

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Пекаревский Борис Владимирович  
Должность: Проректор по учебной и методической работе  
Дата подписания: 16.10.2023 13:00:35  
Уникальный программный ключ:  
3b89716a1076b80b2c167df0f27c09d01782ba84



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)»

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной  
и методической работе  
\_\_\_\_\_ Б.В. Пекаревский  
«20» декабря 2016 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
(Начало подготовки – 2017 год)

Специальность

**18.05.02 Химическая технология материалов современной энергетики**

Специализация:

**№5 «Радиационная химия и радиационное материаловедение»**

Квалификация

**Инженер**

Форма обучения

**Очная**

Факультет **инженерно-технологический**

Кафедра **радиационной технологии**

Санкт-Петербург

2016

Б1.Б.27.02

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы .....	04
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы .....	05
3. Объем дисциплины .....	05
4. Содержание дисциплины	
4.1. Разделы дисциплины и виды занятий .....	06
4.2. Занятия лекционного типа .....	06
4.3. Занятия семинарского типа .....	09
4.3.1. Семинары, практические занятия .....	09
4.3.2. Лабораторные занятия .....	09
4.4. Самостоятельная работа .....	09
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине .....	10
6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации .....	10
7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины .....	11
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины .....	12
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины .....	12
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине	
10.1. Информационные технологии .....	13
10.2. Программное обеспечение .....	13
10.3. Информационные справочные системы .....	13
11. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	13
12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья .....	13
Приложения: 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации.	
2. Тесты для проведения текущего контроля.	

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

Для получения планируемых результатов освоения образовательной программы специалитета обучающийся должен овладеть следующими результатами обучения по дисциплине: ОК-11, ПСК-5.1, ПСК- 5.3

<i>Коды компетенции</i>	Результаты освоения ООП (содержание компетенций)	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
<b>ОК-11</b>	готовностью критически оценивать свои достоинства и недостатки, наметить пути и выбрать средства развития достоинств и устранения недостатков	<p><b>Уметь:</b> критически оценивать достоинства и недостатки разрабатываемых планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов.</p> <p><b>Знать:</b> приемы планирования и выбора средства развития достоинств и устранения недостатков</p>
<b>ПСК-5.1</b>	способностью оценивать радиационные эффекты взаимодействия излучения высокой энергии с веществом, использовать или минимизировать последствия этого взаимодействия	<p><b>Уметь:</b> принимать участие в разработке планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов, являющихся объектами профессиональной деятельности, изучать изменения свойств материалов под действием интенсивных радиационных излучений, исследовать радиационную устойчивость материалов и радиационно-химических процессов в теплоносителях ядерных энергетических установок.</p> <p><b>Знать:</b> приемы оценивания радиационных эффектов взаимодействия излучения высокой энергии с веществом, использования или минимизирования последствий этого взаимодействия; механизмы образования радиационных дефектов в различных твердых телах; влияние структуры материала и условий облучения на развитие радиационного дефектообразования; виды наиболее характерных радиационных нарушений в различных материалах и способы их подавления; предельные значения флюенсов и плотностей потоков частиц ионизирующего излучения, допустимые для конкретных условий эксплуатации материала</p>
<b>ПСК- 5.3</b>	способностью оценивать радиационную устойчивость различных материалов и разрабатывать процессы защиты этих материалов	<p><b>Уметь:</b> принимать участие в создании теоретических моделей для прогнозирования свойств материалов современной энергетики прогнозировать возможное изменение различных свойств материалов в конкретных полях ионизирующего излучения и условиях эксплуатации; осуществлять количественную оценку содержания радиационных дефектов и контроль за развитием радиационных нарушений в облучаемом материале;</p>

<i>Коды компетенции</i>	Результаты освоения ООП (содержание компетенций)	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
		работать с научной литературой по специальности <b>Знать:</b> Приемы оценивания радиационной устойчивости различных материалов и разработки процессов защиты этих материалов.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина относится к дисциплинам специализации базовой части (Б1.Б.27.02) и изучается на 4 и 5 курсе в 8 и 9 семестре.

В методическом плане дисциплина опирается на элементы компетенций, сформированные при изучении дисциплин: «Радиационная химия», «Релаксационные методы исследования», «Материаловедение», «Физика конденсированного состояния».

Полученные в процессе изучения дисциплины знания и умения могут быть использованы при изучении последующих учебных дисциплин, прохождении практик, при выполнении выпускной квалификационной работы (государственной итоговой аттестации) и в дальнейшей трудовой деятельности.

## 3. Объем дисциплины.

Вид учебной работы	Всего, академических часов	Семестр	
		8	9
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b> (зачетных единиц/ академических часов)	<b>8/288</b>	<b>4/144</b>	<b>4/144</b>
<b>Контактная работа с преподавателем:</b>	<b>174</b>	<b>48</b>	<b>126</b>
занятия лекционного типа	32	32	
занятия семинарского типа, в т.ч.	142	16	126
семинары, практические занятия	52	16	36
лабораторные работы	90		90
курсовое проектирование (КР или КП)			
КСР			
другие виды контактной работы			
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>78</b>	<b>60</b>	<b>18</b>
<b>Форма текущего контроля</b> (Кр, реферат, РГР, эссе)	-		
<b>Форма промежуточной аттестации</b> (КР, КП, зачет, экзамен)	Экзамен, зачет (36)	Экзамен (36)	зачет

#### 4. Содержание дисциплины.

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий.

