

В. И. Беспалов

НАДЗОР И КОНТРОЛЬ В СФЕРЕ БЕЗОПАСНОСТИ. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

4–е издание

*Допущено Учебно–методическим объединением вузов
направления подготовки 140300 «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Ядерные физика и технологии»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2016

УДК 614.876(075.8)

ББК 51.26я73

Б53

Автор:

Беспалов Валерий Иванович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики Физико-технического института Томского политехнического университета.

Рецензенты:

Сычев Б. С. — доктор технических наук, начальник отдела Московского радиотехнического института РАН;

Лисин В. А. — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ онкологии Сибирского отделения РАМН.

Беспалов, В. И.

Б53

Надзор и контроль в сфере безопасности. Радиационная защита : учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / В. И. Беспалов. — 4-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 507 с. — Серия : Университеты России.

ISBN 978-5-9916-7028-9

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам, подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии учебники прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В пособии рассмотрены физические величины в области защиты от излучений, нормы радиационной безопасности, методы расчета защиты от гамма-излучения радионуклидных источников, рентгеновского и тормозного излучения, защита ускорителей заряженных частиц, радиационные условия при космических полетах, основные правила безопасной работы с ионизирующими излучениями. Пособие содержит большое количество таблиц и номограмм, необходимых для проведения расчетов защиты, в конце каждой лекции имеются задания с контрольными вопросами и задачами.

Для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлениям, связанным с защитой от ионизирующих излучений и их применением.

УДК 614.876(075.8)

ББК 51.26я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-9916-7028-9

© Беспалов В. И., 2014

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Основные обозначения и константы.....	10
ЛЕКЦИЯ 1. Введение.....	11
Задание 1	20
Список литературы.....	20
ЧАСТЬ 1. ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	
ЛЕКЦИЯ 2. Основные понятия.....	21
2.1. Активность радионуклида	21
2.2. Поточковые и токовые характеристики поля излучения	23
2.3. Дозиметрические характеристики поля излучения	26
Задание 2	31
Список литературы.....	32
ЛЕКЦИЯ 3. Классификация источников излучения и защит	34
3.1. Классификация источников излучения	34
3.2. Классификация защит	36
3.3. Особенности ослабления пучков излучения.....	38
Задание 3	42
Список литературы.....	43
ЛЕКЦИЯ 4. Гамма-излучение радионуклидов.....	44
4.1. Гамма-постоянная и керма-постоянная радионуклидного источника.....	44
4.2. Радиевый гамма-эквивалент.....	46
4.3. Керма-эквивалент.....	47
Задание 4	48
Список литературы.....	50
ЛЕКЦИЯ 5. Фоновое облучение. Нормы радиационной безопасности	51
5.1. Уровни фонового облучения человека.....	51
5.1.1. Доза от внешнего космического излучения.....	52
5.1.2. Доза от внешнего фотонного излучения почвы	52
5.1.3. Доза от внешнего фотонного излучения воздуха	53
5.1.4. Доза внутреннего облучения от космогенных радионуклидов.....	53
5.1.5. Доза внутреннего облучения от радионуклидов земного происхождения	54
5.1.6. Техногенный радиационный фон	54
5.1.7. Радиационный фон от искусственных источников	54
5.2. Нормы радиационной безопасности.....	55
5.2.1. Основные определения.....	55
5.2.2. Основные категории облучаемых лиц. Основные пределы доз. Допустимые уровни	58
5.2.3. Современные принципы нормирования облучения человека.....	61
5.3. Поле излучения точечного радионуклида	63
5.4. Базисные и фантомные дозиметрические величины	64
Задание 5	68
Список литературы.....	70

