

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Лазерный термоядерный синтез
<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 проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: О.О. Шаров, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем инерционного термоядерного синтеза 04.04.2022

## Аннотация

Дисциплина "Лазерный термоядерный синтез" имеет дело с основами физики инерционного термоядерного синтеза, высокотемпературной плазмы, поведением вещества в экстремальных условиях и связанными с ними разделами экспериментальной и теоретической физики и прикладной математики. Ориентирует понимание в различных экспериментальных методиках и теоретических описаниях по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом, свойствам плазмы, лазерному термоядерному синтезу. Даются основные направления исследований по управляемому термоядерному синтезу, характеристика термоядерных реакций, их роль в энергетике будущего. Рассматривается место лазерного термоядерного синтеза в общей концепции инерционного синтеза, особенности использования лазера для зажигания ТЯ реакций, типы мишеней для ЛТС, основные физические процессы, такие как поглощение лазерного излучения, электронная и ионная теплопроводность, перенос излучения, ионизация, газовая динамика и неустойчивости. Обсуждаются общие свойства плазмы и способы описания ее свойств, основные типы плазменных волн в однородной изотропной плазме. Даются понятия термодинамически равновесной плазмы, локального термодинамического равновесия, принципа детального равновесия, вывод уравнения Саха. Рассматривается роль неравновесности в определении характеристик лазерной плазмы и методы описания неравновесной плазмы. Достаточно подробно рассматриваются вопросы поглощения лазерного излучения в однородной и неоднородной плазме, модели описания переноса излучения: спектральное кинетическое уравнение, диффузионное приближение, лучистая теплопроводность. Обсуждаются требования на параметры лазерных установок, системы фокусировки лазерного излучения на термоядерную мишень, критерии выбора основных параметров для построения эффективной лазерной установки для термоядерного синтеза. Дается обзор истории ЛТС и современное состояние проблемы, как в России, так и в мире.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

– изучение студентами физики инерциального термоядерного синтеза.

### Задачи дисциплины

Формирование базовых знаний в области физики высокотемпературной плазмы, поведением вещества в экстремальных условиях, взаимодействием мощного лазерного излучения с веществом и связанными с ними разделами экспериментальной и теоретической физики и прикладной математики.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
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-1.3 Владеет навыками работы с современными расчетными программными средствами

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
	ПК-2.3 Владеет навыками использования информационных технологий и пакетов прикладных программ при проектировании и расчете устройств или объектов (установок, материалов, приборов) в своей предметной области
	ПК-2.4 Способен самостоятельно планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные направления исследований в проблеме лазерного термоядерного синтеза, типы существующих и строящихся лазерных установок, типы конструкции мишеней;
- иметь представление об основных типах термоядерных реакций, лежащих в основе систем инерциального синтеза, узнать детали физических процессов происходящих в лазерных термоядерных мишенях и освоить современные теоретические и математические методы их описания.

уметь:

- оценивать параметры мишени и энергетические требования на лазерную установку для получения требуемых выходных параметров термоядерной реакции. Научиться проводить расчеты поглощения лазерного излучения с использованием современных вычислительных методов и систем.

владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- методами анализа и применения знаний в области физики лазерного термоядерного синтеза для решения конкретных задач научных исследований.