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Занятия лекционного типа, акад. часы	Занятия семинарского типа, акад. часы		Самостоятельная работа, акад. часы	Формируемые компетенции
			Семинары и/или практические занятия	Лабораторные работы		
1.	Предмет радиационного материаловедения (Введение)	2	2		8	ОК-11, ПСК-5.1, ПСК-5.3
2.	Ударный механизм образования радиационных дефектов	6	6	8	6	ПСК-5.1
3.	Кинетика накопления вакансий и междоузельных атомов	6	6	8	20	ПСК-5.1
4.	Отжиг радиационных дефектов	6	2	12	10	ПСК-5.1
5.	Радиационные дефекты в металлах	4	12	8	12	ПСК-5.3
6.	Радиационные дефекты в полупроводниках	4	12	18	14	ПСК-5.3
7.	Радиационные дефекты в неорганических и органических диэлектриках	4	12	36	8	ПСК-5.1, ПСК-5.3

##### 4.2. Занятия лекционного типа.

№ раздела дисциплины	Наименование темы и краткое содержание занятия	Объем, акад. часы	Инновационная форма
1	<b>Введение.</b> Изменение физико-механических свойств материалов в полях ионизирующего излучения реакторов деления тяжелых и синтеза легких ядер, ускорителей заряженных частиц и изотопных источников. Представления о механизмах образования радиационных дефектов	2	
2	<b>Ударный механизм образования дефектов.</b> Передача энергии при столкновении атомов. Резерфордские столкновения, представление об экранированных потенциалах взаимодействия, столкновение по закону упругих шаров. Вычисление пороговой энергии первично выбитого атома. Определение энергии атомного смещения. Сечение образования и пробег смещенных атомов. Средняя энергия, передаваемая смещенным атомам. Каскады смещенных атомов и каскадная функция. Тепловые пики и пики смещения. Образование смещенных атомов при облучении твердых тел быстрыми и тепловыми нейтронами, заряженными частицами (тяжелые ионы, альфа-частицы, протоны, электроны) и гамма-квантами.	6	

№ раздела дисциплины	Наименование темы и краткое содержание занятия	Объем, акад. часы	Инновационная форма
	Дефектообразование при альфа- и бета-распаде радионуклидов, распределенных в твердых телах. Ориентационные эффекты при радиационном дефектообразовании в кристаллах. Каналирование частиц и атомов. Фокусировка атомных столкновений (фокусоны, динамические краудионы).		
3	<b>Кинетика накопления вакансий и межузельных атомов.</b> Кинетическое уравнение Смолуховского для диффузионно-контролируемых реакций. Уравнение скорости рекомбинации радиационных дефектов. Уравнения скоростей стока вакансий и межузельных атомов на протяженные дефекты (дислокационные петли, дислокации, вакансионные поры, фазовые выделения). Определение постоянной времени насыщения материала межузельными атомами и вакансиями при различных условиях облучения. Вычисление концентрации дефектов на начальной стадии облучения, определение рекомбинационного объема. Вычисление концентрации радиационных дефектов с учетом стока вакансий и межузельных атомов на дислокации, определение коэффициента диффузии вакансий. Уравнение баланса в стационарном режиме генерации радиационных дефектов.	6	
4	<b>Отжиг радиационных дефектов.</b> Стадии отжига радиационных дефектов в области 5 – 600 К. Определение температурного интервала устойчивости различного типа межузельных и вакансионных дефектов, энергий активации миграции дефектов и порядка кинетики процесса разрушения дефектов.	6	Слайд-презентация
5	<b>Радиационные эффекты в металлах.</b> Вакансионное распухание. Зарождение и рост вакансионных пор. Температурная зависимость вакансионного распухания. Гиперрешетка пор. Коалесценция пор. Способы подавления вакансионного распухания. Радиационный рост. Влияние типа кристаллической решетки и текстуры материала на коэффициент радиационного роста и его температурная зависимость. Способы подавления радиационного роста. Влияние облучения на прочностные характеристики. Диаграмма "напряжение - деформация" и ее изменение после облучения металла. Низко- и высокотемпературное охрупчивание. Изменение температуры вязко-хрупкого перехода. Радиационно-ускоренная ползучесть. Ионное распыление. Коэффициент и скорость распыления. Зависимость коэффициента распыления от энергии и угла падения ионов, температуры образца и его кристаллической ориентации. Блистеринг, причины его образования и методы подавления.	4	

№ раздела дисциплины	Наименование темы и краткое содержание занятия	Объем, акад. часы	Инновационная форма
6	<p><b>Радиационные эффекты в полупроводниковых материалах.</b> Энергия фотопроводимости, термостимулированной гамма-проводимости и образования электронно-дырочной пары в полупроводнике, находящемся в поле ионизирующего излучения. Конверсия проводимости, изменение времени жизни носителей тока в облученных полупроводниках. Проявление подпорогового механизма образования радиационных дефектов (механизм электростатической неустойчивости). Распределение радиационных дефектов в полупроводниковых соединениях, полученных методом ионной имплантации. Эффект малых доз при снятии напряжений в устройстве металл-диэлектрик-полупроводник (тензорadiационный эффект). Радиационная мутация полупроводниковых материалов.</p>	4	
7	<p><b>Радиационные эффекты в неорганических и органических диэлектриках.</b> Подпороговый механизм образования радиационных дефектов в ионных кристаллах, и его экспериментальное обоснование. Критерии образования радиационных дефектов по механизму вибронной неустойчивости возбужденной электронной подсистемы. Качественная оценка эффективности образования F-центров в щелочно-галогенидных кристаллах. Особенности радиационных изменений в стеклах. Собственные и примесные радиационные дефекты в кварцевом стекле. Образование метамиктной фазы. Фотоиндуцирование и радиационные превращения в халькогенидных стеклах, обусловленные их структурной неустойчивостью. Радиационные эффекты в керамических материалах, приводящие к изменению их электрофизических свойств (проводимость, диэлектрические потери, электрическая прочность). Действие гамма-излучения и нейтронов на корундовую керамику, влияние наведенной радиоактивности. Радиолиз органических соединений. Газообразные продукты радиолиза, их количественная оценка. Устойчивость к ионизирующему излучению различных связей и структур органических веществ, влияние антирадов и антиоксидантов. Комбинированное действие ионизирующего излучения и света. Образование в облученных диэлектриках разделенных электрических зарядов, способы их регистрации. Кинетика накопления и время релаксации электрических зарядов. Внутренний электрический пробой, фигуры Лихтенберга</p>	4	