ЧАСТЬ 2. ЗАЩИТА ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЛЕКЦИЯ 6. Взаимодействие фотонов с веществом	72
6.1. Фотоэффект	73
6.2. Эффект Комптона	77
6.3. Эффект образования электрон-позитронных пар	82
6.4. Фотоядерные реакции	85
6.5. Полное сечение взаимодействия фотонов	87
Задание 6	91
Список литературы.....	92
ЛЕКЦИЯ 7. Факторы накопления фотонного излучения.....	94
7.1. Факторы накопления однородных сред.....	94
7.2. Факторы накопления гетерогенных сред.....	102
Задание 7	104
Список литературы.....	106
ЛЕКЦИЯ 8. Инженерные методы расчета защиты от первичного гамма-излучения радионуклидов.....	107
8.1. Характеристики некоторых радионуклидов как гамма-источателей.....	109
8.2. Защита временем, количеством, расстоянием	112
8.3. Расчет защиты с помощью универсальных таблиц	113
8.4. Расчет защиты с помощью номограмм	115
8.5. Расчет защиты от плоских и точечных изотропных источников по слоям ослабления	121
8.6. Метод конкурирующих линий	126
Задание 8	128
Список литературы.....	131
ЛЕКЦИЯ 9. Поле излучения радионуклидных источников различных геометрических форм	132
9.1. Точечный источник	133
9.2. Линейный источник	135
9.3. Дисковый источник.....	143
9.4. Цилиндрический объемный источник.....	147
9.4.1. Цилиндрический источник без самопоглощения и рассеяния излучения в источнике.....	148
9.4.2. Цилиндрический источник с самопоглощением	149
9.4.3. Учет рассеянного в источнике излучения.....	149
9.5. Графический метод расчета защиты от гамма-излучения объемных источников	150
Задание 9	153
Список литературы.....	158
ЛЕКЦИЯ 10. Альbedo	159
10.1. Основные понятия и определения	159
10.2. Альbedo фотонов	162
10.2.1. Энергетическое распределение отраженных фотонов.....	163
10.2.2. Зависимость альbedo от угла падения фотонов	164

10.2.3. Зависимость альбедо от угла отражения	164
10.2.4. Зависимость альбедо от энергии фотонов источника и атомного номера материала рассеивателя	164
10.2.5. Зависимость альбедо от толщины рассеивателя	165
10.2.6. Формы представления данных по альбедо	166
10.3. Скайшайн и квазискайшайн излучений	169
Задание 10	171
Список литературы.....	173
ЛЕКЦИЯ 11. Расчет защиты от первичного и рассеянного гамма-излучения радионуклидов.....	174
11.1. Расчет защиты от первичного гамма-излучения	174
11.1.1. Расчет защиты с помощью универсальных таблиц и номограмм	175
11.1.2. Метод слоев ослабления	175
11.1.3. Метод ослабления широкого пучка (МОШП)	176
11.2. Расчет защиты от рассеянного гамма-излучения	179
11.2.1. Расчет защиты от рассеянного гамма-излучения с помощью универсальных таблиц	180
Задание 11	183
Список литературы.....	185
ЛЕКЦИЯ 12. Защита от рентгеновского излучения	186
12.1. Характеристики рентгеновского излучения	186
12.2. Защита от первичного рентгеновского излучения	188
12.2.1. Расчет защиты по эффективной энергии спектра	188
12.2.2. Метод номограмм	189
12.3. Защита от рассеянного рентгеновского излучения.....	196
Задание 12	202
Список литературы.....	203
ЛЕКЦИЯ 13. Защита от тормозного излучения	204
13.1. Защита от тормозного излучения β -частиц	204
13.1.1. Формула Виарда.....	204
13.1.2. Гамма-постоянная	206
13.1.3. Метод конкурирующих линий.....	206
13.2. Расчет защиты от тормозного излучения электронных ускорителей	206
13.2.1. Защита от тормозного излучения электронов с энергиями 0,2...3,0 МэВ.....	206
13.2.2. Метод слоев ослабления	207
13.2.3. Номограммы Машковича.....	211
13.2.4. Новые номограммы для расчета защиты от первичного тормозного излучения	213
13.3. Защита от рассеянного тормозного излучения.....	224
13.3.1. Расчет защиты с помощью универсальных таблиц.....	224
13.3.2. Номограммы для расчета защиты от рассеянного тормозного излучения	226
Задание 13	230
Список литературы.....	231

