

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/08/24-573.1

от 30.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и технологии

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/ В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экз./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|--|-----------|-----------|--|
| 7       | 4                      | 144                        | 32           | 0                         | 32                       |  | 26        | 0         | Э  |
| Итого   | 4                      | 144                        | 32           | 0                         | 32                       | 16                                       | 26        | 0         |  |

## АННОТАЦИЯ

Приобретение знаний по основным методам определения количественных и качественных характеристик полей ионизирующего излучения в веществе и соответствующих величин энергопоглощения, определяющих последствия воздействия ионизирующего излучения на объекты живой и неживой природы;

получение базовой информации о задачах и методах определения характеристик величин энергопоглощения ионизирующего излучения в веществе с учетом количества и качества излучения;

понимание функциональных особенностей и использования основных типов дозиметров для измерения дозиметрических величин;

получение практических навыков в применении методов дозиметрии для решения практических задач.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения учебной дисциплины являются:

- приобретение знаний по основным методам определения количественных и качественных характеристик полей ионизирующего излучения в веществе и соответствующих величин энергопоглощения, определяющих последствия воздействия ионизирующего излучения на объекты живой и неживой природы;

- получение базовой информации о задачах и методах определения характеристик величин энергопоглощения ионизирующего излучения в веществе с учетом количества и качества излучения;

- понимание функциональных особенностей и использования основных типов дозиметров для измерения дозиметрических величин;

- получение практических навыков в применении методов дозиметрии для решения практических задач.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Освоение данной дисциплины базируется на изучении студентом дисциплин циклов : Математика, Физика, курсов цикла специальных дисциплин: Ядерная физика, Экспериментальные методы ядерной физики, Введение в теорию переноса ионизирующих излучений.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|--|
|--------------------------------|--|

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| <b>Задача профессиональной деятельности (ЗПД)</b>  | <b>Объект или область знания</b>   | <b>Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)</b>   | <b>Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции</b>   |
|--|--|--|--|
| <b>научно-исследовательский</b>  |  |  |  |
| Исследования перспективных типов ядерных энергетических установок, теплофизические исследования перспективных твэлов, топлива, конструкционных материалов и теплоносителей. Разработка моделей и программных комплексов для расчета теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в активных зонах перспективных ядерных реакторов. Создание и применение установок и систем для проведения теплофизических, ядерно-физических исследований, неравновесных физических процессов | Ядерные реакторы, энергетические установки, теплогидравлические и нейтронно-физические процессы в активных зонах ядерных реакторов, тепловые измерения и контроль, теплоносители, материалы ядерных реакторов, ядерный топливный цикл, системы обеспечения безопасности, системы управления ядерно-физическими установками, программные комплексы для исследования явлений и закономерностей в области теплофизики и энергетики, ядерных реакторов | ПК-3 [1] - Способен проводить физические эксперименты по заданной методике, составлять описания проводимых исследований, отчеты по анализу результатов и подготовке научных публикаций<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 24.078 | З-ПК-3[1] - знать основные физические законы и методы обработки данных ;<br>У-ПК-3[1] - уметь работать по заданной методике, составлять описания проводимых исследований и отчеты, подготавливать материалы для научных публикаций;<br>В-ПК-3[1] - владеть навыками проведения физических экспериментов по заданной методике, основами компьютерных и информационных технологий, научной терминологией |

