


С.Н.Смирнов, Д.Н.Герасимов

# **РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

## **ФИЗИКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ



---

С.Н.Смирнов, Д.Н.Герасимов

# **РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

## **ФИЗИКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 "Техническая физика"

2-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский дом МЭИ  
2022

УДК 504.054  
ББК 20.1  
С 506

Рецензенты: профессор, докт. физ.-мат. наук И.И. Климовский,  
профессор В.Д. Кузнецов, заведующий кафедрой  
атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

### **Смирнов С.Н.**

С 506 Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений :  
учебник для студентов вузов / С.Н. Смирнов, Д.Н. Герасимов. —  
2-е изд., стер. — М. : Издательский дом МЭИ, 2022. — 326 с.; ил.

ISBN 978-5-383-01637-4

Изложены базовые вопросы физики ионизирующих излучений и радиационной экологии: природа радиоактивности, взаимодействие ионизирующего излучения с веществом, способы детектирования ионизирующего излучения, нормы радиационной безопасности, расчет доз облучения, радиоактивное загрязнение предприятиями ядерного топливного цикла, принципы построения математических моделей миграции радионуклидов в окружающей среде.

Первое издание учебника выпущено в Издательском доме МЭИ в 2006 году.

Для студентов технических вузов, обучающихся по направлению «Техническая физика».

УДК 504.054  
ББК 20.1

ISBN 978-5-383-01637-4

© АО «Издательский дом МЭИ», 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава первая. Радиоактивность</b> .....	16
1.1. Общие сведения о строении атома и ядра .....	16
1.1.1. Атом .....	16
1.1.2. Ядро .....	17
1.2. Закон радиоактивного распада .....	19
1.2.1. Немного истории .....	19
1.2.2. Общая форма закона радиоактивного распада .....	20
1.2.3. Вероятностный смысл закона радиоактивного распада .....	22
1.2.4. Основные выводы .....	23
1.3. $\alpha$ -распад .....	23
1.3.1. Немного истории .....	23
1.3.2. Загадки $\alpha$ -распада .....	24
1.3.3. Теория $\alpha$ -распада .....	25
1.3.4. Реакция $\alpha$ -распада .....	29
1.3.5. Основные выводы .....	33
1.4. $\beta$ -распад .....	33
1.4.1. Немного истории .....	33
1.4.2. Теория Э. Ферми $\beta$ -распада .....	34
1.4.3. Нейтрино .....	37
1.4.4. Виды $\beta$ -распада .....	38
1.4.5. Основные выводы .....	40
1.5. $\gamma$ -излучение ядер и внутренняя конверсия .....	40
1.5.1. Немного истории .....	40
1.5.2. $\gamma$ -излучение и рентгеновские лучи .....	41
1.5.3. Природа $\gamma$ -излучения .....	41
1.5.4. Внутренняя конверсия атомов .....	42
1.5.5. Основные выводы .....	43
1.6. Радиоактивные семейства .....	43
1.6.1. Немного истории .....	43
1.6.2. Радиоактивные ряды .....	44
Контрольные вопросы .....	48
Список литературы .....	48
<b>Глава вторая. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом</b> .....	50
2.1. Взаимодействие заряженных частиц с веществом: упругое рассеяние .....	50
2.1.1. Сечение рассеяния .....	50
2.1.2. Центр масс .....	51
2.1.3. Кулоновское рассеяние частиц .....	52
2.1.4. Немного истории .....	56
2.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом: ионизация .....	57
2.2.1. Лабораторная система координат .....	57

