

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Взаимодействие плазмы с конструкционными материалами
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра плазменной энергетики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - 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

В курсе «Взаимодействие плазмы с конструкционными материалами» основное внимание уделяется воздействию на материалы мощных плазменных потоков, которые вызывают плавление материалов и даже интенсивное испарение. Актуальность изучения таких режимов взаимодействия обусловлена тем, что они характерны для переходных плазменных процессов в больших токамаках типа ИТЭР и для разрабатываемых в настоящее время плазменных технологий. Подробно анализируются основные процессы перед поверхностью твердотельной мишени, такие как формирование слоя плотной мишенной плазмы за счет ионизации испаренного вещества, торможение налетающего плазменного потока в плотном приповерхностном слое и передача энергии потока мишенной плазмы, преобразование поглощенной энергии в излучение мишенной плазмы, передача энергии на поверхность мишени. Обсуждаются различия в параметрах и динамике мишенной плазмы в зависимости от сорта облучаемого материала. Обсуждаются характерные изменения свойств облученных материалов при различной интенсивности плазменных потоков. Разбираются основные механизмы разрушения поверхности материала и их вклад в итоговую картину разрушения в зависимости от сорта материала и характеристик потока. Обсуждаются современные средства диагностики, применяемые для исследования процессов в плазме и на поверхности облучаемого материала.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать базовые знания об основных физических процессах, происходящих при взаимодействии плазмы с конструкционными материалами как с целью формирования фундаментальных физических представлений о взаимодействии плазмы с твердотельными материалами, так и для приобретения практических навыков по применению полученных знаний при решении прикладных физических и научно-технических задач, в частности, для решения задач, связанных с разработкой и созданием первой стенки международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

### Задачи дисциплины

- Сформировать представление о взаимодействии плазмы с поверхностью материалов как совокупности большого количества одновременно протекающих физических процессов, относительная роль и влияние которых как на динамику взаимодействия, так и его конечные результаты (что произошло с материалом?) существенным образом зависят от условий облучения материала плазмой.
- Предполагается, что по окончании курса студенты приобретут четкие представления об основных физических явлениях, имеющих место быть при взаимодействии плазмы с конструкционными материалами, и сумеют применять полученные знания для решения практических задач, связанных с взаимодействием плазмы с материалами.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или)	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения

разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные физические процессы, развивающиеся при взаимодействии плазмы материалами;
- теоретические и экспериментальные методы, применяемые при изучении взаимодействия плазмы с материалами;
- последствия воздействия плазмы на материалы в зависимости от характеристик плазмы, условий облучения и сорта материала.

уметь:

- проводить самостоятельно и в составе коллектива экспериментальные/ теоретические исследования в области взаимодействия плазмы с материалами;
- 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 взаимодействия плазмы с материалами;
- 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	Вводный раздел: разрушительная и созидательная роль плазмы при облучении конструкционных материалов.	2	2		5

2	Баланс энергии при взаимодействии потоков плазмы с материалами.	3	3		5
3	Эффект экранировки.	2	2		5
4	Свойства плазмы экранирующего слоя.	3	3		5
5	Эффективность экранировки.	3	3		5
6	Преобразование энергии плазмы в излучение.	4	4		
7	Излучение мишенной плазмы.	3	3		5
8	Механизмы эрозии конструкционных материалов под действием плазмы.	3	3		5
9	Эрозионная стойкость конструкционных материалов.	2	2		5
10	Проблема материалов для первой стенки ИТЭР.	3	3		5
11	Плазменная технология. Физические основы импульсной обработки поверхности.	2	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: 2 (Весенний)

1. Вводный раздел: разрушительная и созидательная роль плазмы при облучении конструкционных материалов.

Умеренные потоки энергии. Улучшение свойств материалов при облучении плазмой (плазменные технологии).

Большие потоки энергии. Эрозия поверхности, объемное разрушение материалов под воздействием плазмы.

Проблема материалов первой стенки международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

2. Баланс энергии при взаимодействии потоков плазмы с материалами.

Основные каналы потерь энергии и их относительный вклад в общий баланс в зависимости от характеристик плазменного потока и условий облучения.

Нагрев поверхности. Распространение тепловой волны вглубь материала. Тепловой скин-слой. Предельный поток энергии, который может поглощаться материалом за счет теплопроводности.

3. Эффект экранировки.

Испарение материала. Ионизация пара. Образование мишенной плазмы перед поверхностью. Кулоновское торможение плазменного потока в плотной мишенной плазме. Поглощение энергии потока. «Vapor shielding effect» - эффект экранировки поверхности материала от воздействия плазменного потока слоем мишенной плазмы.