### 4.3. Занятия семинарского типа.

#### 4.3.1. Семинары, практические занятия.

№ раздела	Наименование темы и краткое содержание занятия	Объем, акад. часы	Иновационная форма
2	Потенциалы взаимодействия и сечения упругого смещения атомов при различных энергиях падающих частиц.	2	Слайд-презентация
2	Вычисление скорости образования смещенных атомов при облучении материалов нейтральными и заряженными частицами.	6	Слайд-презентация
3	Подпороговый механизмы образования дефектов. Сравнение эффективностей ударного и подпорогового механизмов образования радиационных дефектов.	4	
4	Решение кинетических уравнений, описывающих накопление радиационных дефектов на разных стадиях облучения.	2	-
4	Отжиг радиационных дефектов.	2	
5, 6, 7	Скорость зарождения и роста новой фазы в облученных материалах.	36	

#### 4.3.2. Лабораторные занятия.

№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость (час)
2, 3, 5, 6	Моделирование радиационных процессов в металлах и полупроводниках (средняя длина свободного пробега, каскад атомных столкновений в изотропном материале, образование вансионных кластеров). Ионное распыление материалов	30
4, 7	Термолюминесцентный метод исследования радиационных дефектов	22
6	Время жизни носителей тока в облученных полупроводниках	8
7	Строение и свойства радиационных дефектов в ионных кристаллах; Микротвердость облученных щелочно-галоидных кристаллов	30

#### 4.4. Самостоятельная работа обучающихся.

№ раздела дисциплины	Перечень вопросов для самостоятельного изучения	Объем, акад. часы	Форма текущего контроля
1	Физические основы моделирования радиационных нарушений. Приемы критического оценивания достоинств и недостатков разрабатываемых планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов. Приемы планирования и выбора средства развития достоинств и устранения недостатков	8	
2	Взаимодействия ионизирующих частиц с веществом, приводящие к образованию межузельных атомов и вакансий	6	

№ раздела дисциплины	Перечень вопросов для самостоятельного изучения	Объем, акад. часы	Форма текущего контроля
3	Использование уравнений кинетики диффузионно-контролируемых реакций для вычисления накопления и отжига радиационных дефектов	6	Индивидуальное задание 1
3	Виды подпороговых механизмов образования радиационных нарушений в различных материалах	8	
3	Особенности эксплуатации конструкционных материалов в ядерно-энергетических установках, основанных на делении тяжелых и синтезе легких ядер	6	
4	Радиационные нарушения в ядерном топливе реакторов деления	8	
5	Радиационное охрупчивание, ползучесть и вакансионное набухание металлов, сталей и сплавов	10	Индивидуальное задание 2
6	Использование радиационной технологии при изготовлении полупроводниковых приборов	6	
7	Радиационно-стойкие и радиационно-чувствительные диэлектрики	6	
6	Оптические методы исследования радиационных дефектов в ионных кристаллах	6	
4, 5, 6, 7	Возможности электронной и автоэлектронной микроскопии исследования радиационного дефектообразования в твердых телах	8	

Контроль освоения компетенций проводится в форме индивидуальных заданий, примеры которых приведены в приложении 2.

#### **5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.**

Методические указания для обучающихся по организации самостоятельной работы по дисциплине, включая перечень тем самостоятельной работы, формы текущего контроля по дисциплине и требования к их выполнению размещены в электронной информационно-образовательной среде СПбГТИ(ТУ) на сайте: <http://media.technolog.edu.ru> .

#### **6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации.**

Своевременное выполнение обучающимся мероприятий текущего контроля позволяет превысить (достигнуть) пороговый уровень («удовлетворительно») освоения предусмотренных элементов компетенций.

Результаты дисциплины считаются достигнутыми, если для всех элементов компетенций превышен (достигнут) пороговый уровень освоения компетенции на данном этапе.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена в 8 семестре и зачета в 9 семестре.

Экзамен предусматривают выборочную проверку освоения предусмотренных элементов компетенций и комплектуются вопросами (заданиями) двух видов: теоретический вопрос (для проверки знаний) и комплексная задача (для проверки умений и навыков).

При сдаче экзамена, студент получает два вопроса из перечня вопросов, время подготовки студента к устному ответу - до 30 мин.

Пример варианта вопросов на экзамене:

Вариант № 1

1. Чему равна предельная энергия ионизации  $E_i$  движущихся атомов He, Al, Fe, Cu, Nb, Ta и продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ?
2. Составьте алгоритм оценки скорости образования радиационных дефектов (смещенных атомов и вакансий)
  - a) Вычисление количества первичновыбитых атомов  $N_{\text{пва}}$
  - b) Вычисление по формуле Кинчина-Пиза каскадной функции  $\square$
  - c) Вычисление скорости образования междоузельных атомов  $i$  и вакансий  $V$  в единицах  $\text{СНА}^*\text{с}^{-1}$

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в Приложении № 1

К сдаче зачета допускаются студенты, выполнившие все предусмотренные планом лабораторные работы.

При сдаче зачета, студент получает два вопроса из перечня вопросов, время подготовки студента к устному ответу - до 20 мин.