2.2.2. Ионизация электронами (I) . . . . .	59
2.2.3. Ионизация произвольными частицами . . . . .	60
2.2.4. Ионизационные потери . . . . .	62
2.2.5. Ионизация электронами (II) . . . . .	63
2.3. Взаимодействие заряженных частиц с веществом: тормозное излучение . . . . .	64
2.3.1. Дипольное излучение . . . . .	64
2.3.2. Излучение при кулоновском рассеянии . . . . .	69
2.3.3. Учет релятивистских эффектов . . . . .	71
2.3.4. Потери на излучение . . . . .	75
2.3.5. Поляризационное тормозное излучение . . . . .	77
2.4. Взаимодействие заряженных частиц с веществом: черенковское излучение . . . . .	78
2.4.1. Излучение равномерно движущегося заряда . . . . .	78
2.4.2. Электромагнитное поле . . . . .	80
2.4.3. Немного истории . . . . .	84
2.5. Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом: фотоэффект . . . . .	85
2.5.1. Закон сохранения . . . . .	85
2.5.2. Квантовые возмущения . . . . .	86
2.5.3. Сечение фотоэффекта . . . . .	90
2.6. Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом: эффект Комптона . . . . .	94
2.6.1. Томсоновское рассеяние . . . . .	94
2.6.2. Немного истории . . . . .	98
2.6.3. Квантовомеханический анализ . . . . .	98
2.6.4. Сечение комптоновского рассеяния . . . . .	100
2.7. Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом: эффект образования пар . . . . .	102
2.7.1. Минимальная энергия $\gamma$ -кванта . . . . .	102
2.7.2. Сечение эффекта образования пар . . . . .	104
2.7.3. Сопоставление . . . . .	105
2.8. Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом: эффект Мессбауэра . . . . .	105
2.8.1. Резонансное поглощение . . . . .	105
2.8.2. Эффект Мессбауэра . . . . .	107
Задачи . . . . .	109
Список литературы . . . . .	110
<b>Глава третья. Регистрация ионизирующих излучений . . . . .</b>	<b>111</b>
3.1. Основные характеристики детекторов ионизирующих излучений . . . . .	111
3.2. Трековые детекторы ионизирующих излучений . . . . .	113
3.2.1. Камера Вильсона . . . . .	113
3.2.2. Диффузионная камера . . . . .	116
3.2.3. Пузырьковые камеры . . . . .	117
3.2.4. Фотоэмульсионные детекторы . . . . .	118
3.2.5. Стримерные камеры . . . . .	118
3.3. Газоразрядные счетчики ионизирующего излучения . . . . .	120
3.3.1. Общая вольт-амперная характеристика газового разряда . . . . .	120
3.3.2. Ионизационная камера . . . . .	122
3.3.3. Пропорциональный счетчик . . . . .	124
3.3.4. Счетчик Гейгера . . . . .	126
3.4. Сцинтилляционные детекторы . . . . .	129

3.4.1. Сцинтилляторы .....	129
3.4.2. Фотозлектронные умножители .....	131
3.5. Черенковские счетчики .....	132
Контрольные вопросы .....	133
Список литературы .....	134
<b>Глава четвертая. Дозовые характеристики и нормы радиационной безопасности</b> .....	135
4.1. Экспозиционная и поглощенная дозы .....	135
4.2. Эквивалентная доза .....	140
4.3. Биологические эффекты облучения .....	142
4.4. Эффективная эквивалентная доза .....	147
4.5. Коллективная доза .....	150
4.6. Оптимизация радиационной защиты на основе анализа соотношения затраты—выгода .....	154
4.7. Нормы радиационной безопасности НРБ-99 .....	156
4.7.1. Ограничение облучения населения природными источниками .....	159
4.7.2. Организация противорадиационной защиты .....	162
4.7.3. Ограничение медицинского облучения населения .....	165
4.7.4. Ограничение облучения населения при радиационной аварии .....	166
4.7.5. Повышенное облучение персонала при ликвидации или предотвращении аварии .....	169
4.7.6. Защита от природного облучения .....	170
4.7.7. Допустимые уровни радиационного воздействия .....	171
4.7.8. Контроль за выполнением норм радиационной безопасности .....	172
Контрольные вопросы .....	173
Список литературы .....	173
<b>Глава пятая. Расчет индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучений</b> .....	174
5.1. Закон ослабления интенсивности узкого (коллимированного) пучка $\gamma$ -квантов .....	174
5.2. Соотношение между мощностью экспозиционной дозы и интенсивностью $\gamma$ -излучения .....	176
5.3. Закон ослабления интенсивности широкого пучка $\gamma$ -квантов .....	178
5.4. Дозовое поле точечного изотропного источника $\gamma$ -излучения .....	180
5.5. Расчет толщины защиты от точечного изотропного источника $\gamma$ -излучения .....	184
5.6. Дозовое поле плоского изотропного источника $\gamma$ -излучения .....	187
5.7. Расчет толщины защиты от плоского изотропного источника $\gamma$ -излучения .....	191
5.8. Дозовое поле объемного изотропного источника $\gamma$ -излучения .....	195
5.9. Расчет индивидуальных доз внутреннего облучения .....	200
5.9.1. Поведение и миграция радионуклидов в почвах .....	202
5.9.2. Поведение и миграция радионуклидов в водоемах .....	205
5.9.3. Поведение и миграция радионуклидов в организме человека .....	208
5.9.4. Расчет эквивалентной дозы внутреннего облучения .....	209
5.9.5. Ожидаемая эквивалентная доза .....	216
Задачи .....	217

