

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям  
О.Н. Здрок  
«30» июня 2021 г.  
Регистрационный № 9801/уч.



**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности**

**1-31 04 06 Ядерные физика и технологии**

Минск 2021

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 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, профессор, доктор физико-математических наук.

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

**С.А. Максименко** — директор НИУ "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики твердого тела  
физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 12 от 12.05.2021);

Советом физического факультета  
(протокол № 11 от 24.06.2021)

Заведующий кафедрой



В.В.Углов

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины "Радиационные эффекты в твердых телах" разработана для специальности 1-31 04 06 Ядерные физика и технологии в соответствии с требованиями образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 06-2013 специальности 1-31 04 06 Ядерные физика и технологии, введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 №88.

### **Цель и задачи учебной дисциплины**

**Цель** учебной дисциплины – ознакомить студентов с основами учения о физике радиационных повреждений твердых тел, которая является основным разделом радиационной физики твердого тела. Основная цель курса заключается в изложении современных представлений об основных процессах взаимодействия заряженных частиц и ионизирующих излучений с веществом, кинетике и динамике структурных и фазовых превращениях, непосредственно связанных с проявлением физико-химических свойств материалов под воздействием потоков частиц и излучений высоких энергий. В учебном курсе изложены современные представления о физике радиационно-индуцированных и радиационно-стимулированных явлений и эффектов в твердых телах, возникающих под воздействием различных видов высокоэнергетических частиц (нейтроны, ионы, электроны) и излучения ( $\gamma$ -кванты). Особое внимание уделяется описанию физических основ первичных процессов в твердых телах и образования в них радиационных дефектов и их скоплений при радиационном воздействии. Рассмотрено практическое применение радиационных явлений и эффектов при проектировании материалов для реакторов, модифицировании материалов и создании новых структур и др.

**Задачами** учебной дисциплины являются:

- изучение взаимосвязи радиационного дефектообразования в твердых телах при облучении;
- формирование у студентов целостных знаний о радиационных процессах, явлениях и эффектах в облучаемых материалах;
- изучение особенностей и закономерностей радиационных эффектов.

Важной задачей является формирование у студентов навыков самостоятельной исследовательской работы, умения применять полученные научные результаты при создании новых и совершенствовании имеющихся материалов.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализаций компонента учреждения высшего образования.

**Связи** с другими учебными дисциплинами: дисциплина необходима для использования и развития знаний, изложенных в темах по изучению строения кристаллической решетки кристаллов и формирования фаз, термодинамических свойств материалов реакторных материалов, видов симметрии кристаллов, структурно-фазовых превращений, физических свойств, диаграмм состояния сплавов изложенных в дисциплинах «Кристаллография и дефекты в кристаллах», «Конструкционные материалы ядерных реакторов», «Физическое материаловедение».

В результате изучения дисциплины студенты должны:

**знать:**

- первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии;
- радиационно-индуцированные явления и эффекты;

**уметь:**

- предсказывать изменения элементного состава вторых фаз в зависимости от условий облучения и формируемых радиационных дефектов различной размерности конструкционных материалов ядерной техники;
- определять возможные радиационно-стимулированные изменения в аустенитных, ферритных и аустенитно-ферритных сталях;

**владеть:**

- базовыми принципами прогнозирования свойств конструкционных материалов ядерной техники, исходя из данных об условиях их эксплуатации;
- понятийным и математическим аппаратом радиационной физики твердого тела.

### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Радиационные эффекты в твердых телах» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций.

**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-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

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, ядерно-физических методов исследования, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики.

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

**Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 7 семестре дневной формы получения высшего образования. Всего на изучение учебной дисциплины «Радиационные эффекты в твердых телах» отведено 90 часа, в том числе 42 аудиторных часов, из них: лекции – 34 часа, управляемая самостоятельная работа (УСР) – 8 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 2,5 зачетные единицы.

Форма итоговой аттестации – экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### **Раздел 1. Первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии.**

**Тема 1.1.** Физические основы процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Флюенс. Атомные потенциалы взаимодействия. Смещения атомов из узлов кристаллической решетки.

**Тема 1.2.** Характеристика степени радиационных повреждений. Облучение нейтронами. Облучение ионами. Облучение электронами. Облучения гамма-квантами. Соответствие радиационных процессов и явлений при различных видах облучений.

### **Раздел 2. Образование дефектов и их скоплений при радиационном воздействии.**

**Тема 2.1.** Простейшие типы повреждений и их эволюция. Модель Кинчена-Пизе. Модификация моделей Кинчена-Пизе. Модель Линдхарда. ТРН-стандарт.