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в Приложении № 1

## **7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Штанько В.И. Образование, накопление и отжиг радиационных дефектов / В.И. Штанько, Г.Е. Гладышев.- СПб. СПбГТИ(ТУ), 2013.- 34 с.
2. Штанько В.И. Оптические свойства облучённых кристаллов CsBr-In / В.И. Штанько, Г.Е. Гладышев.- СПб. СПбГТИ(ТУ), 2012.- 21с. (+ЭБ)
3. Гладышев Г.Е. Влияние ионизирующего излучения на микротвёрдость щелочно-галогенидных кристаллов / Г.Е. Гладышев, В.И. Штанько.- СПб. СПбГТИ(ТУ), 2012.- 16с. (ЭБ)
4. Штанько В.И. Металлические частицы в облучённых кристаллах / В.И. Штанько, В.И. Хохреков, Н.В. Чумак.- СПб. СПбГТИ(ТУ), 2012.- 19с. (ЭБ)
5. Экспериментальные методы химии высоких энергий: Учебное пособие / Под общ. ред. М.Я. Мельникова. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 824 с.

### **б) дополнительная литература:**

1. Штанько В.И. Подпороговый механизм образования радиационных дефектов в ионных кристаллах: учебное пособие/ В.И. Штанько.- СПб. СПбГТИ(ТУ) «Синтез», 2006.- 34с. (ЭБ)
2. Материаловедение : учебное пособие / М. М. Сычев [и др.]; СПбГТИ(ТУ). Каф. теорет. основ материаловедения. - СПб.: [б. и.], 2013. - 64 с.

### **в) вспомогательная литература:**

1. Трушин Ю.В. Физическое материаловедение: учебник/ Ю.В. Трушин.- СПб. Наука, 2000. - 286 с.
2. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники: учебное руководство/ В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов.- М. Наука, 1988. - 191 с.
3. Пикаев А.К. Современная радиационная химия: твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты./ А.К. Пикаев.- М. :Наука, 1987. -448 с.
4. Бреховских С.М. Радиационные центры в неорганических стеклах /С.М. Бреховских, В.А. Тюлькин М. Энсргоатомиздат. 1988. - 197 с.

5. Штанько В.И. // Радиационно-химические превращения в неорганических и органических материалах: сб. докладов Научных чтений. / В.И. Штанько и др. Последовательность развития радиолиза в монокристаллах галогенидов цезия. - СПб. СПбГТИ(ТУ). 2000. - С.31-42.
6. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом: учебное пособие/ В.А. Черняев.- М. Физматлит, 2004.- 151с.
7. Материаловедение: учебник для технических вузов. /Б.Н. Арзамасов, И.А.Сидорин, Косолапов Г.Ф. и др.- М.: Машиностроение, 1986. - 383 с.
8. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах/ А.Н. Орлов.- М.: Высшая школа, 1983. - 144 с.
9. Орлов А.Н. Энергия точечных дефектов в металлах/ А.Н. Орлов, Ю.В. Трушин.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 81 с.
10. Урсу И. Физика и технология ядерных материалов/ И. Урсу.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 479 с.
11. Габович М.Д. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологический цели/ М.Д. Габович, Н.В. Плешивцев, Н.Н. Семашко.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 249 с.
12. Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах/ Ч.Б. Лущик, А.Ч. Лущик.- М.: Наука, 1989.- 263 с.
13. Громов В.В. Электрический заряд в облучаемых материалах / В.В. Громов. - М. Энергоатомиздат. 1982. - 112 с.
14. Костюков Н.С. Радиационная стойкость диэлектриков/ Н.С. Костюков, В.В. Маслов, М.И. Муминов. - Ташкент: Фан. 1981.- 214 с.
15. Радиационная стойкость органических материалов: справочник/ В.К. Милинчук, В.И. Туликов, В.А. Брискман и др. под ред. В.К.Милинчука.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 269с.

#### **8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

1. Всероссийский институт научной и технической информации. Режим доступа - <http://www.viniti.ru>
2. ГосНИИ информационных технологий. Режим доступа - <http://www.informika.ru>.
3. Сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Режим доступа - [www.gosnadzor.ru](http://www.gosnadzor.ru),
4. Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом". Режим доступа - <http://rosatom.ru>.
5. ОАО "Концерн Росэнергоатом". Режим доступа - <http://www.rosenergoatom.ru>
6. Топливная компания "ТВЭЛ". Режим доступа - <http://www.tvcl.ru>,
7. МАГАТЭ. Режим доступа - <http://www.iaea.org>.
8. Российский химико – аналитический портал. Режим доступа - <http://www.anchem.ru>,
9. Российский химико – аналитический портал. Режим доступа - <http://www.chem.msu.ru>,
10. электронно-библиотечные системы: «Электронный читальный зал – БиблиоТех» <https://technolog.bibliotech.ru/>; «Лань» <https://e.lanbook.com/books/>.

#### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.**

Все виды занятий по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями следующих СТП:

СТО СПбГТИ 020-2011. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Лабораторные занятия. Общие требования к организации и проведению.

СТП СПбГТИ 040-02. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Лекция. Общие требования;

СТО СПбГТИ 018-2014. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Семинары и практические занятия. Общие требования к организации и проведению.

СТП СПбГТИ 048-2009. КС УКДВ. Виды учебных занятий. Самостоятельная планируемая работа студентов. Общие требования к организации и проведению.

Положение о формах, периодичности и порядке проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся (Приказ ректора от 12.12.2014 № 463).

При изучении дисциплины предусматривается использование активных форм проведения занятий: с разбором конкретных ситуаций, сложившихся в зонах воздействия опасных и вредных факторов, и возможных принципов и методов защиты.

Планирование времени, необходимого на изучение данной дисциплины, необходимо осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала.

Основными условиями правильной организации учебного процесса для студентов является плановость в организации учебной работы; серьезное отношение к изучению материала; постоянный самоконтроль.

## **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

### **10.1. Информационные технологии.**

В учебном процессе по данной дисциплине предусмотрено использование информационных технологий: чтение лекций с использованием слайд-презентаций; взаимодействие с обучающимися посредством электронной почты.

### **10.2. Программное обеспечение.**

Операционные системы Windows, стандартные офисные программы (Microsoft Office), MatCad, антивирусная программа.