ЛЕКЦИЯ 14. Расчет лабиринтов.....	232
14.1. Прохождение излучения через неоднородности в защите	232
14.2. Общая схема расчета лабиринта	234
14.3. Приближенный расчет прямоугольного лабиринта.....	238
Задание 14	239
Список литературы.....	241
ЛЕКЦИЯ 15. Защита от радиоактивных веществ, образующихся в воздухе под действием тормозного излучения	242
15.1. Наведенная активность воздуха.....	242
15.2. Активация воздуха тормозным излучением	245
Задание 15	250
Список литературы.....	251
ЛЕКЦИЯ 16. Защита от вредных веществ, образующихся в воздухе под действием ионизирующего излучения	252
16.1. Радиоллиз	252
16.2. Радиоллиз воздуха.....	254
Задание 16	263
Список литературы.....	265
ЛЕКЦИЯ 17. Защитные материалы от фотонного излучения	266
Задание 17	270
Список литературы.....	271
ЧАСТЬ 3. ЗАЩИТА ОТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	
ЛЕКЦИЯ 18. Защита от электронного излучения	272
18.1. Процессы взаимодействия электронов и позитронов с веществом	272
18.1.1. Упругое рассеяние.....	272
18.1.2. Многократное рассеяние	274
18.1.3. Неупругое рассеяние электронов и позитронов на атомах.....	277
18.1.4. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов	278
18.1.5. Тормозное излучение	283
18.1.6. Потери энергии на тормозное излучение. Полные потери энергии электронов и позитронов	286
18.1.7. Аннигиляционное излучение	287
18.2. Коэффициенты пропускания, пробеги электронов и позитронов	288
18.3. Альbedo электронов	292
18.4. Защита от электронов и бета-частиц	293
Задание 18	298
Список литературы.....	300
ЛЕКЦИЯ 19. Защита от альфа-частиц и протонов небольших энергий.....	302
19.1. Процессы взаимодействия альфа-частиц и протонов с веществом	302
19.1.1. Упругое кулоновское рассеяние	303
19.1.2. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов	304
19.1.3. Ядерные взаимодействия протонов и альфа-частиц.....	307
19.2. Пробеги протонов и альфа-частиц. Защита от протонов и альфа-частиц	311
Задание 19	314
Список литературы.....	315

ЛЕКЦИЯ 20. Основы защиты ускорителей заряженных частиц	317
20.1. Применение ускорителей заряженных частиц	317
20.2. Ионизирующее излучение ускорителей	322
20.3. Особенности защиты протонных ускорителей на большие энергии	324
20.3.1. <i>Пространственные размеры источника. Основные требования, предъявляемые к защите</i>	324
20.3.2. <i>Ослабление адронов</i>	326
20.3.3. <i>Электрон-фотонные ливни</i>	331
20.3.4. <i>Некоторые характеристики ядерно-электромагнитных каскадов</i>	333
20.3.5. <i>Особенности защиты от мюонов</i>	337
20.3.6. <i>Основные задачи, решаемые радиационной защитой на ускорителях высокой энергии</i>	346
20.4. Основные факторы вредного воздействия ускорителей	346
20.4.1. <i>Импульсное мгновенное излучение. Скайшайн</i>	347
20.4.2. <i>Наведенная радиоактивность материалов</i>	348
20.4.3. <i>Наведенная радиоактивность воздуха</i>	355
20.5. Особенности защиты ускорителей электронов	359
20.6. Примеры расчетов радиационных условий на ускорителях заряженных частиц	364
Задание 20	375
Список литературы.....	379
ЛЕКЦИЯ 21. Основы радиационной безопасности при космических полетах .	382
21.1. Радиационные условия в космическом пространстве	382
21.1.1. <i>Галактические космические лучи</i>	382
21.1.2. <i>Солнечные космические лучи</i>	384
21.1.3. <i>Радиационные пояса Земли</i>	385
21.2. Особенности радиационной защиты в космосе	390
21.3. Стандарты радиационной безопасности космических полетов	394
21.3.1. <i>Нормы радиационной безопасности космических полетов на основе концепции радиационного риска</i>	394
21.4. Обеспечение радиационной безопасности космических полетов	397
Задание 21	401
Список литературы.....	403

ЧАСТЬ 4. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ЛЕКЦИЯ 22. Основы радиационной безопасности	404
22.1. Классификация лучевых поражений организма человека.....	404
22.2. Организация работ с источниками ионизирующих излучений	406
22.2.1. <i>Общие положения</i>	406
22.2.2. <i>Работа с закрытыми источниками излучения и устройствами, генерирующими ионизирующее излучение</i>	409
22.2.3. <i>Работа с открытыми источниками излучения (радиоактивными веществами)</i>	411
22.2.4. <i>Основные правила обращения с радиоактивными отходами</i>	416
22.2.5. <i>Методы и средства индивидуальной защиты и личной гигиены</i>	419
22.2.6. <i>Радиационный контроль при работе с техногенными источниками излучения</i>	420

22.2.7. Задачи службы радиационной безопасности	422
22.3. Требования по ограничению облучения населения в условиях радиационной аварии. Уровни вмешательства	423
22.4. Основы безопасной перевозки радиоактивных веществ	427
Задание 22	434
Список литературы.....	435
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Программа «Компьютерная лаборатория»	437
Введение.....	437
1. Основные характеристики пакета программ ЕРНСА	437
2. Режимы работы программы КЛ	439
2.1. Режим «Демонстрация» (DEMO)	439
2.2. Режим «Альбедо» (ALBEDO)	442
2.3. Режим «Факторы накопления» (BF)	443
2.4. Режим «Расчет констант» (CONST).....	444
2.5. Режим «Расчет защиты» (PROTECT).....	444
2.6. Режим «Барьер» (BARRIER)	445
2.7. Режим «Фантом» (PHANTOM).....	446
2.8. Режим «Тормозное излучение» (BREMSSTRAHLUNG)	446
Список литературы.....	447
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ТАБЛИЦЫ, ГРАФИКИ	449
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	505