### 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	Магнитное удержание и инерциальный термоядерный синтез.	1			1

2	Лазер как драйвер для систем с инерциальным термоядерным синтезом.	1	3		2
3	Сечения термоядерных реакций.	1	2		2
4	Системы облучения мишени лазерным излучением.	1	3		3
5	Конструкции мишеней для ЛТС.		2		2
6	Характеристика плазмы как четвертого состояния вещества.	1	3		3
7	Введение в электродинамику плазмы.	1	2		2
8	Поглощение лазерного излучения.	1	3		3
9	Электронная и ионная теплопроводность плазмы.		2		2
10	Уравнение спектрального переноса рентгеновского излучения в плазме.	1	3		3
11	Принцип детального равновесия.	1	2		2
12	Чернотельное излучение.	1	3		3
13	Диффузионное приближение для спектрального переноса рентгеновского излучения.	1	2		2
14	Тормозное излучение плазмы.	1	3		3
15	Линейчатое излучение и фотовозбуждение электронов в неполностью ионизованной плазме.	1	3		3
16	Ударное и изэнтропическое сжатие термоядерного топлива.	1	3		3
17	Типы начальных возмущений в термоядерной мишени.	1	3		3
18	Экспериментальные исследования по ЛТС во ВНИИЭФ.		3		3
Итого часов		15	45		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. Магнитное удержание и инерциальный термоядерный синтез.

Введение. Магнитное удержание и инерциальный термоядерный синтез. Основные типы термоядерных реакций.

##### 2. Лазер как драйвер для систем с инерциальным термоядерным синтезом.

Лазер как драйвер для систем с инерциальным термоядерным синтезом. Типы экспериментальных установок для исследований по ЛТС. История, современность и будущее.

##### 3. Сечения термоядерных реакций.

Сечения термоядерных реакций. Скорость DT реакций в термодинамически равновесной плазме. Критерий Лоусона в системах с магнитным удержанием. Инерциальный термоядерный синтез, критерии зажигания мишени.

#### 4. Системы облучения мишени лазерным излучением.

Системы облучения мишени лазерным излучением. Оценка энергии лазера на зажигание. Критерии выбора типа лазера для ИТС.

#### 5. Конструкции мишеней для ЛТС.

Конструкции мишеней для ЛТС. Основные процессы в цикле инерциального термоядерного синтеза.

#### 6. Характеристика плазмы как четвертого состояния вещества.

Что такое плазма. Характеристика плазмы как четвертого состояния вещества. Подходы к описанию плазмы. Уравнения Власова. Интеграл столкновения Ландау.

#### 7. Введение в электродинамику плазмы.

Введение в электродинамику плазмы. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Типы электромагнитных волн в однородной, изотропной плазме. Поглощение Ландау продольных волн. Роль столкновений в поглощении поперечных волн.

#### 8. Поглощение лазерного излучения.

Поглощение лазерного излучения. Распространение лазерного излучения в неоднородной плазме. Основные механизмы поглощения. Генерация и перенос «горячих» электронов в лазерной плазме.

#### 9. Электронная и ионная теплопроводность плазмы.

Электронная и ионная теплопроводность плазмы. Неравновесная плазма. Скорость электронно-ионной релаксации.

#### 10. Уравнение спектрального переноса рентгеновского излучения в плазме.

Уравнение спектрального переноса рентгеновского излучения в плазме. Спектральные коэффициенты испускания и поглощения с поправкой на вынужденное испускание. Закон Кирхгофа.

#### 11. Принцип детального равновесия.

Принцип детального равновесия. Спонтанное и вынужденное излучения.

#### 12. Чернотельное излучение.

Чернотельное излучение. Приближение лучистой теплопроводности.

#### 13. Диффузионное приближение для спектрального переноса рентгеновского излучения.

Диффузионное приближение для спектрального переноса рентгеновского излучения. Первый момент уравнения переноса излучения. Условие применимости диффузного приближения.

#### 14. Тормозное излучение плазмы.

Тормозное излучение плазмы и обратно тормозное поглощение рентгеновского излучения. Рекомбинационное излучение и фотоионизация.

15. Линейчатое излучение и фотовозбуждение электронов в неполностью ионизованной плазме.

Линейчатое излучение и фотовозбуждение электронов в неполностью ионизованной плазме. Коэффициенты Эйнштейна, силы осцилляторов.

16. Ударное и изэнтропическое сжатие термоядерного топлива.

Ударное и изэнтропическое сжатие термоядерного топлива. Профилирование лазерного импульса.

17. Типы начальных возмущений в термоядерной мишени.