Энергетический порог экранировки для разных материалов. Результаты расчетов и экспериментов.

4. Свойства плазмы экранирующего слоя.

Формирование, динамика и структура экранирующего слоя в зависимости от сорта облучаемого материала и интенсивности облучения.

Характеристики приповерхностной плазмы: плотность, температура, элементный состав, ионизационное состояние. Влияние магнитного поля на параметры экранирующего слоя.

#### 5. Эффективность экранировки.

Механизмы передачи энергии на поверхность облучаемого материала через экранирующий слой.

Эффект «самоэкранировки» плотных (столкновительных) плазменных потоков.

Эффективность ослабления теплового потока на поверхности материала в зависимости от характеристик потока и условий облучения.

#### 6. Преобразование энергии плазмы в излучение.

Преобразование энергии налетающего плазменного потока в излучение мишенной плазмы. Воздействие излучения на окружающие материалы. Эрозия материалов под воздействием света. Характер разрушения поверхности.

#### 7. Излучение мишенной плазмы.

Характеристики излучения мишенной плазмы. Интенсивность и спектр излучения. О возможности создания мощных источников EUV-излучения (2 – 30 нм) на основе взаимодействия потоков плазмы с материалами.

#### 8. Механизмы эрозии конструкционных материалов под действием плазмы.

Механизмы эрозии конструкционных материалов под действием плазмы.

Классические механизмы эрозии: физическое распыление, химическое распыление, радиационно-стимулированная эрозия.

Макроскопические механизмы эрозии: выброс частиц и капель с поверхности облучаемого материала. Хрупкое разрушение материалов. Кипение поверхностного слоя. Развитие неустойчивостей типа Релей-Тейлора или Кельвина-Гельмгольца в слое расплава с образованием капель. Образование кратера эрозии из-за перемещения расплава по поверхности.

#### 9. Эрозионная стойкость конструкционных материалов.

Характер эрозии и поверхностных повреждений наиболее распространенных конструкционных материалов (сталь, медь, вольфрам, молибден, алюминий, титан, графит, углеграфитовые композиты др.). Классификация материалов по характеру разрушения поверхности. Сравнительный анализ эрозионной стойкости современных теплозащитных материалов.

#### 10. Проблема материалов для первой стенки ИТЭР.

Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР. Характеристики плазмы в ИТЭР. Потоки тепла и частиц на стенку камеры ИТЭР во время стационарной работы токамака и переходных плазменных процессов. Эрозия материалов, обращенных к плазме. Проблема выбора теплозащитных материалов для первой стенки ИТЭР. Критерии выбора материалов. Наиболее перспективные материалы для первой стенки и дивертора ИТЭР. Результаты испытаний материалов.

#### 11. Плазменная технология. Физические основы импульсной обработки поверхности.

Плазменная технология. Упрочнение конструкционных материалов импульсной плазмой. Повышение микротвердости, увеличение коррозионной стойкости, снижение коэффициента трения, рост износостойкости и т.п. Физические основы импульсной обработки поверхности.

## 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. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст]/Ю. В. Готт, -М., Атомиздат, 1978
2. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов [Текст] : учебник для вузов / Грибков, В. А.[и др.]; под ред. Б. А. Калина; Рек.М-вом образования РФ .— М : Круглый год, 2001 .— 528 с.
3. Мартыненко Ю.В. Взаимодействие плазмы с поверхностями. // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы./ Под ред. Шафранова В.Д. - М.: ВИНТИ, 1982. - Т.3. - С.119.
4. Post D.T., Behrsh R. Physics of plasma – wall interaction in controlled fusion. // -N.Y.: Plenum Press, 1986. –379p.
5. Харрисон М. Пристеночная плазма. // В кн.: Прикладная физика атомных столкновений. Плазма./ Под ред. Барнета К. и Харрисона М. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С.317.
6. Недоспасов А.В., Токарь Н.З. Пристеночная плазма токамаков // Вопросы теории плазмы. / Под ред. Кадомцева Б.Б. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - Вып.18. - С.136.
7. Игитханов Ю.Л., Крашенинников С.И., Кукушкин А.С., Юшманов П.Н. Особенности процессов переноса в пристеночной плазме токамака. // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы./ Под ред. Шафранова В.Д. - М.: ВИНТИ, 1990. - Т.11. - С.4.
8. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Взаимодействие частиц плазмы с поверхностью. // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы./ Под ред. Шафранова В.Д. - М.: ВИНТИ, 1990. - Т.11. - С.150.
9. Жиглинский А.Г., Кучинский В.В. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. М.: Энергоатомиздат, 1991. - 206 с.
10. Курнаев В.А. Внедрение, отражение и стимулированная десорбция частиц // В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том III. / Под ред. В.Е. Фортова, М.: Наука, 2000. 585с.
11. Курнаев В.А. Взаимодействие плазмы с поверхностью. М.: Изд. МИФИ, 2003, 112 с.
12. Federici G., Scinner C.H., Brooks J.N. et al. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors. // Nuclear fusion. - 2001. – V.41. – No.12R. – P.1967.
13. Kalin B.A., Yakushin V.L., Vasiliev V.I., Tserevitinov S.S. Use of high temperature pulsed plasma fluxes in modification of metal materials. surface and coatings technology, 1997.