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

| Направления/цели воспитания | Задачи воспитания (код)  | Воспитательный потенциал дисциплин  |
|-----------------------------|--|---|
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры ядерной безопасности (В24) | 1.Использование воспитательного потенциала блока профессиональных дисциплин для формирования чувства личной ответственности за соблюдение ядерной и радиационной безопасности, а также соблюдение государственных и |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  | <p>коммерческих тайн. 2.Использование воспитательного потенциала содержания учебных дисциплин «Актуальные проблемы эксплуатации АЭС», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике», «Системы радиационного контроля» для формирования личной ответственности за соблюдение экологической и радиационной безопасности посредством изучения основополагающих документов по культуре ядерной безопасности, разработанных МАГАТЭ и российскими регулирующими органами, норм и правил обращения с радиоактивными отходами и ядерными материалами. 3.Использование воспитательного потенциала учебных дисциплин «Контроль и диагностика ядерных энергетических установок», «Надежность оборудования атомных реакторов и управление риском», «Безопасность ядерного топливного цикла», «Ядерные технологии и экология топливного цикла» для формирования личной ответственности за соблюдение и обеспечение кибербезопасности и информационной безопасности объектов атомной отрасли через изучение вопросов организации информационной безопасности на объектах атомной отрасли, основных принципов построения системы АСУТП ядерных объектов, методов защиты и хранения информации, принципов построения глубокоэшелонированной и гибкой системы безопасности ядерно-физических объектов. 4.Использование воспитательного потенциала содержания блока дисциплин «Экология», «Системы радиационного контроля», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике» для формирования ответственной экологической позиции посредством изучения вопросов обеспечения такого уровня безопасности АЭС, при котором воздействие на окружающую среду, обеспечивает сохранение природных систем, поддержание их целостности и</p> |
|--|--|--|

|                             |  |   |
|-----------------------------|--|---|
|                             |  | жизнеобеспечивающих функций, через рассмотрение вопросов радиационного контроля при захоронении и переработки ядерных отходов, вопросов замыкания ядерного топливного цикла.  |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за обеспечение кибербезопасности объектов атомной отрасли (В25) | <p>1.Использование воспитательного потенциала блока профессиональных дисциплин для формирования чувства личной ответственности за соблюдение ядерной и радиационной безопасности, а также соблюдение государственных и коммерческих тайн. 2.Использование воспитательного потенциала содержания учебных дисциплин «Актуальные проблемы эксплуатации АЭС», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике», «Системы радиационного контроля» для формирования личной ответственности за соблюдение экологической и радиационной безопасности посредством изучения основополагающих документов по культуре ядерной безопасности, разработанных МАГАТЭ и российскими регулирующими органами, норм и правил обращения с радиоактивными отходами и ядерными материалами. 3.Использование воспитательного потенциала учебных дисциплин «Контроль и диагностика ядерных энергетических установок», «Надежность оборудования атомных реакторов и управление риском», «Безопасность ядерного топливного цикла», «Ядерные технологии и экология топливного цикла» для формирования личной ответственности за соблюдение и обеспечение кибербезопасности и информационной безопасности объектов атомной отрасли через изучение вопросов организации информационной безопасности на объектах атомной отрасли, основных принципов построения системы АСУТП ядерных объектов, методов защиты и хранения информации, принципов построения глубокоэшелонированной и гибкой системы безопасности ядерно-физических объектов.</p> <p>4.Использование воспитательного потенциала содержания блока</p> |

