

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»**

В.А. Климанов, Е.А. Крамер-Агеев, В.В. Смирнов

**ДОЗИМЕТРИЯ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Москва

Оглавление

Предисловие	15
Введение	20
ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА	26
1. Вещество и энергия	26
2. Излучение	27
3. Атом	28
3.1. Введение	28
3.2. Основные определения атомной структуры	29
3.3. Модель атома водорода Бора	31
3.4. Многоэлектронные атомы	31
3.5. Строение ядра	34
3.6. Ядерные реакции	36
Контрольные вопросы	38
Список литературы	39
ГЛАВА 2. РАДИОАКТИВНОСТЬ	40
1. Открытие радиоактивности	40
2. Различные виды радиоактивного распада	40
2.1. Радиоактивные переходы, связанные с сильным взаимодействием	40
2.2. Радиоактивные переходы, связанные с электростатической силой	42
2.3. Радиоактивные переходы, связанные со слабым взаимодействием	44
3. Кинетика радиоактивного распада	48
3.1. Закон радиоактивного распада	49
3.2. Период полураспада, среднее время жизни и удельная активность	50
3.3. Соотношение между родительской и дочерними радиоактивностями	51
Контрольные вопросы	59
Список литературы	60

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. 61

1. Введение	61
2. Характеристики, используемые для описания поля ионизирующего излучения	62
2.1. Стохастические и нестохастические величины	62
2.2. Дифференциальные и интегральные характеристики поля излучения.	65
2.3. Поперечные сечения взаимодействия излучений с веществом .	72
Контрольные вопросы	77
Список литературы	78

ГЛАВА 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОТОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ 79

1. Введение	79
2. Рассеяние фотонов	80
2.1. Томсоновское рассеяние	80
2.2. Релеевское (когерентное) рассеяние	81
2.3. Комптоновское (некогерентное) рассеяние.	84
3. Поглощение фотонов	97
3.1. Фотоэлектрическое поглощение	97
3.2. Образование электронно-позитронных пар	106
3.3. Фотоядерные реакции	108
4. Полное микроскопическое сечение взаимодействия фотонов	109
5. Макроскопическое сечение взаимодействия фотонов с веществом	112
5.1. Полные макроскопические сечения	112
5.2. Полный массовый коэффициент передачи энергии	113
5.3. Полный массовый коэффициент поглощения энергии.	114
6. Эффективный атомный номер	116
Контрольные вопросы	117
Список литературы	118

ГЛАВА 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ 120

1. Общее описание взаимодействия.	120
1.1. Сравнение взаимодействия с веществом электронов	120
1.2. Особенности кулоновского взаимодействия заряженных частиц при разных значениях прицельного параметра	122

2. Сечения взаимодействия заряженных частиц с орбитальными электронами и ядрами	126
2.1. Упругое рассеяние заряженных частиц	126
2.2. Неупругое рассеяние заряженных частиц	129
2.3. Тормозное излучение заряженных частиц	134
3. Тормозные способности	141
3.1. Общее рассмотрение	141
3.2. Компонент мягких столкновений	144
3.3. Компонент близких столкновений для тяжелых заряженных частиц	144
3.4. Оболочечная поправка	146
3.5. Массовая тормозная способность для электронов и позитронов.	148
3.6. Эффект плотности или поправка на поляризацию среды	149
3.7. Массовая радиационная тормозная способность	151
3.8. Ограниченная массовая тормозная способность	156
4. Пробеги заряженных частиц	158
4.1. Общее рассмотрение	158
4.2. Пробеги в приближении непрерывного замедления	160
4.3. Экстраполированные пробеги	161
4.4. Флуктуации потерянной энергии и пробегов (страгглинг)	162
5. Угловое распределение многократно рассеянных заряженных частиц	163
5.1. Общее рассмотрение	163
5.2. Угловое распределение многократно рассеянных электронов и массовая рассеивающая способность	164
6. Расчет поглощенной дозы от пучков заряженных частиц	167
6.1. Поглощенная доза в тонком слое	167
6.2. Средняя поглощенная доза в толстой фольге	168
Контрольные вопросы	170
Список литературы	172

ГЛАВА 6. ВЕЛИЧИНЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ. 175

1. Введение	175
2. Передача и поглощение энергии	176
2.1. Стохастические величины	176
2.2. Нестохастические величины	183