**Тема 2.2.** Фокусировка и каналирование пучков частиц в кристалле. Особенности каскада столкновений при облучении различного типа. Кластеры. Взаимодействие дефектов. Отжиг радиационных дефектов. Зарождение и рост дислокационных петель.

### **Раздел 3. Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные процессы и явления в твердых телах.**

**Тема 3.1.** Диффузия и перераспределение атомов. Сегрегация, рафинирование и гетерирование примесей. Механизмы сегрегации. Влияние стоков на сегрегацию. Сегрегация в аустенитных и ферритных сталях.

**Тема 3.2.** Фазовые превращения. Фазовые превращения в аустенитных, ферритных и дисперсионно-упрочненных сталях. Механизмы эволюции в выделении вторых фаз.

**Тема 3.3.** Распухание и порообразование. Распухание в уране. Зависимость распухания от дозы. Распухание в металлах и сплавах. Зависимость распухания от температуры облучения.

Зависимость распухания от температуры облучения. Зависимость распухания от скорости повреждения.

**Тема 3.4.** Влияние структуры первичных радиационных повреждений на распухание материалов. Влияние кристаллического состояния металлов на порообразование. Роль дислокационной структуры.

Влияние напряжений на распухание материалов. Роль нестационарных полей температуры и радиации на развитие пористости.

**Тема 3.5.** Форма и упорядочение пор. Способы уменьшения распухания.

**Тема 3.6.** Радиационный рост.

**Тема 3.7.** Блистеринг и флекинг. Природа образования блистеров. Основные закономерности радиационного блистеринга.

**Тема 3.8.** Распыление поверхности материалов при ионном облучении. Физическое распыление. Химическое распыление.

**Тема 3.9.** Трекообразование. Механизмы трекообразования. Трекообразование в металлах и полупроводниках.

**Тема 3.10.** Эффект дальнего действия в металлах. Механизмы дальнего действия.

Напряжения и деформация. Статические и динамические напряжения. Остаточные напряжения.

**Тема 3.11.** Радиационное упрочнение и охрупчивание. Влияние Флюенса и температуры бомбардирующих частиц на степень радиационного упрочнения. Влияние энергии бомбардирующих частиц на степень упрочнения металлов. Влияние температуры облучения на степень упрочнения металлов.

**Тема 3.12.** Низкотемпературное радиационное охрупчивание. Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). Механизмы ВТРО. Зависимость ВТРО от условий облучения. Способы уменьшения ВТРО.

**Тема 3.13.** Радиационная ползучесть. Электролизация. Трансмутация.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

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>Первичные процессы в твердых телах при радиационном воздействии</b>							
1.1	Физические основы процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Флюенс. Атомные потенциалы взаимодействия. Смещения атомов из узлов кристаллической решетки.	2					[1-4]	Устный опрос, дискуссия
1.2.	Характеристика степени радиационных повреждений. Облучение нейтронами. Облучение ионами. Облучение электронами. Облучения гамма-квантами. Соответствие радиационных процессов и явлений при различных видах облучений.	2					[1-4]	Устный опрос, дискуссия
<b>2</b>	<b>Образование дефектов и их скоплений при радиационном воздействии.</b>						[1-4]	
2.1	Простейшие типы повреждений и их эволюция. Модель Кинчена-Пизе. Модификация моделей Кинчена-Пизе. Модель Линдхарда. ТРН-стандарт.	2					[1-4]	Устный опрос, дискуссия

2.2	Фокусировка и каналирование пучков частиц в кристалле. Особенности каскада столкновений при облучении различного типа. Кластеры. Взаимодействие дефектов. Отжиг радиационных дефектов. Зарождение и рост дислокационных петель.	2				2	[1-4]	Устный опрос, дискуссия Контрольная работа по разделу 2
<b>3.</b>	<b>Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные процессы и явления в твердых телах</b>						[1-4]	
3.1	Диффузия и перераспределение атомов. Сегрегация, рафинирование и гетерирование примесей. Механизмы сегрегации. Влияние стоков на сегрегацию. Сегрегация в аустенитных и ферритных сталях.	2					[1-5]	Устный опрос, дискуссия
3.2	Фазовые превращения. Фазовые прквращения в аустенитных, ферритных и дисперсионно-упрочненных сталях. Механизмы эволюции в выделении вторых фаз.	2					[1-5]	Устный опрос, дискуссия
3.3	Распухание и порообразование. Распухание в уране. Зависимость распухания от дозы. Распухание в металлах и сплавах. Зависимость распухания от температуры облучения. Зависимость распухания от температуры облучения. Зависимость распухания от скорости повреждения.	2					[1] [3], [12][5]	Устный опрос, дискуссия
3.4	Влияние структуры первичных радиационных повреждений на распухание материалов. Влияние кристаллического состояния металлов на порообразование. Роль дислокационной структуры. Влияние напряжений на распухание материалов. Роль нестационарных полей температуры и радиации на развитие пористости.	2					[1] [3] [7]	Устный опрос, дискуссия
3.5	Форма и упорядочение пор. Способы уменьшения	2					[1] [5]	Устный