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
|                             |  | дисциплин «Экология», «Системы радиационного контроля», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике» для формирования ответственной экологической позиции посредством изучения вопросов обеспечения такого уровня безопасности АЭС, при котором воздействие на окружающую среду, обеспечивает сохранение природных систем, поддержание их целостности и жизнеобеспечивающих функций, через рассмотрение вопросов радиационного контроля при захоронении и переработки ядерных отходов, вопросов замыкания ядерного топливного цикла.   |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственной экологической позиции (B26) | 1.Использование воспитательного потенциала блока профессиональных дисциплин для формирования чувства личной ответственности за соблюдение ядерной и радиационной безопасности, а также соблюдение государственных и коммерческих тайн. 2.Использование воспитательного потенциала содержания учебных дисциплин «Актуальные проблемы эксплуатации АЭС», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике», «Системы радиационного контроля» для формирования личной ответственности за соблюдение экологической и радиационной безопасности посредством изучения основополагающих документов по культуре ядерной безопасности, разработанных МАГАТЭ и российскими регулирующими органами, норм и правил обращения с радиоактивными отходами и ядерными материалами. 3.Использование воспитательного потенциала учебных дисциплин «Контроль и диагностика ядерных энергетических установок», «Надежность оборудования атомных реакторов и управление риском», «Безопасность ядерного топливного цикла», «Ядерные технологии и экология топливного цикла» для формирования личной ответственности за соблюдение и обеспечение кибербезопасности и информационной безопасности объектов атомной отрасли |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | <p>через изучение вопросов организации информационной безопасности на объектах атомной отрасли, основных принципов построения системы АСУТП ядерных объектов, методов защиты и хранения информации, принципов построения глубокоэшелонированной и гибкой системы безопасности ядерно-физических объектов.</p> <p>4.Использование воспитательного потенциала содержания блока дисциплин «Экология», «Системы радиационного контроля», «Основы экологической безопасности в ядерной энергетике» для формирования ответственной экологической позиции посредством изучения вопросов обеспечения такого уровня безопасности АЭС, при котором воздействие на окружающую среду, обеспечивает сохранение природных систем, поддержание их целостности и жизнеобеспечивающих функций, через рассмотрение вопросов радиационного контроля при захоронении и переработки ядерных отходов, вопросов замыкания ядерного топливного цикла.</p> |
|--|--|---|

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| № п.п | Наименование раздела учебной дисциплины | Недели | Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час. | Обязат. текущий контроль (форма*, неделя) | Максимальный балл за раздел** | Аттестация раздела (форма*, неделя) | Индикаторы освоения компетенции |
|-------|---|--------|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
|       | <i>7 Семестр</i>                        |        |   |   |                               |                                     |                                 |
| 1     | Часть 1                                 | 1-8    | 16/0/16   |   | 25                            | КИ-8                                | З-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3    |
| 2     | Часть 2                                 | 9-16   | 16/0/16   |   | 25                            | КИ-16                               | З-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3    |
|       | <i>Итого за 7 Семестр</i>               |        | 32/0/32   |   | 50                            |                                     |                                 |
|       | <b>Контрольные</b>                      |        |   |   | 50                            | Э                                   | З-ПК-3,                         |

|  |                                     |  |  |  |  |  |                   |
|--|-------------------------------------|--|--|--|--|--|-------------------|
|  | <b>мероприятия за 7<br/>Семестр</b> |  |  |  |  |  | У-ПК-3,<br>В-ПК-3 |
|--|-------------------------------------|--|--|--|--|--|-------------------|

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование |
|-------------|---------------------|
| КИ          | Контроль по итогам  |
| Э           | Экзамен             |

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание  | Лек.,<br>час.               | Пр./сем.,<br>час. | Лаб.,<br>час. |
|------------|--|-----------------------------|-------------------|---------------|
|            | <i>7 Семестр</i>   | 32                          | 0                 | 32            |
| <b>1-8</b> | <b>Часть 1</b>   | 16                          | 0                 | 16            |
| 1          | <b>Поля ионизирующего излучения.</b><br>Характеристики полей ионизирующего излучения.<br>Дозиметрические величины. Основные задачи дозиметрии.   | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 2          | <b>Взаимодействие фотонного излучения с веществом</b><br>Процессы преобразования энергии фотонного излучения в веществе. Теория Брэгга-Грея. Энергетическая зависимость чувствительности дозиметров фотонного излучения. | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 3          | <b>Ионизационные дозиметрические детекторы.</b><br>Ионизационные камеры в полях непрерывного и импульсного излучения. Конденсаторные камеры, газоразрядные счетчики, полостные ионизационные камеры.                     | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 4          | <b>Дозиметрия тормозного излучения.</b><br>Толстостенные ионизационные камеры, квантометр.   | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 5          | <b>Сцинтилляционный метод дозиметрии фотонного излучения.</b><br>Энергетическая зависимость чувствительности сцинтилляционного дозиметра в токовом и счетном режиме.   | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 6          | <b>Фотохимическое действие излучений.</b><br>Основные характеристики фотографического и химического методов дозиметрии.  | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |
| 7          | <b>Люминисцентные методы дозиметрии.</b><br>Механизмы радиофотолюминесценции и радиотермолюминесценции. Кинетика радиотермолюминесценции.  | Всего аудиторных часов<br>2 | 0                 | 2             |
|            |  | Онлайн                      | 0                 | 0             |