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу данного учебного пособия положены курсы лекций, которые автор читает студентам и магистрантам Физико-технического института Томского политехнического университета. Четвертое издание по сравнению с третьим является расширенным. Добавлена новая часть (четыре лекции) «Защита от заряженных частиц» и новый раздел «Требования по ограничению облучения населения в условиях радиационной аварии. Уровни вмешательства» в лекцию «Основы радиационной безопасности».

Учебное пособие «Лекции по радиационной защите» состоит из двадцати двух лекций и двух приложений. В конце каждой лекции имеются задания с контрольными вопросами и задачами. Пособие содержит большое количество таблиц и номограмм, необходимых для проведения расчетов защиты. Программа «Компьютерная лаборатория», описание которой дано в приложении, позволяет проводить численные эксперименты (лабораторные работы) по моделированию полей излучения заряженных частиц и фотонов и рассчитывать защиту от гамма-излучения радионуклидов, рентгеновского и тормозного излучения. В литературе, списки которой приведены в конце каждой лекции, можно найти дополнительную теоретическую и практическую информацию, полезную при изучении материала данной главы.

Учебное пособие предназначено в первую очередь для студентов, бакалавров и магистрантов, обучающихся по специальности «Радиационная безопасность человека и окружающей среды», но будет полезно студентам, аспирантам и инженерам всех специальностей, связанных с защитой от ионизирующих излучений и их применением.

Замечания и пожелания можно направлять по адресу:

bvi@tpu.ru

В.И. Беспалов

Основные обозначения и константы

- Z_1 – величина заряда налетающей частицы.
 Z_2 – величина заряда ядер атомов вещества.
 A – масса атомов вещества; масса 1 моля при определении n_0 .
 e – элементарный заряд; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.
 N_A – число Авогадро; $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ 1/моль.
 ρ – плотность вещества, г/см³.
 n_0 – число атомов в 1 см³ (плотность атомов); $n_0 = (N_A/A) \cdot \rho$.
 m_e – масса покоя электрона; $m_e = 9,1085 \cdot 10^{-28}$ г.
 $\hbar$ – постоянная Планка, деленная на 2π ; $\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
 r_e – классический радиус электрона; $r_e = e^2/m_e c^2 = 2,818 \cdot 10^{-13}$ см.
 β – скорость частицы в единицах скорости света в вакууме – c
 $c = 2,9979 \cdot 10^{10}$ см/с.
 $m_e c^2$ – энергия покоя электрона; $m_e c^2 = 0,511$ МэВ.
 A – активность радионуклида.
 Γ – гамма-постоянная радионуклида.
 σ – микроскопическое сечение взаимодействия, см².
 Σ – линейный коэффициент ослабления, 1/см.
 μ – массовый коэффициент ослабления, см²/г.
 R_0 – средний пробег заряженной частицы в приближении непрерывного замедления.
 a_0 – радиус первой боровской орбиты (боровский радиус атома водорода);
 $a_0 = \hbar^2/m_e e^2 = 5,29 \cdot 10^{-9}$ см.
 α – постоянная тонкой структуры; $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137,036$.
 X_0 – радиационная единица длины.
 λ_c – комптоновская длина волны электрона $= \hbar/m_e c = 3,86 \cdot 10^{-11}$ см.
а. е. м. – атомная единица массы $= 1,66 \cdot 10^{-24}$ г, 1 а. е. м. $\times c^2 = 931,494$ МэВ.
 $D, \dot{D}$ – поглощенная доза, мощность поглощенной дозы.
 $H, \dot{H}$ – эквивалентная доза, мощность эквивалентной дозы.
 $E, \dot{E}$ – эффективная доза, мощность эффективной дозы.
 $K, \dot{K}$ – керма, мощность кермы.
 $X, \dot{X}$ – экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы.

ЛЕКЦИЯ 1

ВВЕДЕНИЕ

Человек и все живые организмы на Земле постоянно подвергаются воздействию ионизирующего излучения естественного фона космического и земного происхождения. Ионизирующее излучение сопровождало Большой взрыв, с которого примерно 14 миллиардов лет назад началось существование нашей Вселенной, и с этого времени радиация постоянно наполняет космическое пространство, а в состав Земли с самого ее рождения вошли радиоактивные материалы. Даже человек слегка радиоактивен, так как радиоактивные вещества присутствуют во всякой живой ткани.