### Дополнительная литература

1. Современные методы исследования поверхности [Текст] = Modern techniques of surface science/Д. Вудраф, Т. Делчар , -М., Мир, 1989
2. Взаимодействие медленных частиц с веществом и диагностика плазмы [Текст]/Ю. В. Готт, Ю. Н. Явлинский, -М., Атомиздат, 1973
3. Основы анализа поверхности и тонких пленок [Текст], монография/Л. Фелдман, Д. Майер , -М., Мир, 1989

4. Плетнев В.В., Тельковский В.Г. Коэффициенты распыления поверхности твердых тел легкими ионами // Атомная энергия. 1990. - Т.69, вып. 2. — С. 104.
5. Гусева М.И. Мартыненко Ю.В. Радиационный блистеринг // УФН. 1981. -Т. 135, вып. 4.-С. 671.
6. Беграмбеков Л.Б. Эрозия и трансформация поверхности при ионной бомбардировке // Пучки заряженных частиц и твердое тело (Итоги науки и техники). 1993. - Т.7. - С. 4.
7. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. - 320 с.
8. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. О капельной эрозии металлов под действием плазмы. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2000. - вып.1, с.65
9. Philipps V., Roth J., Loarte A. Key issues in plasma-wall interactions for ITER: European approach // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2003. - Vol. 45. - P. 17-30.
10. Архипов Н.И., Бахтин В., Васенин С.Г. и др./Баланс энергии при взаимодействии интенсивных потоков высокотемпературной плазмы с материалами // Физика плазмы. - 2002. - Т.28. - №4. - С.1.
11. [http://knowledge.allbest.ru/manufacture/3c0a65625a2ac68a5c43a88521216d36\\_0.html](http://knowledge.allbest.ru/manufacture/3c0a65625a2ac68a5c43a88521216d36_0.html)
12. <http://www.biblus.ru/Default.aspx?book=595b38q1>

## **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 взаимодействии плазмы с материалами необходимы специалистам в самых различных областях современной науки и технологии. Поэтому студент, изучающий курс "Взаимодействие плазмы с конструкционными материалами", должен с одной стороны, в полной мере овладеть базовыми знаниями о воздействии плазмы на материалы, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен твердо усвоить основные закономерности взаимодействия плазмы с материалами и уметь оценивать степень влияния на эти закономерности различных экспериментальных параметров: интенсивность теплового воздействия плазменного потока, плотность и температуру облучающей плазмы, геометрию магнитного поля, сорт облучаемого материала и т.д., с тем, чтобы успешно применять полученные знания для решения конкретных практических задач.

Студенту необходимо освоить методику проведения приблизительных оценок результатов воздействия плазмы на конкретные конструкционные материалы в зависимости от величины плазменного теплового потока и сорта материала. Для проведения корректных оценок на основе доступных экспериментальных данных, которые практически всегда имеют значительный разброс по величинам, студенту необходимо знать физические принципы разных экспериментальных методов (зондовые, оптические, спектральные и т. д.), а также понимать ограничения этих методов и источники возможных погрешностей измерений.

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)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра плазменной энергетики  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** В.М. Сафронов, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Взаимодействие плазмы с конструкционными материалами» обучающийся должен:

### знать:

- основные физические процессы, развивающиеся при взаимодействии плазмы материалами;
- теоретические и экспериментальные методы, применяемые при изучении взаимодействия плазмы с материалами;
- последствия воздействия плазмы на материалы в зависимости от характеристик плазмы, условий облучения и сорта материала.

### уметь:

- проводить самостоятельно и в составе коллектива экспериментальные/ теоретические исследования в области взаимодействия плазмы с материалами;
- 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 взаимодействия плазмы с материалами;
- 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 «"Взаимодействие плазмы с конструкционными материалами"» 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. При проведении устного экзамена студенту предоставляется 45 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене, как правило, длится около 1 астрономического часа.