|      |  |                        |   |    |
|------|--|------------------------|---|----|
| 8    | <b>Полупроводниковые детекторы.</b><br>Полупроводниковые детекторы как дозиметры ионизирующего излучения. Основные характеристики примесных полупроводников.     | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 9-16 | <b>Часть 2</b>   | 16                     | 0 | 16 |
| 9    | <b>Дозиметрия заряженных частиц.</b><br>Экспериментальные и расчетные методы дозиметрии электронного излучения.  | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 10   | <b>Дозиметрия нейтронов.</b><br>Применение различных методов регистрации нейтронов для определения дозы нейтронного излучения.                                   | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 11   | <b>Дозиметрия больших доз.</b><br>Методы измерения доз в полях высоких потоков излучения.  | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 12   | <b>Тепловое действие ионизирующего излучения.</b><br>Тепловое действие ионизирующего излучения. Калориметрический метод дозиметрии. Режимы работы калориметров.  | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 13   | <b>ЛПЭ-спектры и радиационные эффекты.</b><br>Ионизационно-импульсная методика измерения ЛПЭ-спектров. Неравномерная ионизация и рекомбинационный метод.         | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 14   | <b>Основные задачи микродозиметрии.</b><br>Основные задачи микродозиметрии. Флуктуации поглощенной энергии. Микродозиметрические величины и методы их получения. | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 15   | <b>Дозиметрия инкорпорированных радионуклидов.</b><br>Дозиметрия инкорпорированных радионуклидов. Кинетика формирования дозы.                                    | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |
| 16   | <b>Заключительный обзор</b><br>Заключительный обзор  | Всего аудиторных часов |   |    |
|      |  | 2                      | 0 | 2  |
|      |  | Онлайн                 |   |    |
|      |  | 0                      | 0 | 0  |

Сокращенные наименования онлайн опций:

| Обозначение | Полное наименование              |
|-------------|----------------------------------|
| ЭК          | Электронный курс                 |
| ПМ          | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ          | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ          | Видео-материалы                  |
| АМ          | Аудио-материалы                  |
| Прз         | Презентации                      |
| Т           | Тесты                            |
| ЭСМ         | Электронные справочные материалы |
| ИС          | Интерактивный сайт               |

## ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

| Недели  | Темы занятий / Содержание   |
|---------|---|
|         | <i>7 Семестр</i>  |
| 1       | Дозиметрические величины и их единицы.  |
| 2       | Физические основы дозиметрии.   |
| 3 - 4   | Определение энергетического распределения бета-частиц и поглощенной дозы бета-излучения.      |
| 5       | Физические процессы в ионизационных камерах.  |
| 6       | Ионизационный метод дозиметрии.   |
| 7 - 8   | Исследование дозиметрических характеристик ионизационных камер.                               |
| 9       | Сцинтилляционный и люминесцентный методы дозиметрии.  |
| 10      | Дозиметрия аэрозолей и газов.   |
| 11 - 12 | Энергетическая зависимость чувствительности газоразрядных счетчиков в дозиметрическом режиме. |
| 13      | ЛПЭ-метрия и микродозиметрия  |
| 14      | Измерение дозы нейтронов различных энергий.   |
| 15      | Фотографический и химический методы дозиметрии.   |
| 16      | Абсолютное измерение мощности дозы рентгеновского излучения.                                  |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Освоение дисциплины проходит в основном по следующей схеме: лекции, семинарские занятия с отчетом о решенных задачах, лабораторные работы с последующей защитой для закрепления темы, промежуточный контроль знаний, решение задач по ряду тем курса, итоговый экзамен.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ПК-3        | З-ПК-3              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | У-ПК-3              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | В-ПК-3              | Э, КИ-8, КИ-16                    |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-х балльной шкале | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины   |
|--------------|------------------------------|-------------|---|
| 90-100       | 5 – «отлично»                | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.                                     |
| 85-89        | 4 – «хорошо»                 | B           | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.   |
| 75-84        |                              | C           |   |
| 70-74        |                              | D           |   |
| 65-69        | 3 – «удовлетворительно»      | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.  |
| 60-64        |                              |             |   |
| Ниже 60      | 2 – «неудовлетворительно»    | F           | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.1 К49 Дозиметрия ионизирующих излучений : учебное пособие, Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В., Климанов В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
2. 539.1 С50 Моделирование процесса переноса электронов в задачах радиационной физики : учебное пособие для вузов, Смирнов В.В., Москва: МИФИ, 2008
3. ЭИ К49 Радиационная дозиметрия : монография, Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В., Климанов В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
4. 539.1 К49 Радиационная дозиметрия : монография, Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В., Климанов В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2014