Типы начальных возмущений в термоядерной мишени. Неустойчивость Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова. Формула Такабе для рэлей-тейлоровской неустойчивости фронта абляции.

18. Экспериментальные исследования по ЛТС во ВНИИЭФ.

Экспериментальные исследования по ЛТС во ВНИИЭФ. Численное моделирование гидродинамических неустойчивостей во ВНИИЭФ.

## **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. А.А. Мак, Н.А. Соловьев, «Введение в физику высокотемпературной лазерной плазмы», Ленинград: Ленинградский Университет, 1991.
2. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, «Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений», М.: Наука, 1966.
3. В.Л. Гинзбург «Распространение электромагнитных волн в плазме», М.: Наука, 1960.

### **Дополнительная литература**

1. J.D. Lindl, "Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain", Physics of Plasmas, Vol. 2, No. 11, 3933, 1995.
2. J.D. Lindl, P. Amendt, R.L. Berger, et al. "The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility", Physics of Plasmas, Vol. 11, No. 2, 339, 2004.
3. S.E. Bodner, D.G. Colombant, J.H. Gardner, et al. "Direct-drive laser fusion: status and prospects", LLNL Report UCRL-ID-129418, 1998.
4. R.L. McCrory, D.D. Meyerhofer, R. Betti, et al. "Progress in direct-drive inertial confinement fusion", Physics of Plasmas 15, 055503, 2008.
5. S.A. Belkov, L.S. Mkhitarian, O.A. Vinokurov, et al., "Simulation of instability growth rates on the front and back of the laser accelerated planar targets", Physics of Plasmas, Vol. 5, No. 8, 2988, 1998.

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

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <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)**

Skype, Zoom

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Использование файлов (в формате pdf), содержащих визуальный материал для лекций в виде презентаций, а также при необходимости специализированных научных реферируемых журналов: российских (УФН, ЖЭТФ, письма в ЖЭТФ, Физика твердого тела и др) и англоязычных (Physical Review Letters, Physical Review A, Physical Review B, Journal of Chemical Physics, International Journal of Quantum Chemistry и др.), доступных через Internet. Для контроля и коррекции знаний обучающиеся могут использовать компьютерное тестирование, в том числе на портале [www.i-exam.ru](http://www.i-exam.ru)

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

научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия и вопросам лазерного термоядерного синтеза, знать основные модели и их недостатки и достоинства, применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. Самостоятельная работа включает в себя:

- проработку учебного материала (по материалам лекций в виде презентации), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям, экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций или контроля.

При подготовке к практическим занятиям необходимо повторять ранее изученный материал. В начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной или письменной форме. Так как важно добиться понимания изучаемого материала, при затруднении в восприятии материала студентам рекомендуется обращаться за консультациями к преподавателю.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде экзамена, на котором студенту предлагается письменно ответить на 2 теоретических вопроса и ответить на вопросы по теме курса.

**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 проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	О.О. Шаров, канд. физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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
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-1.3 Владеет навыками работы с современными расчетными программными средствами
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
	ПК-2.3 Владеет навыками использования информационных технологий и пакетов прикладных программ при проектировании и расчете устройств или объектов (установок, материалов, приборов) в своей предметной области
	ПК-2.4 Способен самостоятельно планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Лазерный термоядерный синтез» обучающийся должен:

### знать:

- основные направления исследований в проблеме лазерного термоядерного синтеза, типы существующих и строящихся лазерных установок, типы конструкции мишеней;
- иметь представление об основных типах термоядерных реакций, лежащих в основе систем инерциального синтеза, узнать детали физических процессов происходящих в лазерных термоядерных мишенях и освоить современные теоретические и математические методы их описания.

### уметь:

- оценивать параметры мишени и энергетические требования на лазерную установку для получения требуемых выходных параметров термоядерной реакции. Научиться проводить расчеты поглощения лазерного излучения с использованием современных вычислительных методов и систем.

### владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- методами анализа и применения знаний в области физики лазерного термоядерного синтеза для решения конкретных задач научных исследований.

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

1. Основные типы термоядерных реакций.
2. Распространение лазерного излучения в плоском неоднородном слое плазмы.
3. Поглощение лазерного излучения.
4. Обратное тормозное поглощение рентгеновского излучения.
5. Спонтанное и вынужденное излучение.

Пример самостоятельной работы студентов (практического домашнего задания) представлен в прикрепленном файле.

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

На экзамене студенту достается билет, где ему предлагается

- 1) письменно ответить на 2 теоретических вопроса;
- 2) ответить на вопросы по теме курса.

Теоретические вопросы выбирается из набора контрольных вопросов и заданий, приведенных ниже. Некоторые из дополнительных (уточняющих) вопросов приведены ниже.

Перечень контрольных вопросов:

1. Основные типы термоядерных реакций. Сечения термоядерных реакций.
2. Критерий Лоусона в системах с магнитным удержанием.
3. Инерциальный термоядерный синтез, критерии зажигания мишени.
4. Лазер как драйвер для систем с инерциальным термоядерным синтезом. Оценка энергии лазера на зажигание.
5. Конструкции мишеней для ЛТС. Основные процессы в цикле инерциального термоядерного синтеза.
6. Распространение лазерного излучения в плоском неоднородном слое плазмы.
7. Распространение лазерного излучения в сферически симметричной неоднородной плазме.
8. Поглощение лазерного излучения. Тормозное поглощение.
9. Электронная теплопроводность плазмы.
10. Модели кинетики ионизации плазмы. ЛТР, уравнение Саха. Корональное равновесие. Модель химической связи.
11. Ударная ионизация и трехчастичная рекомбинация в плазме. Ударное возбуждение и девозбуждение. Рекомбинационное излучение и фотоионизация.
12. Принцип детального равновесия. Спонтанное и вынужденное излучение.
13. Кинетическое уравнение спектрального переноса рентгеновского излучения в плазме.
14. Диффузионное приближение для спектрального переноса рентгеновского излучения.
15. Чернотельное излучение. Приближение лучистой теплопроводности.
16. Тормозное излучение плазмы и обратное-тормозное поглощение рентгеновского излучения.
17. Планковский и росселандов пробеги рентгеновского излучения.

18. Гидродинамическое описание движения горячей излучающей плазмы. Полная система уравнений.

Перечень контрольных заданий:

1. Методы оценок выходных параметров термоядерных реакций.
2. Расчет сечений термоядерных реакций.
3. Тормозное излучение плазмы и обратно-тормозное поглощение рентгеновского излучения.
4. Планковский и росселандов пробеги рентгеновского излучения. Расчет средних пробегов.
5. Расчет поглощения лазерного излучения в сферически симметричной плазме.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Основные типы термоядерных реакций.
2. Расчет поглощения лазерного излучения в сферически симметричной плазме.

Билет 2.

1. Лазер как драйвер для систем с инерциальным термоядерным синтезом.
2. Планковский и росселандов пробеги рентгеновского излучения. Расчет средних пробегов.

Билет 3.

1. Конструкции мишеней для ЛТС.
2. Тормозное излучение плазмы и обратно-тормозное поглощение рентгеновского излучения.

Билет 4.

1. Распространение лазерного излучения в плоском неоднородном слое плазмы.
2. Расчет сечений термоядерных реакций.

Билет 5.

1. Кинетическое уравнение спектрального переноса рентгеновского излучения в плазме.
2. Методы оценок выходных параметров термоядерных реакций.

Перечень дополнительных (уточняющих) вопросов для сдачи экзамена:

1. Скорость DT реакций в термодинамически равновесной плазме.
2. Критерии выбора типа лазера для ИТС.
3. Резонансное поглощение.
4. Приближение среднего иона.
5. Приближение лучистой теплопроводности.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему 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 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса и один уточняющий вопрос по теме курса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.

