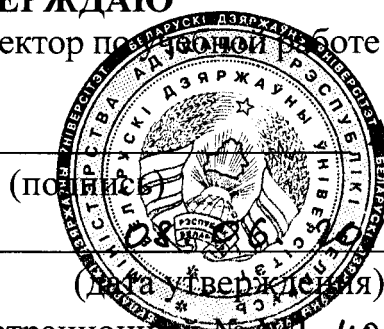


Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



Л. Толстик

(подпись)

(дата утверждения)

Регистрационный № Д-4031 /уч.

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Учебная программа учреждения высшего образования

по учебной дисциплине для специальности

1-31 04 06 Ядерные физика и технологии

Минск 2017

Учебная программа составлена на основе ОСВJ 1-31 04 06-2013 и учебного плана № G-31-142/уч от 30.05.2013 г

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**В.В.Углов** — заведующий кафедрой физики твердого тела Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор;

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики твердого тела  
физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 10 от 16 05 2017г.);

Советом физического факультета  
(протокол № 11 от 08 06 2017 г.).

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины "Структурно-фазовые изменения при облучении" разработана для специальности 1-31 04 06 Ядерные физика и технологии.

**Цель** учебной дисциплины – формирование у студентов целостных представлений о структурно-фазовых превращениях в материалах, используемых в атомной энергетике.

**Основные задачи** учебной дисциплины – усвоение основных современных представлений о процессах взаимодействия заряженных частиц и ионизирующих излучений с веществом, кинетике и динамике структурных и фазовых превращений, непосредственно связанных с проявлением физико-химических свойств материалов под воздействием потоков частиц и излучений высоких энергий.

Длительность эксплуатации ядерно-энергетических установок во многом зависит от состояния конструкционных материалов. В связи с этим необходимо детальное рассмотрение основных процессов их радиационного повреждения, обсуждение возможных явлений и радиационных эффектов изменения термодинамического равновесного состояния в условиях облучения, изучение теории радиационно-стимулированной диффузии и сегрегации, стабильности твердых растворов и выделений под облучением, радиационного распухания материалов. Важным аспектом является изложение основных теоретических представлений о динамических эффектах: разупорядочение упорядоченных фаз, динамическое «растворение» частиц фазовых выделений с последующим перезарождением выделений.

*В результате изучения дисциплины студент должен:*

**Знать:**

- первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии;
- образование дефектов и их скоплений при радиационном воздействии (облучение нейтронами, ионами, электронами и гамма-квантами);
- радиационно-индуцированные (стимулированные) явления и эффекты;

**уметь:**

- определять возможные фазовые превращения (радиационно-индуцированные, радиационно-модифицированные и радиационно-стимулированные в аустенитных, ферритных и ферритно-мартенситных сталях);
- предсказать изменение микроструктуры, элементного и фазового состава вторых фаз в зависимости от условий облучений конструкционных материалов ядерно-энергетических установок;
- рассчитать число смещений в каскадах согласно моделей Торренса-Робинсона-Норретта и Кинчина-Пиза;
- работать самостоятельно и повышать свой профессиональный уровень;

- реализовывать комплексный подход к решению проблем в области реакторного материаловедения.

**владеть:**

- пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, научно-технической и патентной литературой;

- осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям и проектам;

- организовывать свой собственный труд и взаимодействие с другими исполнителями;

- взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

Программа курса составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Форма получения высшего образования – очная, дневная.

В результате изучения дисциплины студент должен обладать следующими компетенциями.

**Академические компетенции:**

АК-1. Уметь применять базовые научно-технические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой компьютером.

АК-8. Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

**Социально-личностные компетенции:**

СЛК-1. Обладать качествами гражданственности.

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-4. Владеть навыками здорового образа жизни.

**Профессиональные компетенции:**

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ ядерной физики и ядерных технологий, методов измерения величин, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики.

ПК-2. Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации.

ПК-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-12. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиями, проектам и решениям.

Взаимосвязь учебной дисциплины «Структурно-фазовые изменения при облучении» с учебными дисциплинами «Фазовые превращения в металлах», «Физическое материаловедение» и «Радиационные эффекты в твердых телах» состоит в использовании и развитии знаний, изложенных в темах по изучению строения кристаллической решетки реакторных материалов, видов симметрии кристаллов, структурно-фазовых превращений, физических свойств, диаграмм состояния сплавов. Знания, полученные при изучении учебной дисциплины «Структурно-фазовые изменения при облучении» (рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, просвечивающая и растровая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, нейтронография) будут использованы в учебных дисциплинах «Материалы ядерной техники», «Конструкционные материалы ядерных реакторов».