### **10.3. Информационные справочные системы.**

Информационно-поисковая система «РОСАТОМ»: <http://www.rosatom.ru/sitemap/>

## **11. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для проведения лекционных и практических занятий используется учебная аудитория, укомплектованная специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории. Для проведения лекционных и практических занятий используются видеоматериалы.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду СПбГТИ(ТУ).

Лаборатории, укомплектованные специализированной мебелью, оснащены лабораторным оборудованием: облучательное устройство БОУ/4 стронций-90 спектрофотометры, прибор для определения микротвердости.

Помещения для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования оснащены специализированной мебелью и техническими средствами.

## **12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья.**

Для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями учебные процесс осуществляется в соответствии с Положением об организации учебного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья СПбГТИ(ТУ), утвержденным ректором 28.08.2014 г.

**Фонд оценочных средств  
для проведения промежуточной аттестации  
по дисциплине «Радиационное материаловедение»**

**1. Перечень компетенций и этапов их формирования.**

<b>Компетенции</b>		
<b>Индекс</b>	<b>Формулировка</b>	<b>Этап формирования</b>
<b>ОК-11</b>	готовностью критически оценивать свои достоинства и недостатки, наметить пути и выбрать средства развития достоинств и устранения недостатков	промежуточный
<b>ПСК-5.1</b>	способностью оценивать радиационные эффекты взаимодействия излучения высокой энергии с веществом, использовать или минимизировать последствия этого взаимодействия	промежуточный
<b>ПСК-5.3</b>	способностью оценивать радиационную устойчивость различных материалов и разрабатывать процессы защиты этих материалов	промежуточный

**2. Показатели и критерии оценивания компетенций на различных этапах их формирования, шкала оценивания.**

<b>Показатели оценки результатов освоения дисциплины</b>	<b>Планируемые результаты</b>	<b>Критерий оценивания</b>	<b>Компетенции</b>
Освоение раздела № 1	<p>Умеет: Принимать участие в разработке планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов, являющихся объектами профессиональной деятельности и критически оценивать их достоинства и недостатки; работать с научной литературой по специальности.</p> <p>Знает: Приемы оценивания радиационных эффектов взаимодействия излучения высокой энергии с веществом, использования или минимизирования последствий этого взаимодействия; радиационной устойчивости различных материалов; приемы планирования и выбора средства развития достоинств и устранения недостатков</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету № 1-21	ОК-11, ПСК-5.1, ПСК-5.3
Освоение раздела №2	<p>Умеет: изучать изменения свойств материалов под действием интенсивных радиационных излучений</p> <p>Знает: ударный механизм образования радиационных дефектов в различных твердых телах</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету № 22 - 26	ПСК-5.1

Показатели оценки результатов освоения дисциплины	Планируемые результаты	Критерий оценивания	Компетенции
Освоение раздела № 3	<p>Умеет: изучать кинетику накопления вакансий и междоузельных атомов под действием интенсивных радиационных излучений</p> <p>Знает: Приемы оценивания радиационных эффектов взаимодействия излучения высокой энергии с веществом, использования или минимизирования последствий этого взаимодействия. механизмы кинетики накопления радиационных дефектов в различных твердых телах</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету № 27-31	ПСК-5.1
Освоение раздела №4	<p>Умеет: изучать отжиг радиационных дефектов материалов под действием интенсивных радиационных излучений исследовать радиационную устойчивость материалов и радиационно-химических процессов в теплоносителях ядерных энергетических установок.</p> <p>Знает: Приемы оценивания отжига радиационных дефектов с веществом, использования или минимизирования последствий этого взаимодействия. механизмы отжига радиационных дефектов в различных твердых телах, влияние структуры материала и условий облучения на развитие радиационного дефектообразования, виды наиболее характерных радиационных нарушений в различных материалах и способы их подавления, предельные значения флюенсов и плотностей потоков частиц ионизирующего излучения, допустимые для конкретных условий эксплуатации материала</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету № 32-49	ПСК-5.1
Освоение раздела № 5	<p>Умеет: Принимать участие в создании теоретических моделей для прогнозирования свойств металлов прогнозировать возможное изменение различных свойств металлов в конкретных полях ионизирующего излучения и условиях эксплуатации; осуществлять количественную оценку содержания радиационных дефектов и</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету №50-54	ПСК-5.3

Показатели оценки результатов освоения дисциплины	Планируемые результаты	Критерий оценивания	Компетенции
	<p>контроль за развитием радиационных нарушений в облучаемом металле;</p> <p>Знает:</p> <p>Приемы оценивания радиационной устойчивости различных металлов и разработки процессов их защиты</p>		
Освоение раздела №6	<p>Умеет:</p> <p>прогнозировать возможное изменение различных свойств полупроводников в конкретных полях ионизирующего излучения и условиях эксплуатации;</p> <p>осуществлять количественную оценку содержания радиационных дефектов и контроль за развитием радиационных нарушений в облучаемых полупроводниках;</p> <p>Знает:</p> <p>Приемы оценивания радиационной устойчивости различных полупроводников и разработки процессов их защиты.</p>	Правильные ответы на вопросы к экзамену и зачету № 55 - 70	ПСК-5.3
Освоение разделов № 1-7	<p>Умеет:</p> <p>Принимать участие в разработке планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов, являющихся объектами профессиональной деятельности; оценивать их достоинства и недостатки, изучать изменения свойств материалов под действием интенсивных радиационных излучений; исследовать радиационную устойчивость материалов и радиационно-химических процессов в теплоносителях ядерных энергетических установок.</p> <p>Принимать участие в создании теоретических моделей для прогнозирования свойств материалов современной энергетики</p> <p>прогнозировать возможное изменение различных свойств материалов в конкретных полях ионизирующего излучения и условиях эксплуатации;</p> <p>осуществлять количественную оценку содержания радиационных дефектов и контроль за развитием радиационных нарушений в облучаемом материале;</p> <p>Знает:</p> <p>Приемы планирования и выбора средства развития достоинств и устранения недостатков, оценивания радиационных эффектов взаимодействия излучения высокой энергии с веществом,</p>	Правильные ответы на вопросы к зачету № 1-70. Отчеты по лабораторному практикуму	ОК-11, ПСК-5.1, ПСК-5.3