2.3. Вычисление кермы и поглощенной дозы, основанное на характеристиках поля	186
3. Связь кермы и экспозиционной дозы с флюенсом частиц и с энергией	188
3.1. Керма на единичный флюенс фотонов	188
3.2. Керма на единичный флюенс нейтронов	189
3.3. Компоненты кермы	190
3.4. Связь экспозиционной дозы с флюенсом и энергией фотонов	192
4. Радиационное равновесие	193
4.1. Введение	193
4.2. Полное радиационное равновесие	194
4.3. Равновесие заряженных частиц	196
4.4. Нарушение РЗЧ в поле косвенно ионизирующего излучения. .	201
4.5. Динамическое (переходное) равновесие заряженных частиц .	202
5. Дозовые характеристики поля и единицы, используемые в радиационной безопасности	207
5.1. Относительная биологическая эффективность и коэффициент качества	207
5.2. Эквивалентная доза и эквивалент дозы	209
5.3. Эффективная доза и коллективная эффективная доза	213
5.4. Операционные величины	218
Контрольные вопросы	222
Список литературы	223

ГЛАВА 7. ЗАКОНЫ ОСЛАБЛЕНИЯ И ДОЗОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ В СРЕДАХ ИСТОЧНИКАМИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1. Законы ослабления косвенно ионизирующего излучения в геометриях узкого и широкого пучков	225
2. Гамма-постоянные радионуклидных источников	229
2.1. Определение гамма-постоянных	229
2.2. Расчет дозы от изотропных источников фотонов	230
3. Дозовые ядра элементарных источников фотонов	232
3.1. Общее рассмотрение	232
3.2. Дозовые ядра для точечных изотропных источников.	234
3.3. Дозовые ядра для тонкого луча	239
3.4. Дозовые ядра для дифференциального тонкого луча	248
4. Преобразования источников и теорема обратимости	251
4.1. Теорема обратимости в бесконечной однородной среде. . .	252

4.2. Теорема обратимости в неомогенной среде	253
Контрольные вопросы	254
Список литературы	255

ГЛАВА 8. ТОРМОЗНОЕ, РЕНТГЕНОВСКОЕ И ФЛУОРЕСЦЕНТНОЕ (ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ) ИЗЛУЧЕНИЯ 258

1. Характеристики полей тормозного излучения	258
1.1. Энергетическое распределение тормозного излучения	258
1.2. Угловое распределение тормозного излучения	263
1.3. Интегральные характеристики тормозного излучения	266
2. Рентгеновское излучение	273
3. Флуоресцентное излучение	277
Контрольные вопросы	281
Список литературы	282

ГЛАВА 9. ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ 283

1. Соотношение Брэгга-Грея	283
2. Модификация Спенсера	286
3. Модификация Спенсера – Аттикса	291
4. Теория полости Бурлина	293
Контрольные вопросы	297
Список литературы.....	297

ГЛАВА 10. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЗИМЕТРОВ..... 299

1. Введение	299
2. Упрощенная модель дозиметра	300
3. Интерпретация показаний дозиметра в полях фотонов и нейтронов	301
3.1. Интерпретация в условиях равновесия заряженных частиц..	301
3.2. Согласование сред	302
3.3. Согласование материала стенок и среды интереса в фотонных дозиметрах	303
3.4. Согласование материала стенок и среды интереса в нейтронных дозиметрах ..	304
3.5. Согласование дозиметра со средой интереса, когда $w \neq g$. . .	305
3.6. Поправки на ослабление излучения в дозиметре	306
4. Общие характеристики дозиметров	307

4.1. Абсолютность измерений	307
4.2. Погрешность, точность и воспроизводимость	308
4.3. Дозовый диапазон	310
4.4. Стабильность	313
4.5. Энергетическая зависимость чувствительности	314
5. Оценивание результатов радиационного контроля	317
5.1. Основные понятия	318
5.2. Оценивание результата измерений	321
5.3. Метрологические требования к методикам дозиметрического контроля	324
5.4. Требования к суммарной погрешности измерения индивидуальной дозы дозиметрами	326
Контрольные вопросы	327
Список литературы	329

ГЛАВА 11. ИОНИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ДОЗИМЕТРИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	330
1. Основные процессы в газах в полях ионизирующего излучения	330
1.1. Средняя энергия образования пары ионов в газах	331
1.2. Рекомбинация ионов	333
1.3. Ионизированный газ в электрическом поле	336
2. Ионизационная камера	338
2.1. Принцип действия	338
2.2. Эффективность собирания ионов в ионизационной камере . .	339
2.3. Экспериментальный метод определения величины эффективности собирания ионов	344
2.4. Колонная рекомбинация	347
3. Ионизационные камеры различной геометрии	350
4. Экстраполяционная камера	353
5. Конденсаторная камера	355
6. Основные поправки	356
6.1. Поправка на отклонение температуры и давления от стандартных значений	356
6.2. Учет влияния стенки камеры	357
6.3. Поправка на эффект полярности	360
Контрольные вопросы	360
Список литературы	361