5. ЭИ С23 Сборник задач по теории переноса, дозиметрии и защите от ионизирующих излучений : учебное пособие для вузов, Панин М.П. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
6. 539.1 С 14 Ядерная физика и дозиметрия : учеб. пособие для вузов, Сазонов А.Б., Богородская М.А., Москва: Юрайт, 2020

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

В курсе рассматриваются основные фундаментальные принципы и методы дозиметрии ионизирующих излучений на основании особенностей взаимодействия различных видов ионизирующих излучений с веществом. Цель преподавания данной дисциплины состоит в изложении основных методов определения количественных и качественных характеристик полей ионизирующего излучения в веществе и соответствующих величин энергопоглощения, определяющих последствия воздействия ионизирующего излучения на объекты живой и неживой природы.

Основными задачами освоения дисциплины являются:

- получение базовой информации о задачах и методах определения характеристик величин энергопоглощения ионизирующего излучения в веществе с учетом количества и качества излучения;
- понимание функциональных особенностей и использования основных типов дозиметров для измерения дозиметрических величин;
- получение практических навыков в применении методов дозиметрии для решения прикладных задач.

Эти задачи реализуются на основе знаний:

- физических явлений взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, определяющих процессы переноса излучений, энергопоглощения и формирования дозных полей;
- специфики характеристик величин доз и распределений доз (поглощенная доза, эквивалентная и амбиентная доза, экспозиционная доза, распределение доз по ЛПЭ, микродозиметрические величины);

- основных методов расчета и измерения дозных распределений в веществе для различных видов излучения;
- особенностей характеристик дозиметров и области их применимости для решения практических задач.

## 11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Введение в раздел радиационной физики - дозиметрию. Основные задачи дозиметрии.

Целью одного из разделов радиационной физики – дозиметрии – является разработка теоретических и экспериментальных, применимых на практике, методов количественной оценки воздействия различных видов ионизирующих излучений на объекты живой и неживой природы. Рассматриваются диапазоны энергий излучений, способных инициировать эффекты ионизации в облучаемом веществе; соответствующие величины (энергопоглощение и другие т.н. дозиметрические величины) определяют различные радиационные эффекты. Установление связи этих эффектов с дозиметрическими величинами является основной задачей дозиметрии. Области дозиметрических исследований достаточно разнообразны, в частности можно отметить следующие:

1. Дозиметрия альфа-, бета-, гамма-квантов и нейтронов с энергией до 10 МэВ. 2. Дозиметрия инкорпорированных нуклидов. 3. Индивидуальная дозиметрия. 4. Аварийная дозиметрия. 5. Внутрореакторная дозиметрия. 6. Дозиметрия больших доз. 7. Твердотельная дозиметрия. 8. ЛПЭ – метрия. 9. Микродозиметрия и др. Широкий круг решаемых дозиметрических задач требует детального учета особенностей взаимодействия излучений с веществом и характеристик дозиметрических детекторов.