<b>Глава шестая. Радиоактивное загрязнение окружающей среды</b>	
<b>предприятиями ядерного топливного цикла</b> . . . . .	218
6.1. Физические основы атомной энергетики . . . . .	219
6.2. Основные типы энергетических реакторов . . . . .	225
6.3. Атомная энергетика России . . . . .	239
6.4. Радиоактивные отходы атомной энергетики России. . . . .	245
6.5. Безопасность ядерной энергетики . . . . .	254
6.6. Естественная безопасность ядерного топливного цикла . . . . .	260
Контрольные вопросы. . . . .	262
<b>Глава седьмая. Миграция радионуклидов в окружающей среде</b> . . . . .	263
7.1. Источники поступления радионуклидов в окружающую среду. . . . .	263
7.1.1. Естественные радиоактивные источники . . . . .	263
7.1.2. Радиоактивные отходы деятельности АЭС . . . . .	264
7.1.3. Испытания ядерного оружия . . . . .	271
7.1.4. Аварии, сопровождающиеся выбросом радионуклидов. . . . .	272
7.2. Характеристики биологически опасных изотопов . . . . .	273
7.2.1. Существенные свойства изотопов . . . . .	273
7.2.2. Йод . . . . .	274
7.2.3. Стронций . . . . .	275
7.2.4. Цезий . . . . .	275
7.3. Миграция радионуклидов в атмосфере . . . . .	276
7.3.1. Трассерные модели . . . . .	277
7.3.2. Кластеризация примеси. . . . .	277
7.3.3. Конвективно-диффузионная модель . . . . .	281
7.3.4. Гауссовские модели. . . . .	285
7.3.5. Гидродинамические модели . . . . .	289
7.3.6. Заключение. . . . .	290
7.4. Миграция радионуклидов в водной среде . . . . .	291
7.4.1. Перенос радионуклидов в реках . . . . .	293
7.4.2. Перенос радионуклидов в океане . . . . .	298
7.5. Миграция радионуклидов в почвах . . . . .	298
7.5.1. Аномальная диффузия. . . . .	299
7.5.2. Закон Фика . . . . .	302
7.5.3. Неравновесная термодинамика. . . . .	305
7.5.4. Процесс Вейерштрасса—Мандельброта . . . . .	308
7.5.5. Дробные производные и интегралы. . . . .	310
7.5.6. Дробно-дифференциальные уравнения диффузии . . . . .	314
7.5.7. Многообразие теорий . . . . .	317
7.5.8. Назад к почве . . . . .	317
7.6. Биологическая миграция радионуклидов. . . . .	319
Контрольные вопросы. . . . .	320
Список литературы . . . . .	320