Глава 12. Калибровка пучков фотонов и электронов с помощью полостных ионизационных камер	362
1. Введение	362
2. Абсолютные полостные ионизационные камеры	364
3. Рекомендации, основанные на калибровке по воздушной керме	365
3.1. От воздушной кермы к N_K -фактору	365
3.2. От N_K -фактора к $N_{D,air}$ -фактору	366
3.3. От $N_{D,air}$ -фактора к поглощенной дозе в воде	370
4. Рекомендации, основанные на калибровке по поглощенной дозе в воде	374
4.1. Введение	374
4.2. Формализм, основанный на использовании $N_{D,w}$	376
5. Соотношение между N_K , $N_{D,air}$ - и $N_{D,w}$ -формализмами	379
6. Факторы возмущения	380
6.1. Общее рассмотрение	380
6.2. Эффект смещения точки измерения (P_{eff} или p_{dis})	381
6.3. Эффект стенки камеры (p_{wall}) и центрального электрода (p_{cel})	383
6.4. Эффект рассеяния в полость (p_{cav})	385
7. Киловольтные пучки рентгеновского излучения	387
7.1. Особенности дозиметрии киловольтных пучков рентгеновского излучения	387
7.2. Метод обратного рассеяния (низкие энергии)	389
7.3. Фантомный метод (средние энергии)	390
8. Абсолютная дозиметрия малых и нестандартных пучков фотонного излучения	391
8.1. Общие положения	392
8.2. Малые статические поля – калибровка	394
8.3. Малые статические поля – измерения	396
8.4. Составные поля	399
Контрольные вопросы	401
Список литературы	403
ГЛАВА 13. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДОЗИМЕТРЫ	407
1. Люминесцентная дозиметрия	407
1.1. Общее рассмотрение	407
1.2. Кинетика процессов в люминесцентных детекторах	409
1.3. Кинетика процессов в радиотермолюминесцентном дозиметре	413

1.4. Кинетика второго порядка	420
1.5. Дозовая чувствительность термолюминесцентных дозиметров	421
1.6. Спонтанная утечка электронов из ловушек (фединг)	425
1.7. Тушение люминесценции	426
1.8. Требования к материалам, используемым в качестве термолюминесцентных дозиметров	427
2. Термолюминесцентные стекла	430
2.1. Оптически стимулированная люминесценция (ОСЛ)	431
2.2. Твердотельные дозиметры на основе эффекта радиофотолюминесценции (РФЛ)	437
3. Фотографическая дозиметрия	441
4. Химическая дозиметрия	450
4.1. Общее рассмотрение	450
4.2. Радиационно-химический выход	451
4.3. Ферросульфатный дозиметр	453
4.4. Цериевый дозиметр	455
4.5. Гель – дозиметрия	455
5. Калориметрическая дозиметрия	458
Контрольные вопросы	462
Список литературы.	463

ГЛАВА 14. ДОЗИМЕТРИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ. . . 464

1. Введение	464
2. Пропорциональные счётчики в дозиметрии	466
3. Газоразрядные счётчики в дозиметрии фотонного излучения.	468
4. Сцинтилляционные дозиметры	473
4.1. Введение	473
4.2. Характеристики основных сцинтилляторов, применяемых в дозиметрии	475
4.3. Сбор света и измерение сцинтилляционных вспышек	477
4.4. Дозиметрическое применение сцинтилляционных детекторов.	480
4.5. Сравнение сцинтилляционных дозиметров с ионизационной камерой	484
4.6. Дозиметрия β -излучения сцинтилляционными приборами.	485

4.7. Использование дискриминации по форме импульса в избирательной дозиметрии нейтронного и фотонного излучений	491
5. Полупроводниковые детекторы в дозиметрии	497
5.1. Введение	497
5.2. Основные типы полупроводниковых детекторов.	501
5.3. Применение кремниевых ППД без подачи напряжения	505
питания в дозиметрии	505
5.4. Использование ППД с обратным смещением в дозиметрии.	512
5.5. Применение ППД как заместителей ионизационных камер.	517
5.6. Возможность применения ППД в дозиметрии нейтронного излучения	518
Контрольные вопросы	519
Список литературы.	520
ГЛАВА 15. ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ НЕЙТРОНОВ.	522
1. Введение	522
2. Типичные виды взаимодействия нейтронов	525
с биологической тканью и веществом детекторов.	525
2.1. Тепловые нейтроны.	525
2.2. Нейтроны промежуточных энергий.	532
2.3. Быстрые нейтроны.	537
3. Расчёт кермы нейтронов в биологической ткани.	542
Контрольные вопросы.	546
Список литературы.	546
ГЛАВА 16. ДОЗИМЕТРИЯ НЕЙТРОНОВ.	548
1. Источники нейтронов.	548
2. Методы измерения кермы нейтронов.	559
3. Расчёты поглощённой дозы и спектров ядер отдачи в фантомах человека.	566
4. Эквивалент дозы и эквивалентная доза нейтронов.	570
5. Способы измерения амбиентного эквивалента дозы нейтронов	578
6. Методы измерения индивидуального эквивалента доз.	583
Контрольные вопросы.	590
Список литературы	591

