одной стороны, в полной мере овладеть базовыми знаниями, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике, включая их применение в смежных и междисциплинарных научных областях.

В результате изучения дисциплины студент должен твердо усвоить физические основы ускорения плазмы, разбираться в принципах работы плазменных ускорителей, ориентироваться в многообразии существующих ускорителей и областях их применения. Студент должен освоить обширный объем знаний о взаимодействии плазменных потоков с магнитными полями различной конфигурации, отработанных способах транспортировки потоков плазмы на заданные расстояния без потерь энергий, возможности изменения характеристик плазмы в процессе транспортировки, методах термализации плазменных потоков и получении ионно-горячей «стационарной» плазмы, применении плазменных ускорителей для заполнения термоядерных ловушек и создания источников излучения. Студент должен быть готов применять полученные знания для решения конкретных практических задач.

Студенту необходимо освоить методику проведения приблизительных оценок различных параметров и характеристик плазмы на основе ограниченного набора доступных экспериментальных данных, которые могут иметь значительный разброс по величинам. Для этого студент должен хорошо ориентироваться в физических принципах применяемых диагностических методик, понимать ограничения этих методов и источники возможных погрешностей измерений, а также знать численные формулы физики плазмы и значения основных физических констант

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе),
- подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения,



- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям, экзамену.

Для того, чтобы студенты лучше усваивали учебный материал, в начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной форме. Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется систематически путём опроса в режиме дискуссии по теме, а также в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра плазменной энергетики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.М. Сафронов, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Способен составлять общий план работы по заданной теме, предлагать методы исследования и способы обработки результатов, проводить исследования по согласованному с руководителем плану, представлять полученные результаты
	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.1 Знает методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Плазмодинамика» обучающийся должен:

### знать:

- механизмы ускорения сгустков плазмы;
- основные физические процессы в канале ускорителя;
- характерные параметры потоков плазмы и способы их изменения;
- применения потоков плазмы в современной промышленности, науке и технологии.

### уметь:

- проводить самостоятельно и в составе коллектива экспериментальные/ теоретические исследования в области плазмодинамики;
- уметь выбирать и применять на практике адекватные методы диагностики;
- получать максимально точные значения измеряемых величин и правильно оценивать степень их достоверность;
- анализировать и обобщать результаты экспериментальных/теоретических исследований;
- выявлять и оценивать имеющиеся проблемы/противоречия и ставить новые задачи исследований.

**владеть:**

- экспериментальными методами исследования движущейся плазмы;
- навыками проведения модельных расчетов;
- культурой представления своих результатов на семинарах и конференциях;
- навыками написания научных статей.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Аттестация по дисциплине «Плазмодинамика» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме с включением в билет задачи, подобной рассмотренным в лекционном курсе. Каждый билет содержит два контрольных вопроса. По ходу ответа студенту задаются дополнительные вопросы по обсуждаемой теме.

Перечень контрольных вопросов:

1. Космическая и лабораторная плазмодинамика. Солнечный ветер. Выброс плазмы на стенку токамака.
2. Микро- и макроскопическая картина ускорения плазмы. Механизмы разгона плазмы.
3. Условия существования электрического поля в плазме.
4. Физические ограничения на скорость потоков плазмы .
5. Классификация ускорителей.
6. Плазмотроны. Устройства и применение.
7. Плазменные космические двигатели. Формула Циолковского
8. Импульсные ускорители плазмы. Пушка Маршалла.
9. Фокусировка плазменного потока. Плазменный фокус Филиппова и Мейзера.
10. Основные физические процессы в канале ускорителя. Модель «снежного плуга».
11. Подавление плазменных неустойчивостей в канале ускорителя.
12. Принципы согласования ускорителя с накопителем энергии. Геометрия ускорительного канала.
13. Способы увеличения скорости и энергии плазменных потоков.
14. Взаимодействие движущейся плазмы с магнитными полями.
15. Транспортировка потоков плазмы.
16. Методы диагностики движущейся плазмы.
17. Термализация потоков плазмы. Получение ионно-горячей плазмы.
18. Турбулентные механизмы торможения потоков.
19. Заполнение плазмой термоядерных ловушек. Ввод плазменных потоков в токамак.
20. Инжекция и удержание плазмы в открытых магнитных ловушках.
21. Результаты исследований газодинамической ловушки (ГДЛ) и длинной антипробочной ловушки (ДАЛ).
22. Создание мощных источников светового излучения на основе плазменных ускорителей.
23. Радиационный барьер и условия его преодоления.
24. Разработка источников нейтронного излучения на базе плазменных ускорителей.

Примеры контрольных заданий:

1.

А) Сравнить интенсивности нейтронного выхода для случая пролета встречных плазменных потоков друг сквозь друга и для случая их полной остановки.

В) Плазменный поток при вводе его в цилиндрический плазмопровод с продольным магнитным полем, вытесняет поле к стенкам плазмопровода, что приводит к увеличению энергии магнитного поля. Определить максимальную долю энергии, которую плазменный поток может расходовать на увеличение энергии магнитного поля.