Показатели оценки результатов освоения дисциплины	Планируемые результаты	Критерий оценивания	Компетенции
	<p>использования или минимизирования последствий этого взаимодействия. механизмы образования радиационных дефектов в различных твердых телах, влияние структуры материала и условий облучения на развитие радиационного дефектообразования, виды наиболее характерных радиационных нарушений в различных материалах и способы их подавления, предельные значения флюенсов и плотностей потоков частиц ионизирующего излучения, допустимые для конкретных условий эксплуатации материала</p> <p>Приемы оценивания радиационной устойчивости различных материалов и разработка процессов защиты этих материалов.</p>		

Шкала оценивания соответствует СТО СПбГТИ(ТУ):  
промежуточная аттестация проводится в форме экзамена, шкала оценивания – балльная, и зачета (результат оценивания – «зачтено», «не зачтено»).

### 3. Типовые контрольные задания для проведения промежуточной аттестации.

#### 3.1 Типовые контрольные задания для проведения промежуточной аттестации в форме экзамена.

#### Вопросы для оценки сформированности элементов компетенции ОК-11, ПСК 5.1, ПСК 5.3:

1. Перечислите необходимые условия образования френкелевских дефектов по ударному механизму.
2. Почему при упругом взаимодействии пороговая энергия образования френкелевских дефектов  $E_d > E_{см}$ , где  $E_{см}$  - энергия образования междоузельного атома в равновесных условиях?
3. Чему равна предельная энергия ионизации  $E_i$  движущихся атомов He, Al, Fe, Cu, Nb, Ta и продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ?
4. Каким образом из экспериментальной зависимости  $N_d = f(E_i)$ , где  $E_i$  - энергия взаимодействующих с веществом моноэнергетических электронов и  $N_d$  – количество образующихся радиационных дефектов, можно определить квантовую энергию образования дефекта  $E_d$ ?
5. При каких энергиях движущихся частиц их упругое взаимодействие с покоящимися атомами можно рассматривать:
  - a. Как упругое взаимодействие твердых шаров
  - b. Как чисто кулоновское взаимодействие (резерфордовское столкновение)
  - c. Как кулоновское взаимодействие с электронным экранированием
6. Что понимают под радиусом жесткой сердцевины, «диаметром столкновения», радиусом экранирования, критической энергией движущегося атома?
7. Чему равна энергия смещенного атома при упругом взаимодействии налетающей частицы (атома) с покоящимся атомом
  - a. При альфа-распаде

- b. При бета-распаде
- c. При колебании тепловых нейтронов, сопровождаемым испусканием заряженных частиц, гамма-квантов, делением ядер
8. Вычисление сечений упругого рассеяния при взаимодействии атомов по типу твердых шаров и кулоновскому взаимодействию:
9. полные сечения упругого взаимодействия ( $\sigma_{\text{полн}}$ )
10. Дифференциальные сечения ( $d\sigma$ )
11. В чем разница между пространственным распределением смещенных атомов, образующихся при упругом соударении по типу твердых шаров и кулоновском взаимодействии? Какая средняя энергия передается смещенным атомам в первом и втором случаях?
12. Что понимают под свободным пробегом, полной длиной пробега, поперечным пробегом, вектором пробега, глубиной проникновения смещенного атома? Какова зависимость этих величин от энергии смещенного атома?
13. Что такое «тепловой клин» и «клин смещения»?
14. Каким образом происходит сепарация компонентов сплава при облучении?
15. Особенность образования радиационных дефектов в кристаллах:
16. Простая и «линзовая» фокусировка соударений, параметр фокусировки и его зависимость от энергии смещенного атома, образование фокусонов и краудионов, причины затухания фокусированных соударений
17. Условия осевого и плоскостного каналирования заряженных частиц и атомов в кристаллах (угол входа частицы в канал, критическая энергия каналирования), примеры практического использования каналирования (исследование дефектности кристалла и его структуры, управление траекториями каналируемых частиц, образование квазихарактеристического фотонного излучения при каналировании электронов, ионизация каналированных электронов)
18. Расчет скорости образования радиационных дефектов (смещенных атомов и вакансий)
19. Вычисление количества первичновыбитых атомов  $N_{\text{пва}}$
20. Вычисление по формуле Кинчина-Пиза каскадной функции  $\nu$
21. Вычисление скорости образования междуузельных атомов  $i$  и вакансий  $V$  в единицах  $\text{СНА} \cdot \text{с}^{-1}$
22. Уравнение Смолуховского для диффузионо-контролируемых реакций, основные положения теории диффузионо-контролируемых реакций.
23. Составление на основе уравнения Смолуховского
- Уравнения скорости рекомбинации междуузельных атомов и вакансий
  - Уравнений скоростей стока  $\nu$  и  $i$  на дефекты, имеющиеся в облучаемом веществе (дислокационные петли, дислокации, вакансионные поры, предфазовые и фазовые примесные выделения).
24. Что понимают под радиусом зоны неустойчивости пары  $\nu$  и  $i$  и каким образом определяют коэффициент рекомбинации  $\mu_R$  пары  $\nu$  и  $i$ ?
25. Какие величины входят в плотность стоков для вакансий  $S_\nu$  и междуузельников  $S_i$ ?
26. Виды уравнений баланса для скоростей образования и гибели  $\nu$  и  $i$  при различных условиях облучения:
- Случай «сильной» рекомбинации  $\nu$  и  $i$  и вычисление постоянной времени накопления радиационных дефектов  $t_R$
  - Случаи наличия «сильных» стоков в облучаемом образце для  $\nu$  и  $i$  и вычисление постоянной времени накопления  $t_s^\nu$  и  $t_s^i$
  - Кинетика накопления вакансий на начальной стадии облучения, вывод уравнения,  $C_V^2 = f(t)$ , экспериментальное определение коэффициента рекомбинации  $\mu_R$