ГЛАВА 17. ДОЗИМЕТРИИ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ.	593
1. Общее рассмотрение.	593
2. Источники внутреннего облучения.	595
3. Поступление радиоактивных веществ в организм человека.	599
3.1. Основные пути поступления РВ в организм.	599
3.2. Поступление через органы дыхания (ингаляционный канал).	600
3.3. Желудочно – кишечный тракт (ЖКТ, пероральный канал).	602
3.4. Поступление РВ через кожные покровы.	603
4. Тканевая доза, обусловленная излучением инкорпорированных радионуклидов.	603
5. Роль времени в формировании дозы излучения инкорпорированных нуклидов.	606
6. Камерные модели.	607
6.1. Общее рассмотрение.	607
6.2. Простая кинематика нуклидов в рамках однокамерной модели.	609
6.3. Двухкамерная модель.	611
7. Кинетика продуктов распада радона на фильтре.	613
7.1. Кинетика продуктов распада радона на фильтре в процессе прокачки.	613
7.2. Кинетика продуктов распада радона на фильтре после прокачки.	617
7.3. Фильтры для измерения концентрации аэрозолей.	618
Контрольные вопросы.	620
Список литературы.	620

ГЛАВА 18. ДОЗИМЕТРИЯ В ПОЛЯХ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.	621
1. Импульсный режим облучения ионизационной камеры.	622
1.1. Соотношение Боуга при импульсном облучении.	622
1.2. Экспериментальный метод определения эффективности собирания ионов в импульсном режиме.	626
1.3. Метод определения эффективности собирания ионов в импульсном режиме облучения.	627
2. Химических дозиметры в импульсных полях.	631
3. Другие интегральные дозиметры в полях импульсного излучения.	634

3.1. Калориметрический метод измерения дозовых характеристик в полях импульсного излучения.....	634
3.2. Твердотельные дозиметры импульсного излучения.....	635
Контрольные вопросы	637
Список литературы	638
ГЛАВА 19. ДОЗИМЕТРИЯ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ.....	639
1. Введение	639
2. Разработка протоколов для измерения поглощенной дозы в РФ641	
3. Абсолютные измерения поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии	644
3.1. Стандартные условия	645
3.2. Фантомы	649
3.3. Определение качества пучка	651
3.4. Неопределенности в определении поглощенной дозы в воде для пучков разного вида излучений	655
4. Относительные измерения поглощенной дозы	656
4.1. Выбор фантомов и детекторов	657
4.2. Относительные дозовые распределения	658
5. Измерения в малых полях	661
5.1. Влияние размера источника излучения и геометрии коллимации пучка	661
5.2. Пробеги электронов и потеря электронного равновесия	664
5.3. Детекторы	665
5.4. Вычислительные методы реконструкции дозовых распределений	670
Контрольные вопросы	684
Список литературы	686
ГЛАВА 20. ДОЗИМЕТРИЯ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ.....	689
1. Историческая справка	689
2. Дозиметрия на разных этапах разработки и внедрения радиофармпрепаратов.....	693
3. Методы расчета доз при внутреннем облучении.....	695
3.1. Главные уравнения.....	695
3.2. Дозиметрические системы.....	697
3.3. Метод Маринелли-Квимби-Хайна.....	698

3.4. Современные расчетные методы дозиметрии в ядерной медицине	701
4. Практическое рассмотрение	714
4.1. S-Факторы для фантома стандартного человека	714
4.2. Серия педиатрических фантомов	716
4.3. Серия фантомов беременных женщин	718
4.4. Воксельные (томографические) фантомы всего тела	719
4.5. Эффективный период полувыведения	719
4.6. Резидентное время	720
5. Программное обеспечение и ресурсы Интернета	721
5.1. Программные комплексы MIRDOSE и OLINDA	721
5.2. Система RADAR	722
Контрольные вопросы	722
Список литературы	724

ГЛАВА 21. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МИКРОДОЗИМЕТРИИ728

1. Введение	728
2. Микродозиметрические величины и распределения	729
3. Флуктуации энергетических потерь	731
4. Экспериментальные микродозиметрические исследования	733
Список литературы	737