Характеристики полей ионизирующего излучения; дозиметрические величины.

Различные скалярные и векторные, дифференциальные и интегральные характеристики полей ионизирующего излучения обуславливают формирование дозных полей в различных объектах. Следует четко различать соответствующие токовые и потоковые величины вышеуказанных характеристик; в частности, дозовые функционалы определяются потоковыми величинами, что особенно важно при использовании различных детекторов в качестве дозиметров. В лекциях приводятся примеры детекторов, являющихся как потоковыми, так и токовыми датчиками, что определяет возможность с их помощью измерять величины доз. Наличие достаточно большого количества дозиметрических параметров требует четкого понимания областей их использования (напр., дозы в единицах Гр (грей), Зв (зиверт), Р (рентген)). Далее в курсе будет представлена современная система дозиметрических величин.

Взаимодействие фотонного и электронного излучения с веществом; основные вопросы дозиметрии фотонного излучения.

Знание закономерностей взаимодействия излучений с веществом является необходимым условием корректной оценки процессов энергопоглощения при облучении различных объектов, выбора адекватных детекторов и методов измерения необходимых характеристик. При рассмотрении вопросов дозиметрии фотонного излучения основное внимание в рамках дозиметрии следует обратить на соответствующие коэффициенты передачи и поглощения энергии. В соответствии с сечениями основных процессов взаимодействия с веществом

фотонов различных энергий определяются величины, связанные с эффектами передачи энергии вторичным заряженным частицам (электронам и позитронам); для многокомпонентных сред величины переданной энергии определяются значениями т.н. эффективных атомных номеров, используемых в соответствующих оценках переданной и поглощенной энергии фотонного излучения. Для облучаемых объектов определенного размера следует понимать различие в значениях переданной и поглощенной энергии (за счет утечки части излучений в виде высокоэнергетичных заряженных частиц, тормозного и характеристического излучения). Полученные условия т.н. электронного равновесия позволяют сделать оценку мощности дозы на основании простого соотношения, связывающего интенсивность фотонного излучения и коэффициента передачи энергии (единица керма). В лекциях приводятся основные данные по характеристикам взаимодействия быстрых электронов с веществом, т.к. они определяют характер поглощения вторичных электронов, образованных фотонным излучением. Основное значение при этом имеет соотношение ионизационных и радиационных потерь энергии электронов, а также конечное значение пробега электронов в среде.

Ионизация в газах; основные характеристики ионизационных дозиметрических детекторов.

Вопросы кинетики ионизации газов под действием непрерывного и импульсного облучения являются определяющими для дозиметрии излучений с использованием соответствующих ионизационных детекторов качестве дозиметров ионизирующего излучения. Основные эффекты – скорость генерации носителей ионов внешним ионизирующим излучением (образование ионных пар) и скорость эффекта рекомбинации этих носителей обуславливают процессы, протекающие в одних из наиболее распространенных и точных методах практической дозиметрии фотонного и электронного излучения. Соотношение Брега-Грея, определяющее связь между эффектом ионизационного тока  $i$  и поглощенной энергией в стенке камеры  $\Delta E$ , с учетом поправки на эффективность собирания ионов  $f$ , позволяет реализовать следующую последовательность операций:  $\Delta E = q_0 \cdot W \cdot (S)_{az}$ ;  $i = q_0 \cdot e \cdot V$ ;  $i_0 = i/f$ , где  $i$  – измеряемый ток,  $i_0$  – ток насыщения,  $\cdot (S)_{az}$  – отношение удельных тормозных способностей вещества стенки и газа относительно действующих энергетических распределений вторичных электронов, образованных фотонами,  $e$  – заряд электрона,  $W$  – средняя энергия ионизации. Это цепь соотношений является основой ионизационного метода дозиметрии; параметры вышеприведенных соотношений рассматриваются отдельно, и необходимо понимать их роль для решения конечной задачи. В связи со специфической ситуацией, когда показание фотонного дозиметра зависит не только от величины дозы или мощности дозы, но от величины энергии (или эффективной энергии) фотонного излучения важным фактором является т.н. энергетическая

Методы дозиметрии, основанные на использовании сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.