- d) Кинетика накопления радиационных дефектов при наличии рекомбинации между  $v$  и  $i$  и стока  $v$  и  $i$  на дефекты, имеющиеся в облучаемом образце, вывод уравнения  $C_v^2=f(t)$  и оценка коэффициента диффузии вакансий из экспериментальной зависимости накопления вакансий
- e) Решение уравнения баланса в стационарном режиме генерации  $v$  и  $i$ .
- 27 Определение температурной области устойчивости/неподвижности радиационных дефектов
- 28 Режимы нагрева (отжига) облученных образцов: изотермический, линейный, изохронный и возможные их модификации (импульсно-изотермический, ступенчатый, модуляционный)
- 29 Экспериментальные методы исследования отжига облученных образцов по изменению электрического сопротивления металлов и сплавов, наведенного облучением оптического поглощения диэлектриков и их термостимулированной люминесценции и экзoeлектронной эмиссии. Достоинства и недостатки.
- 30 Основные стадии отжига в температурном интервале 5 – 600К
- 31 Анализ кривых отжига в изотермическом режиме. Определение порядка реакции между дефектами, кинетического множителя, энергии активации
- 32 Почему происходит радиационное (вакансионное) распухание?
- 33 Экспериментальные методы изучения вакансионного распухания: электронная микроскопия, измерение плотности полученных образцов
- 34 Гомогенное и гетерогенное образование зародышей вакансионных пор, вычисление критического размера зародыша поры при гомогенном образовании, скорость образования зародышей пор и их рост в условиях облучения, образование гиперрешетки пор
- 35 Коалесценция пор, распределение пор по размерам в случаях контролирующей коалесценции механизмов объемной диффузии вакансий (1) или реакций вакансий на межфазной границе пора – твердое тело (2)
- 36 Способы подавления вакансионного распухания:
- a) Выбор температурной области облучения материала
- b) Влияние примесных атомов, усиливающих и ослабляющих вакансионное распухание
- 37 Какие признаки характерны для радиационного роста облученных материалов?
- 38 Влияние кристаллической структуры и предварительной деформации (текстурирования) материала на его радиационный рост
- 39 Коэффициент радиационного роста и его температурная зависимость
- 40 Упорядоченное расположение дислокационных междуузельных и вакансионных петель в облученных образцах металлического урана
- 41 Способу подавления радиационного роста облученных материалов
- 42 Состав и содержание в ядерном топливе газообразных продуктов деления
- 43 Температурная зависимость распухания урана при различных выгораниях
- 44 Соотношение лапласовского (капиллярного) давления и упругого напряжения материала вокруг пузырька газа в зависимости от радиуса пузырька, причина «катастрофического» распухания
- 45 Изменение под действием нейтронного облучения диаграммы «напряжение-деформация», пределов текучести  $\sigma_T$  и прочности  $\sigma_B$ , температуры вязко-хрупкого перехода и ударной вязкости
- 46 Особенности низко- и высокотемпературного охрупчивания, действия облучения на сплавы, сварные швы
- 47 Радиационная ползучесть. Стадии ползучести, влияние температуры и напряжения, предел ползучести. Влияние радиации на ползучесть, причины радиационно-стимулированной ползучести

- 48 Ионное распыление металлов, процессы физического и химического распыления. Коэффициент и скорость распыления. Зависимость коэффициентов распыления от энергии и угла падения ионов, температуры образца и его кристаллической ориентации.
- 49 Условия образования блистеров, эрозия поверхности. Способы минимизации распыления металлов и развития блистеринга в термоядерных установках.
- 50 Энергия образования электронно-дырочной пары в полупроводнике, находящемся в поле ионизирующего излучения. Оценка мощности поглощенной дозы, приводящей к изменению параметров работы полупроводниковых приборов.
- 51 Конверсия проводимости, изменение времени жизни носителей тока в облученных полупроводниках
- 52 Изменение фотопроводимости и термостимулированная гамма-проводимость облученных полупроводников
- 53 Радиационная мутация и легирование полупроводниковых материалов, эффект малых доз (тензорационный эффект) при снятии механических напряжений в МДП-транзисторах
- 54 Проявление подпорогового механизма образования радиационных дефектов в полупроводниковых материалах (механизмы электростатической неустойчивости)
- 55 Подпороговый механизм образования радиационных дефектов в ионных кристаллах
- 56 Экспериментальное обоснование подпорогового механизма образования радиационных дефектов на примере щелочно-галогенидных кристаллов (ЩГК)
- 57 Виды электронных возбуждений в ЩГК, их автолокализация и последовательность релаксации, приводящей к образованию френкелевской пары дефектов F- и H-центров
- 58 Критерии образования радиационных дефектов по механизму вибронной неустойчивости возбужденной электронной подсистемы ионного кристалла
- 59 Количественная оценка эффективности образования F-центров в облученных ЩГК
- 60 Примеры строения собственных и примесных радиационных дефектов, образующихся в облученных ЩГК при различных температурах и поглощенных дозах
- 61 Оптический метод исследования радиационных дефектов в ионных кристаллах
- 62 Радиационные эффекты в стеклах
- 63 Особенности стеклообразного состояния твердого тела: условия образования, структура, типы стекол
- 64 Радиационные дефекты в кварцевом стекле: строение E<sub>1m</sub>-, E<sub>-i</sub>-, H<sub>+j</sub>-центров; влияние примесных атомов на образование, строение радиационных дефектов и свойства облученного стекла; радиационное образование аморфного кварца в виде метамиктной фазы.
- 65 Фотоиндукцирование и радиационные превращения в халькогенидных стеклах: реверсивные изменения оптической плотности и физико-химических свойств (плотность, микротвердость, скорость растворения и др.) при возбуждении электронной подсистемы и последующем отжиге экспонированных образцов; причина структурной неустойчивости халькогенидных стекол.
- 66 Влияние радиации на электрофизические свойства (ЭФС) керамических материалов. Кристаллическая фаза, стеклофаза и воздушные поры - составные части керамики, их поведение в полях ионизирующего излучения и влияние на ЭФС (проводимость, диэлектрические потери, электрическую прочность). Изменение ЭФС корундовой керамики под действием гамма-излучения и после высоких флюенсов нейтронных потоков, влияние наведенной радиоактивности.
- 67 Радиационная повреждаемость органических материалов. Обратимые и необратимые радиационные эффекты. Газообразные продукты радиолиза, значения их радиационно-химических выходов. Зависимость радиационной стойкости органических соединений от их химического строения (наличие ненасыщенных двойных связей, связей C-F, C-S, C-O, ароматических и гетероциклических циклов), природы электронного возбуждения молекул, содержания кристаллической и аморфных фаз, температуры облучения,