Перечень контрольных вопросов:

1. Взаимодействие ионов и электронов с веществом. Механизмы передачи их энергии твёрдому телу.
2. Баланс энергии при взаимодействии потока плазмы с материалом.
3. Основные каналы потерь энергии при взаимодействии потока плазмы с материалом и их относительный вклад в общий баланс энергии в зависимости от интенсивности потока и условий облучения.
4. Решение уравнения теплопроводности для постоянного потока тепла, поступающего на поверхность материала. Температура поверхности. Тепловой скин-слой.
5. Предельный поток энергии, который может поглощаться материалом за счет теплопроводности.
6. Термическое испарение материала. Ионизация пара. Образование мишенной плазмы. Торможение потока в мишенной плазме. Поглощение энергии потока.
7. Эффект экранировки. Энергетический порог экранировки.
8. Плотность, температура, состав приповерхностной плазмы. Оценки кулоновской длины торможения плазменного потока в экранирующем слое.
9. Какое количество испаренного материала достаточно для экранировки поверхности?
10. Механизмы передачи энергии на поверхность материала через экранирующий слой.
11. Эффект «самоэкранировки» плотных потоков столкновительной плазмы.
12. Различия в механизмах экранировки тяжелых (вольфрам, медь) и легких (графит, нитрид бора) материалов.
13. Экспериментальное определение коэффициента экранировки. Сравнение с результатами численного моделирования.
14. Излучение мишенной плазмы. Спектр излучения. Интенсивность и пространственное распределение излучения. Эрозия окружающих материалов под действием излучения.
15. Различия в характере повреждений поверхности под действием излучения и потока плазмы.
16. Эрозия конструкционных материалов под действием плазмы. Классические механизмы эрозии: физическое распыление, химическое распыление, радиационно-стимулированная эрозия.
17. Макроскопические механизмы эрозии: выброс частиц и капель с поверхности облучаемого материала. Хрупкое разрушение материалов. Пузырьковое кипение поверхностного слоя.
18. Можно ли вскипятить жидкость, нагревая ее с поверхности?
19. Условия развития неустойчивости типа Релей-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца в слое расплава.
20. Движение расплава по поверхности материала. Перемещение расплава под действием давления плазмы. Оценки длины перемещения. Сравнение с результатами эксперимента.

21. Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР. Потоки тепла и частиц на стенку камеры ИТЭР. Эрозия материалов, обращенных к плазме. Проблема выбора теплозащитных материалов для первой стенки ИТЭР.
22. Критерии выбора материалов для камеры ИТЭР. Наиболее перспективные теплозащитные материалы. Результаты испытаний материалов.
23. Плазменная технология. Физические основы импульсной обработки поверхности.

Примеры контрольных заданий:

1.
  - А) Оценить вклад реактивной силы, возникающей вследствие испарения облучаемого материала, в увеличение давления на поверхности материала.
  - В) Решить задачу об одномерном распространении тепловой волны в материале для случая постоянного потока тепла, поступающего на поверхность. Коэффициент температуропроводности полагать постоянным.
2.
  - А) Оценить температуру экранирующего слоя для случая чернотельного излучения мишенной плазмы. Полученный результат сравнить с результатами прямых измерений температуры. По результатам сравнения сделать вывод о реальном характере излучения.
  - В) Для ряда конструкционных материалов (вольфрам, медь, сталь, бериллий, графит) оценить предельный поток энергии, который может поглощаться материалом и отводиться вглубь материала за счет теплопроводности.

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

1.
  - А) Баланс энергии при взаимодействии плазменного потока с материалом. Основные каналы потерь энергии. Роль излучения мишенной плазмы в общем балансе в зависимости от интенсивности потока.
  - В) Передача энергии на поверхность материала. Передача энергии через экранирующий слой. Конвективный перенос тепла, электронная теплопроводность, излучение. Эффект «самоэкранировки» для плотных потоков плазмы.
2.
  - А) Экспериментальные методы исследования характеристик экранирующего слоя: скоростная фотосъемка, оптическая интерферометрия, спектроскопия, лазерное рассеяние, радиационная калориметрия. Сопоставление результатов измерений с результатами расчетов.
  - В) Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР. Потоки тепла и частиц на стенку камеры ИТЭР. Эрозия материалов, обращенных к плазме. Проблема выбора теплозащитных материалов для первой стенки ИТЭР.

#### 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 обучающемуся предоставляется 45 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

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