	распухания.						[7] [12]	опрос, дискуссия
3.6	Радиационный рост.	2					[1-4]	
3.7	Блистеринг и флекинг. Природа образования блистеров. Основные закономерности радиационного блистеринга.	2				2	[1-4]	Устный опрос, дискуссия Реферат
3.8	Распыление поверхности материалов при ионном облучении. Физическое распыление. Химическое распыление.	2					[1-4]	Устный опрос, дискуссия
3.9	Трекообразование. Механизмы трекообразования. Трекообразование в металлах и полупроводниках.	2					[1-4]	Устный опрос, дискуссия
3.10	Эффект дальнего действия в металлах. Механизмы дальнего действия. Напряжения и деформация. Статические и динамические напряжения. Остаточные напряжения.	2					[1-3] [7]	Устный опрос, дискуссия
3.11	Радиационное упрочнение и охрупчивание. Влияние Флюенса и температуры бомбардирующих частиц на степень радиационного упрочнения. Влияние энергии бомбардирующих частиц на степень упрочнения металлов. Влияние температуры облучения на степень упрочнения металлов.	2					[2] [3] [5]	Устный опрос, дискуссия
3.12	Низкотемпературное радиационное охрупчивание. Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). Механизмы ВТРО. Зависимость ВТРО от условий облучения. Способы уменьшения ВТРО.	2				2	[2] [3] [5]	Устный опрос, дискуссия Реферат
3.13	Радиационная ползучесть. Электролизация. Трансмутация	2				2	[1-6]	Устный опрос, дискуссия Контроль на я работа по

								разделу 3
	Всего Форма текущей аттестации	34				8		Экзамен

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *Рекомендуемая литература*

#### **Основная**

1. В.В.Углов. Радиационные процессы и явления в твердых телах.- Минск:Вышэйшая школа, 2016.-188 с.
2. В.В.Углов. Радиационные эффекты в твердых телах.- Минск: БГУ, 2011.-207 с.
3. А.М. Шалаев, А.А. Адаменко. Радиационно-стимулированное изменение электронной структуры / М., 1977. 176 с.
4. В.В. Кирсанов, А.Л. Суворов, Ю.В. Трушин. Процессы радиационного дефектообразования в металле / М., 1985. 272 с.
5. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. Радиационные дефекты и набухание металлов / Киев, 1988. 296 с.
6. Ф. Нолфи. Фазовые превращения при облучении / Челябинск, 1989. 312 с.
7. А.П. Достанко, М.Н. Босяков, С.А. Кухарев. Модификация поверхности твердых тел в неравновесной газоразрядной плазме / Мн., 1996. 95 с.
8. А.Н. Диденко, Ю.П. Шаркеев, Э.В. Козлов, А.И. Рябчиков. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах / Томск, 2004. 328 с.
9. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / Киев, 2006. 376 с.
10. В.В. Углов, Н.Т. Квасов, И.В. Сафронов, Г.Е. Ремнев, С.В. Злоцкий. Радиационная стойкость наноструктурированных материалов. Томск: Изд-во НТЛ, 2018. – 172 с.
11. Радиационное материаловедение: пособие/В.В.Углов-Минск:БГУ, 2019.-99 с.

#### **Дополнительная**

12. И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. Физические основы электронной и ионной технологии: Учебное пособие / М., 1984. 320 с.
13. А.П. Домкус, Л. Пранявичус. Механические напряжения в имплантированных твердых телах / Вильнюс, 1990. 158 с.
14. П.Г. Черемской, В.В. Следов, В.И. Бетехтин. Поры в твердом теле / М, 1990. 376 с.
15. А.В. Белый, В.А. Кукареко, О.В. Лободаева, И.И. Таран, С.К. Ших. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / Мн., 1998. 220 с.

### **Перечень используемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать устный опрос, контрольные работы, защита рефератов.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Радиационные эффекты в твердых телах» учебным планом предусмотрен экзамен.

При формировании оценки текущей успеваемости студента используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения.

Текущий контроль знаний по дисциплине проводится во время лекций и по итогам управляемой самостоятельной работы.

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать контрольные работы по отдельным разделам дисциплины. Оценка результатов контрольных работ проводится в десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости ( $T$ ) по дисциплине в семестре является средневзвешенной оценкой двух контрольных работ и оценки по реферату, включая итоговую:

$$T = (K_1 + K_2 + P) / 3.$$

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. На выполнение каждой контрольной работы отводится 45 мин. 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.