внешнего давления. Комбинированное действие ионизирующего излучения и света. Использование добавок в качестве антирадов и антиоксидантов.

68 Образование электрических зарядов в облученных диэлектриках.

69 Условия образования в диэлектриках электрических зарядов при облучении электронами и гамма-квантами. Кинетика накопления и время релаксации зарядов.

70 Методы обнаружения электрических зарядов в облученных диэлектриках. Внутренний электрический пробой, фигуры Лихтенберга.

### **3.2 Типовые контрольные задания для проведения промежуточной аттестации в форме зачета**

К зачету допускаются студенты, выполнившие все лабораторные работы и формы текущего контроля. При сдаче зачета студент предъявляет правильно оформленные отчеты по лабораторному практикуму, демонстрируя умение критически оценивать достоинства и недостатки используемых планов, программ и методик проведения исследований материалов и технологических процессов, являющихся объектами профессиональной деятельности, знание приемов планирования и выбора средства развития достоинств и устранения недостатков; получает два уточняющих вопроса из перечня, приведенного выше.

Время подготовки студента к устному ответу на вопросы - до 20 мин. промежуточная аттестация проводится в форме зачета, результат оценивания – «зачтено», «не зачтено».

### **4. Методические материалы для определения процедур оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в соответствии с требованиями Положения о формах, периодичности и порядке проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся (Приказ ректора от 12.12.2014 № 463) и СТО СПбГТИ(ТУ) 016-2015. КС УКДВ. Порядок проведения зачетов и экзаменов.

## Приложение 2.

### Материалы, используемые при самоконтроле знаний студентов

#### Индивидуальное задание №1

Определить количество свободных вакансий, накапливающихся за время  $t$  в материале  $X$  под действием (вид ИИ) с энергией  $E$  при плотности потока  $f$  энергии  $E_d$  и температуре  $T$ .

#### Индивидуальное задание №2

Определить количество МУА, накапливающихся за время  $t$  в материале  $X$  под действием (вид ИИ) с энергией  $E$  при плотности потока  $f$  энергии  $E_d$  и температуре  $T$ .

№ варианта	материал	время	вид ИИ	энергия частицы	Плотность потока	$E_d$ , эВ	$T$ образца, °С
1	Al	10 дней	нейтрон	14 МэВ	$1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	25	100
2	железо	1 год	$^{239}\text{Pu}$ , внутреннее обл.	-	-	30	50
3	Al	1 год	бета, $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ , диаметр 1 см, $A=1$ Ки	-	-	30	н.у.
4	Cd	1 месяц	тепловые нейтроны	-	$10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	40	200
5	железо	2 часа	гамма, $^{60}\text{Co}$ , $D_{\text{полг}}=10^3 \text{ Гр}$	-	-	30	н.у.
6	Цирконий	1 год	нейтрон	2 МэВ	$1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	50	200
7	медная матрица, 20% металлического урана	2 года	после 3% выгорания, ЯЭУ				300
8	Цирконий	10 мин	$^{40}\text{Ar}^+$	30 кэВ	$10^{-3} \text{ А/см}^2$	40	100
9	Al	1 час	электрон	1 МэВ	$10^{-6} \text{ А/см}^2$	30	30
10	Mo	1 час	протоны	1 МэВ	$0,1 \text{ мкА/см}^2$	40	150
11	никель	1 час	альфа -ч.	4 МэВ	$1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	30	100
12	медь	10 лет	бета, $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ , внутреннее обл., $A=10^{-2}$ Ки/кг			30	30
13	графит	2 часа	нейтрон	14 МэВ	$1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	25	н.у.

№ варианта	материал	время	вид ИИ	энергия частицы	Плотность потока	Ed, эВ	Т образца, °С
14	графит	1 год	нейтрон	2 МэВ	$10^{13}$ т.н./см <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	50	200
15	железо, 3% Gd	1 месяц	тепловые нейтроны		$10^{13}$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	40	200
16	вольфрам	10 час	электрон	3 МэВ	$10^{-3}$ А/см <sup>2</sup>	50	100
17	свинец	10 лет	<sup>239</sup> Pu, внутреннее обл., $10^{-3}$ Ки/кг	-	-	40	50
18	Al	10 лет	бета, <sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y, внутреннее обл., A= $10^{-1}$ Ки	-	-	25	50
19	Al	1 год	бета, <sup>32</sup> P, диаметр 1,5 см, A=2 Ки	-	-	30	40
20	Цирконий	5 час.	альфа -ч.	2 МэВ	0,1 мкА/см <sup>2</sup>	50	100
21	Ниобий	2 часа	протоны	5 МэВ	10 нА/см <sup>2</sup>	45	300 К