2.

А) Оценить равновесную температуру электронов, которая определяется передачей энергии электронам от более горячих ионов и охлаждением электронов за счет продольной теплопроводности.

В) Оценить длину торможения встречных плазменных потоков для случая кулоновского взаимодействия частиц.

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

#### Билет 1

1 Плазменные ускорители – устройства для генерации потоков плазмы. Физические основы плазменных ускорителей. МГД уравнения движения плазмы. Микро- и макроскопическая картина ускорения плазмы. Механизмы разгона плазмы: газокINETический механизм, ускорение «электронным» ветром, ускорение электрическим полем. Условия существования электрического поля в плазме (случай Лоренца, Больцмана и Векслера). Роль магнитного поля. Физические ограничения на скорость потоков плазмы.

2 Применение потоков плазмы для заполнения термоядерных ловушек. Ввод плазменных потоков в токамак и стелларатор. Поляризация плазменного потока и дрейфовое движение плазмы поперек магнитного поля. Способы торможения плазмы на оси системы. Инжекция потоков сильно излучающей плазмы (Ne, Ar) в токамак для подавления и ослабления срывов тока.

#### Билет 2

1

Классификация плазменных ускорителей. Импульсные, квазистационарные и стационарные плазменные ускорители. Ускорители низко- и высоко-энергетичных потоков плазмы. Тепловые и электромагнитные ускорители. Ускорители с внешним и собственным магнитным полем. «Рельсотрон». Плазменные космические двигатели.

2 Заполнение открытых ловушек. Инжекция плазмы в ловушку через торцевые магнитные пробки. Условия прохождения магнитных барьеров. Получение горячей плазмы с  $\sim 1$  столкновением встречных потоков. Подавление крупномасштабных МГД-неустойчивостей. Поперечное удержание плазмы, коэффициенты переноса. Результаты исследований газодинамической ловушки (ГДЛ) и длинной антипробочной ловушки (ДАЛ).

#### Билет 3.

1 Получение высокотемпературной плазмы при торможении плазменного потока. Торможение потоков плазмы на магнитном барьере, условия торможения. Торможение потоков плазмы при их встречном взаимодействии. Границы кулоновского торможения потоков. Взаимодействие бесстолкновительных потоков. Турбулентные механизмы торможения потоков. Бесстолкновительные ударные волны. Ионно-звуковая и шланговая неустойчивости. Достигнутые параметры термализованной плазмы (плотность, температура, энергосодержание).

2 Импульсные ускорители плазмы. Коаксиальный ускоритель. Пушка Маршалла. Основные физические процессы в канале ускорителя. Модель «снежного плуга». Фокусировка плазменного потока. Плазменный фокус Филиппова и Мейзера.

#### Билет 4.

1 Взаимодействие движущейся плазмы с магнитным полем. Транспортировка плазменных потоков в магнитных полях различных конфигураций. Условия эффективной транспортировки без потери частиц. Подавление крупномасштабных МГД неустойчивостей. Управление параметрами плазмы в процессе транспортировки. Сжатие потока, замагничивание плазмы, возбуждение ударных волн, изменение длительности потока.

2 Создание мощных источников светового излучения на основе плазменных ускорителей. Преобразование энергии плазмы тяжелых газов в излучение при торможении. Характеристики излучения в зависимости от параметров плазменных потоков. Радиационный барьер для плазмы легких элементов (N, C, O и т.п.) и условия его преодоления. Разгон плазмы тяжелых газов (Ar, Kr, Xe) до энергии ионов выше 100 кэВ. Разработка источников излучения на базе современных плазменных ускорителей.

#### Билет 5

1 Методы диагностики движущейся плазмы. Способы измерения скорости, длительности, плотности, температуры и полной энергии потока плазмы.

2 Создание источников нейтронного излучения. Генерация нейтронов при столкновении потоков дейтериевой плазмы. Интегральный выход нейтронов при остановке потоков и при их пролете друг сквозь друга. Заполнение плазмой открытых систем с дополнительным нагревом. Тета-пинч: сжатие и нагрев термализованной плазмы внешним магнитным полем, энергетическая эффективность системы, достигнутые параметры плазмы.

#### Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;

оценка «отлично (9)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые были самостоятельно обнаружены и исправлены;

оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые после указания экзаменатора были самостоятельно исправлены;

оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает неточности в ответе или делает несущественные ошибки при решении задач;

оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает небольшие ошибки в ответе и (или) при решении задач;

оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но отвечает неуверенно и (или) допускает ошибки при решении задач;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, если при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, не владеющему некоторыми разделами учебной программы, но умеющему применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;

оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, показавшему полное незнание учебной программы дисциплины.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена студенту предоставляется 45 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене, как правило, длится около 1 астрономического часа, но не более 2-х часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, справочной литературой, вычислительной техникой и своими конспектами.