К сдаче экзамена допускаются студенты, выполнившие контрольные работы на удовлетворительные оценки.

Рейтинговая оценка ( $T_p$ ) по дисциплине рассчитывается на основе оценки

Текущей успеваемости и экзаменационной оценки ( $T_э$ ) с учетом их весовых коэффициентов:

$$T_p = 0,8 \cdot T_э + 0,2 \cdot T$$

### **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

В рамках управляемой самостоятельной работы студент выполняет контрольные работы по разделу 2. Образование дефектов и их скоплений при радиационном воздействии, разделу 3. Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные процессы и явления в твердых телах учебной дисциплины. Контрольные работы проводятся в письменном виде и включают 5-10 вопросов. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа могут использоваться калькуляторы и справочные пособия.

### **Примерный перечень вопросов контрольной работы:**

- простейшие типы повреждений и их эволюция;
- образование дефектов и их скоплений при радиационном воздействии;
- особенности каскада столкновений при облучении различного типа;
- кластеры;
- фазовые превращения;
- набухание и порообразование;
- форма и упорядочение пор;
- блистеринг и флекинг;
- трекообразование;
- радиационное упрочнение и охрупчивание;
- радиационная ползучесть.

В рамках управляемой самостоятельной работы студент также защищает рефераты по теме 3.7. Блистеринг и флекинг. Природа образования блистеров. Основные закономерности радиационного блистеринга, тема 3.12. Низкотемпературное радиационное охрупчивание. Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). Механизмы ВТРО. Зависимость ВТРО от условий облучения. Способы уменьшения ВТРО.

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса *используются методы и приемы развития критического мышления*, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией; понимании информации как отправного, а не конечного пункта критического мышления. Формой реализации метода может выступать подготовка устных сообщений по вопросам, связанным с экспериментальными методами исследования физических свойств кристаллов и их связью с

симметрией структуры, теоретическое рассмотрение которых проходит в процессе лекционных занятий.

При организации образовательного процесса используется *метод учебной дискуссии*, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной проблеме. Реализацию метода рекомендуется осуществлять во время представления кратких сообщений студентов, организовав дискуссию обучающихся, а также в ходе самих лекций. Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

Основными направлениями самостоятельной работы студента являются:

- подробное ознакомление с программой учебной дисциплины;
- ознакомление со списком рекомендуемой литературы по дисциплине в целом и ее разделам;
- изучение и расширение лекционного материала преподавателя за счет специальной литературы, в частности, современных научных публикаций по изучаемым тематикам;
- подготовка к контрольным работам;
- подготовка к экзамену.

### **Рекомендуемые темы реферативных работ**

1. Радиационно-индуцированные процессы и явления в ферритных сталях.
2. Радиационно-индуцированные процессы и явления в аустенитных сталях.
3. Радиационно-индуцированные процессы и явления в ферритно-мартенситных сталях.
4. Радиационно-индуцированные процессы и явления в дисперсионно-упрочненных сталях.
5. Радиационно-индуцированные процессы и явления в циркониевых сплавах.
6. Радиационно-индуцированные процессы и явления в цирколловых сплавах.
7. Радиационно-индуцированные процессы и явления в нитридных системах.

8. Радиационно-индуцированные процессы и явления в карбитных системах.
9. Радиационно-индуцированные процессы и явления в оксидных системах.

### **Примерный перечень вопросов к экзамену**

1. Физические основы процессов взаимодействия частиц и излучений с веществом.
2. Диффузия и перераспределение атомов
3. Облучение нейтронами
4. Сегрегация, рафинирование и гетерирование
5. Облучение ионами
6. Фазовые превращения
7. Облучение электронами
8. Распухание и порообразование
9. Облучение  $\gamma$ -квантами
10. Блистеринг и флекинг
11. Соответствие радиационных процессов и явлений при различных видах облучения.
12. Распыление.
13. Простейшие типы повреждений и их эволюций.
14. Трекообразование.
15. Конфигурации междоузельных и вакансионных комплексов.
16. Каналирование и блокировка.
17. Взаимодействие дефектов.
18. Дальнодействие.
19. Зарождение и рост дислокационных петель.
20. Напряжения и деформация.
21. Реакции между подвижными и неподвижным дефектом.
22. Упрочнение и охрупчивание.
23. Физические основы процессов взаимодействия частиц и излучений с веществом.
24. Диффузия и перераспределение атомов.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

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	нет	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 12 от 12.05.2021 г.)
Конструкционные материалы ядерных реакторов	Кафедра физики твердого тела	нет	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 12 от 12.05.2021 г.)

**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 \_\_\_\_\_ 202\_ г.)

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

\_\_\_\_\_ В.В.Углов

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

\_\_\_\_\_ М.С.Тиванов