Сцинтилляционные детекторы, которые наиболее широко применяются в спектрометрии ионизирующих частиц, могут быть использованы в качестве дозиметрических устройств. Среди параметров, определяющих функционирование сцинтилляционных дозиметров (пара «сцинтиллятор-фотоэлектронный умножитель») наиболее важным является конверсионная

эффективность, определяющая величину световыхода кристаллов и зависящая от энергии заряженных (частиц в основном, в области малых энергий), что может вносить погрешность в результаты измерений мощности дозы в токовом режиме; эту особенность следует учитывать как для органических, так и для неорганических кристаллов. Следует отметить сильную энергетическую зависимость чувствительности такого рода дозиметров, особенно в счетном режиме.

Изучение особенностей применения в дозиметрии полупроводниковых детекторов с p-n переходом требует знания поведения носителей электрических зарядов в структурах, составляющих детектор. В дозиметрических измерениях используются различные режимы приложенного внешнего напряжения, токовый и счетный режимы; необходимо представлять весь комплекс положительных и отрицательных характеристик при использовании этих типов дозиметров.

### Эффекты радиофотолуминесценции и радиотермолуминесценции в дозиметрии.

Из указанных выше двух физических эффектов, имеющих место в некоторых кристаллических структурах в результате их облучения ионизирующими частицами, наибольшее практическое применение в дозиметрии получил метод, основанный на использовании эффекта термолуминесценции (ТЛД). Некоторые основные физические принципы реализации этого метода могут быть интерпретированы на основе анализа зонной модели, которая позволяет получить основные соотношения, описывающие процесс термолуминесценции, в частности, определяющие измеряемые величины - величину пика кривой термовысвечивания и площадь под этой кривой. Эти величины коррелируют с величиной интегральной дозы. Основные параметры, определяющие возможность практического использования ТЛД - глубина залегания ловушек, частотный фактор, диапазон температур нагревания, интенсивность затухания люминесценции (фединг), зависимость чувствительности детекторов от режимов облучения. Знание физической сути этих величин и процессов позволяет корректно реализовать этот метод дозиметрии.

Принципы фотографического и химического методов дозиметрии. Тепловой метод дозиметрии.

Фотографический метод дозиметрии основан на фотохимическом действии ионизирующих излучений на кристаллиты бромистого или хлористого серебра, в результате которого образуются центры скрытого изображения; под действием химического проявления восстанавливаются атомы серебра, количество которых определяет степень почернения фотоэмульсии, пропорциональное поглощенной в ней энергии (поглощенной дозе). Следует обратить внимание на ограниченный диапазон измерения интегральных доз как в области низких значений, так и при больших дозах. Функция дозовой чувствительности фотодозиметров и соответствующей энергетической зависимости должны определяться с учетом влияния фильтрующих экранов. На примере фотодозиметров показан принцип компенсации энергетической зависимости чувствительности; такой метод применим к другим типам дозиметров, напр., при использовании в качестве дозиметров гейгеровских счетчиков. Химический метод дозиметрии основан на измерении выхода радиационно-химических реакций, инициированных энергопоглощением ионизирующего излучения. Сфера применения химических дозиметрических систем - дозиметрия больших доз. Тепловой метод дозиметрии

по существу базируется на технике калориметрических измерений, где источником тепловой энергии является величина дозы ионизирующего излучения в рабочем теле калориметра.