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 126, из них количество аудиторных часов — 52. Аудиторные занятия проводятся в виде лекций 42 ч, УСП 10 ч

Форма получения высшего образования — очная, дневная,

Занятия проводятся на 5-м курсе в 10-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### **1. Введение. Взаимодействие радиационного излучения с твердым телом.**

Виды радиационного воздействия. Схемы элементарных процессов с твердым телом, инициируемые радиационным воздействием.

### **2. Основные закономерности накопления и трансформации элементного состава и дефектной структуры при радиационном воздействии.**

Изменение элементного состава при малых и больших дозах облучения. Генерация и типы радиационных дефектов. Вторичные процессы при образовании дефектов, отжиг радиационных дефектов. Особенности пространственного распределения примеси и дефектов в одно- и многокомпонентных системах.

### **3. Стоки для точечных дефектов в металлах и сплавах.**

Особенности линейных и поверхностных стоков в условиях облучения. Механизмы, контролируемые эффективность захвата дефектов на стоках. Стоки в сплавах: дополнительные эффекты, вызванные наличием растворенных

атомов. Эффективность стоков в отсутствие и в случае образований выделений второй фазы.

#### **4. Теория радиационно-стимулированной сегрегации.**

Возникновение устойчивых потоков дефектов. Взаимодействие потоков атомов примеси с потоками дефектов. Взаимодействие точечных дефектов с растворенными атомами в разбавленных сплавах. Феноменологические уравнения, описывающие сегрегацию. Сегрегация с образованием выделений. Сегрегация в условиях неоднородного дефектообразования. Кинетика радиационно-стимулированного образования выделений вблизи поверхности.

#### **5. Структурно-фазовые изменения при ионном облучении.**

Рост и релаксация внутренних напряжений при радиационном воздействии. Роль радиационных комплексов дефектов в формировании выделений вторых фаз. Ионный синтез. Образование метастабильных соединений. Образование аморфных фаз. Полиморфные превращения при облучении. Генерирующие свойства имплантированных слоев. Формирование заглубленных приповерхностных соединений. Формирование высокодефектных нанокристаллических структур. Радиационно-стимулированная рекристаллизация. Кинетика и особенности структурно-фазовых превращений в современных радиационных технологиях.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ**

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов				Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Введение. Взаимодействие радиационного излучения с твердым телом</b>							
1.1	Виды радиационного воздействия. Схемы элементарных процессов с твердым телом, инициируемые радиационным воздействием.	2					[1, 2, 6, 10]	
<b>2</b>	<b>Основные закономерности накопления и трансформации элементного состава и дефектной структуры при радиационном воздействии</b>							
2.1	Изменение элементного состава при малых и больших дозах облучения.	2					[1-6]	
2.2	Генерация и типы радиационных дефектов. Вторичные процессы при образовании дефектов, отжиг радиационных дефектов.	2					[1-7]	
2.3	Особенности пространственного распределения примеси и дефектов в одно- и многокомпонентных системах.	2				1	[1-7]	Контрольная работа

<b>3</b>	<b>Стоки для точечных дефектов в металлах и сплавах</b>						[1, 2, 6, 10]	
3.1	Особенности линейных и поверхностных стоков в условиях облучения.	2					[1, 2, 6]	
3.2	Механизмы, контролирующие эффективность захвата дефектов на стоках. Стоки в сплавах: дополнительные эффекты, вызванные наличием растворенных атомов.	2				2	[1-5]	Контрольная работа
3.3	Эффективность стоков в отсутствие и в случае образований выделений второй фазы.	2					[1, 2, 6, 10]	
<b>4</b>	<b>Теория радиационно-стимулированной сегрегации</b>							
4.1	Возникновение устойчивых потоков дефектов. Взаимодействие потоков атомов примеси с потоками дефектов.	2					[4, 5, 7]	
4.2	Взаимодействие точечных дефектов с растворенными атомами в разбавленных сплавах.	2					[1, 2, 6, 10]	
4.3	Феноменологические уравнения, описывающие сегрегацию.	2					[4, 5, 7, 9]	
4.4	Сегрегация с образованием выделений. Сегрегация в условиях неоднородного дефектообразования. Кинетика радиационно-стимулированного образования выделений вблизи поверхности.	2				2	[1-6]	Контрольная работа
<b>5</b>	<b>Структурно-фазовые изменения при ионном облучении</b>							
5.1	Рост и релаксация внутренних напряжений при радиационном воздействии.	2					[3, 5]	





## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### Основная

1. Кирсанов, В.В., Суворов, А.Л., Трушин, Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах / В.В. Кирсанов. – М.: Энергоиздат, 1985. – 272 с.
2. Конобеевский, С.Г. Действие облучения на материалы / С.Г. Конобеевский. – М.: Атомиздат, 1967. – 402 с.
3. Зеленский, В.Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов / В.Ф. Зеленский. – Киев: Наукова думка, 1988. – 296 с.
4. Томпсон, Д. Дефекты и радиационные повреждения в металлах / Д. Томпсон. – М.: Мир, 1971. – 367 с.
5. Паршин, А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионностойких сталей и сплавов / А.М. Паршин. – Челябинск: Metallurgy, 2000. – 656 с.
6. Шалаев, А.М. Радиационно-стимулированные процессы в металлах / А.М. Шалаев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
7. Нолфи, Ф.В. Фазовые превращения при облучении / Ф.В. Нолфи. – Челябинск: Metallurgy, 1989. – 312 с.
8. Комаров, Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров. – М.: Metallurgy, 1990. – 216 с.
9. Радиационные эффекты в металлах и сплавах / (Материалы 3-го Всесоюзного совещания, г. Алма-Ата, 30 мая – 1 июня 1983 г.). Алма-Ата: “Наука”, 1985. – 220 с.
10. Анищик В.М., Углов В.В. Модификация инструментальных материалов ионами и плазменными пучками – Мн.: БГУ, 2003. 191 с.

#### Дополнительная

1. Пранявичюс, Л. Модификация свойств твердых тел ионными пучками / Л. Пранявичюс. – Вильнюс: Мокслас, 1980. – 176 с.
2. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел. – М.: Наука, 1983. – 456 с.
3. Аброян, И.А. Физические основы электронной и ионной технологии / И.А. Аброян. – М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.
4. Поут, Дж. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж. Поут. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
5. Кадыржанов, К.К. Физические основы ионных технологий создания стабильных многослойных металлических материалов / К.К. Кадыржанов. – Алма-Ата, 1992. – 232с.
6. Коротаев, А.Д. Модификация структуры и свойств металлических материалов пучками заряженных частиц / А.Д. Коротаев. – Тематический выпуск “Известия ВУЗов. Физика”. Т. 37, №5, 1994.

## **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

1. Контрольные работы по разделам дисциплины.
2. Защита реферативных работ.
3. Устные опросы.

## **Примерный перечень заданий по управляемой самостоятельной работе студентов**

*Контрольные задания по темам:*

1. Особенности пространственного распределения примеси и дефектов в одно- и многокомпонентных системах.
2. Механизмы, контролируемые эффективность захвата дефектов на стоках. Стоки в сплавах: дополнительные эффекты, вызванные наличием растворенных атомов
3. Сегрегация с образованием выделений. Сегрегация в условиях неоднородного дефектообразования. Кинетика радиационно-стимулированного образования выделений вблизи поверхности.
4. Образование метастабильных соединений. Образование аморфных фаз.
5. Кинетика и особенности структурно-фазовых превращений в современных радиационных технологиях.

*Темы реферативных работ:*

1. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в нанокристаллических металлических материалах.
2. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в нанокпозиционных материалах.
3. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в многослойных металлических материалах.
4. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в многослойных керамических материалах.
5. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в карбидных материалах.
6. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в оксидных материалах.
7. Радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в нитридных материалах.
8. Модификация фаз в конструкционных материалах ядерной техники.
9. Эволюция микроструктуры дисперсионно-упрочненных мартенситных сталей.
10. Эволюция микроструктуры дисперсионно-упрочненных ферритных сталей.
11. Механизмы эволюции выделений вторых фаз при облучении.
12. Стадии трансформации карбидных и оксидных выделений в процессе облучения.

## **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать контрольные работы по разделам дисциплины, защиту реферативных работ, устные опросы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Контрольная работа проводится в письменной форме. Каждое из заданий включает в себя два вопроса по соответствующим тематическим разделам, а также может включать задачи. На выполнение работы отводится 45 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка результатов контрольной работы проводится по десятибалльной шкале.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждое из письменных тестирований и оценки за защиту реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,4; для экзаменационной оценки — 0,6.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Фазовые превращения в металлах	Кафедра физики твердого тела		Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № <u>10</u> от <u>16 . 05 .2017</u>
Радиационные эффекты в твердых телах	Кафедра физики твердого тела		Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № <u>10</u> от <u>16 . 05 .2017</u>
Физическое материаловедение	Кафедра физики твердого тела		Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № <u>10</u> от <u>16 . 05 .2017</u>

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№ № пп	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Заведующий кафедрой  
физики твердого тела  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ В.В. Углов

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ В.М. Анищик