## Дисциплина «Лазерный термоядерный синтез»

### Пример самостоятельной работы студентов (практического домашнего задания):

Используя метод регуляризации, изложенный в лекции 8 при выводе дифференциального уравнения для комплексной функции отражения  $V_s$  s-поляризованной электромагнитной волны в сферически симметричной неоднородной плазме, получить аналогичное уравнение для функции отражения  $V_p$  р-поляризованной волны. В итоге должна получиться система комплексных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dV_s}{dR} = 2ik_0\left(\varepsilon - \frac{p^2}{R^2}\right)^{1/2}V_s + \frac{(1-V_s^2)\left(\frac{d\varepsilon}{dR} + 2\frac{p^2}{R^3}\right)}{4\left(\varepsilon - \frac{p^2}{R^2}\right)},$$

$$\frac{dV_p}{dR} = 2ik_0\left(\varepsilon - \frac{p^2}{R^2}\right)^{1/2}V_p - \left[ \frac{d\varepsilon}{dR} \frac{\varepsilon - 2\frac{p^2}{R^2}}{\varepsilon} - 2\frac{p^2}{R^3} \right] \frac{1-V_p^2}{4\left(\varepsilon - \frac{p^2}{R^2}\right)},$$

где  $p$  – прицельный параметр луча, падающего на сферически симметричный плазменный шар,

$k_0$  – волновое число электромагнитной волны в вакууме,

$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} + i \frac{\nu_{ei}\omega_{pe}^2}{\omega_0^2}$  – диэлектрическая проницаемость плазмы,

$\omega_0$  – частота электромагнитной волны,

$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}$  – плазменная частота,

$\nu_{ei} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{m_e}} \cdot \frac{Z^2 e^4 n_e}{Z T_e^{3/2}} L$  – частота электрон-ионных столкновений,

$L$  – кулоновский логарифм,

$n_e(R)$  – электронная концентрация (является заданной функцией радиуса),

$Z$  – заряд плазмы.

Система уравнений интегрируется с начальным условием  $V_s(0)=0$ ,  $V_p(0)=0$ . В точке  $R$ , где плотность плазмы обращается в ноль, величина  $A=1-|V|^2$  определяет полный коэффициент поглощения электромагнитной волны заданного типа на сферически симметричной плазме с заданным профилем электронной концентрации как функции прицельного параметра.

Для численного интегрирования полученной системы уравнений необходимо написать программу на языках FORTRAN или C++ (по выбору студента), реализующую схему Рунге-Кутты с контролем точности на шаге интегрирования. Порядок схемы и метод контроля точности также выбирается студентом самостоятельно.

Программа должна быть отлажена и оттестирована на уравнениях, имеющих аналитическое решение. Студент должен продемонстрировать точность и сходимость численного решения к известному аналитическому решению, которое он также должен выбрать самостоятельно. После завершения отладки необходимо рассчитать коэффициент поглощения s и р поляризованных волн на линейном профиле плотности, заданном

формулой  $\frac{n_e(R)}{n_{cr}} = \begin{cases} 1 + \frac{R_{cr} - R}{L_{cor}}, & R < R_{cr} + L_{cor} \\ 0, & R \geq R_{cr} + L_{cor} \end{cases}$ , где  $n_{cr}$  – критическая плотность плазмы

задается равенством  $\omega_{pe} = \omega_0$ . Длина волны лазерного излучения, падающего на сферическую мишень  $\lambda_0 = 1,06$  мкм.

Плазма образована из полностью ионизованного стеклянного шарика ( $\text{SiO}_2$ ), температура электронов  $T_e = 1$  кэВ,  $R_{cr} = 100$  мкм,  $L_{cor} = 100$  мкм,  $Z = 10$ ,  $L = 5$ .

Построить график коэффициента поглощения для заданных параметров плазмы как функции прицельного параметра  $p$ . Для значения  $p = 0$ , вычислить коэффициент поглощения аналитически и сравнить с полученным численным решением.