#### Основы дозиметрии электронного излучения.

Ранее были рассмотрены вопросы взаимодействия электронов с веществом. Эти процессы определяют формирование полей рассеянных в облучаемой среде электронов и, соответственно, дозных полей. Различают расчетные, полуэмпирические и экспериментальные методы определения значений поглощенных энергий при прохождении электронов через вещество. В настоящее время основным расчетным методом является метод Монте-Карло на основе статистического моделирования процессов однократного и многократного взаимодействия электронов с атомами среды. В качестве одного из полуэмпирических методов оценки распределений поглощенной энергии электронов рассматривается алгоритм Осанова и Радзиевского, основанный на единых дозовых функциях. Экспериментальные методы измерения дозных полей используют в принципе все детектирующие устройства ионизирующих частиц. Основное отличие процесса переноса электронов от процессов переноса фотонов и нейтронов – фиксированный пробег электронов, зависящий от их энергии. Электроны являются относительно короткопробежными частицами, что необходимо учитывать в конкретных условиях измерений (напр., экстраполяционная ионизационная камера).

#### Дозиметрия нейтронов.

Специфика дозиметрии нейтронов (косвенно ионизирующее излучение) определяется сложными закономерностями взаимодействия нейтронов с ядрами атомов облучаемой среды; эти процессы зависят от энергии нейтронов (систематика энергетических диапазонов) и компонентного состава вещества. Особое значение уделяется взаимодействию нейтронов с биологической тканью (тканевая доза) и соответствующей энергетической зависимостью тканевой дозы. Практическая дозиметрия нейтронов осуществляется всеми ранее рассмотренными методами детектирования (ионизационным методом, сцинтилляционным детектором, фотоэмульсиям) и некоторыми специфическими методиками (пропорциональный газоразрядный счетчик, активационный метод).

#### ЛПЭ-метрия и основные принципы микродозиметрии.

Раздел дозиметрии - ЛПЭ-метрия (ЛПЭ – линейные потери энергии заряженных частиц) отражает детализацию формирования величины дозы заряженными частицами в соответствии действующим энергетическим распределением и, соответственно, различными значениями линейных потерь энергии, т.е. доза представляется функцией, дифференциальной по ЛПЭ. Рассматривается вопрос формирования ЛПЭ – спектров в веществе. Основным инструментом практического определения распределения дозы по ЛПЭ является сферический пропорциональный счетчик; на основании измеренных амплитудных распределений импульсов счетчика устанавливается по соответствующей расчетной методике связь ЛПЭ-распределений с амплитудным спектром сферического пропорционального счетчика. В рамках ЛПЭ-метрии рассмотрена теория неравномерной ионизации и рекомбинационный метод определения коэффициента качества излучения в смешанных полях (все эти данные используются в различных моделях радиационно-индуцированных эффектов в биологических объектах).

Дальнейшая детализация структуры дозных распределений осуществляется в рамках раздела дозиметрии – микродозиметрии.

#### Элементы дозиметрии инкорпорированных радионуклидов.

Необходимо определить комплекс основных проблем дозиметрии радиоактивных изотопов, поступающих из внешней среды в организм человека. Предлагается последовательное рассмотрение следующих разделов:



- пути поступления нуклидов в организм человека;
- радиоактивные аэрозоли;
- пространственное и временное распределение источников излучений;
- кинетика транспорта радиоактивных нуклидов в организме человека в рамках многокамерных моделей;
- дозовые функции элементарных источников излучений;
- методы вычисления тканевых доз;
- способы прямого и косвенного определения характеристик источников в среде;
- методы оценки предельно-допустимых величин концентраций радиоактивных веществ в объектах внешней среды.

Современная система дозиметрических величин.

Система дозиметрических величин есть результат развития дозиметрии, радиобиологии, радиационной безопасности. Эта система включает:

- физические величины, являющиеся мерой воздействия ионизирующих излучений на вещество;
- нормируемые величины, являющиеся мерой ущерба от воздействия излучений на человека;
- операционные величины, являющиеся непосредственно определяемыми в измерениях величинами для оценки нормируемых величин.

Определяются основные величины и единицы их измерения: эквивалентная доза облучения, взвешивающие коэффициенты, эффективная доза; операционные величины: амбиентная доза, индивидуальный эквивалент дозы.

Автор(ы):

Будыка Александр Константинович, д.ф.-м.н., с.н.с.

Мельникова Татьяна Вадимовна, к.хим.н.