На поверхности Земли дозы от космического излучения невелики, так как нас защищает слой воздуха (атмосфера) толщиной примерно 1 кг/см^2 , что эквивалентно около 130 см железа. При межзвездных перелетах для создания радиационных условий, аналогичных на Земле, необходима такая мощная радиационная защита космического корабля.

С увеличением высоты над уровнем моря уровень облучения повышается. Например, на высоте 20 км он примерно в 400 раз больше по сравнению с уровнем моря. В ближнем космосе вокруг Земли существует радиационный пояс, где уровень облучения повышается еще в десятки и сотни раз.

Но и на самой Земле не все безопасно. На поверхности Земли имеются источники повышенной естественной радиоактивности, где средний уровень излучения превышает в десятки и даже сотни раз. Например, в Бразилии в городе Гуарапары есть пляж на побережье, где естественная радиоактивность почти в двести раз выше среднего уровня фона, в Индии в штате Керала высокое содержание тория и его дочерних продуктов (до 0,1 %).

Развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников ионизирующего излучения практически во все сферы человеческой деятельности наряду с несомненной практической пользой создают потенциальную угрозу радиационной опасности. Приведем некоторые примеры применения источников ионизирующего излучения в жизни общества:

- радиоактивные индикаторы применяются в металлургии, с их помощью регулируют процесс затвердевания чугуна и стали, контролируют износ внутренней поверхности доменных печей, измеряют толщину листа при прокатке;
- в химической промышленности ионизирующее излучение применяется для измерения и контроля уровня жидких и сыпучих материалов, для измерения плотности растворов, для определения содержания компонентов в продукте, измерения толщины стенок технологического оборудования, работающего под большим давлением, для стерилизации продукции на химико-фармацевтических заводах;

- большое развитие получила радиационная химия, в которой с помощью ионизирующих излучений получают новые материалы с необходимыми свойствами (в том числе и для атомной техники), стимулируют и инициируют различные химические реакции (например, радиационное сшивание полимерных материалов), изучают воздействие ионизирующих излучений на химические вещества и процессы;
- радиоактивные методы анализа чистоты материалов позволяют определить содержание примесей в количествах ($10^{-6} - 10^{-8}$) %;
- радиоизотопные источники энергии малой мощности (атомные батареи) широко применяются для получения электрической энергии в космосе, а также для различных автономных систем в отдаленных, труднодоступных местах (например, навигационное оборудование), где использование других источников энергии либо невозможно, либо нерентабельно;
- в медицине атомные батареи применяются для снабжения энергией сердечных регуляторов;
- в промышленности используются радиоизотопные нейтрализаторы статического электричества – текстильная промышленность, взрывоопасные производства;

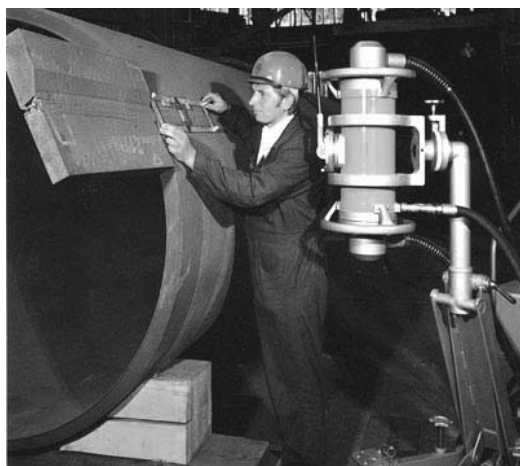


Рис. 1.1. Контроль сварных соединений труб с помощью рентгеновского излучения

- очень важный путь применения ионизирующего излучения – радиационная дефектоскопия (рис. 1.1), и томография различных изделий промышленных производств. Например, различных трубопроводов, турбин, емкостей, работающих под большим давлением и т. п. В различных странах создаются таможенные комплексы с применением источников излучений для элементарного анализа перевозимых грузов, формы и плотности предметов, перевозимых в контейнере или в

багаже авиапассажира. Для этих целей наряду с рентгеновским излучением используют и тормозное излучение электронных ускорителей. (Компактные малогабаритные ускорители – бетатроны – разработаны и изготавливаются в НИИ интроскопии Томского политехнического университета. Они широко используются в различных странах для контроля крупногабаритных объектов, например, содержимого больших контейнеров без их вскрытия);



Рис. 1.2. Рентгеновский снимок руки супруги Рентгена (1896 г.)

- хорошо знакомый всем путь применения излучений в медицине – рентгеновская диагностика. Уже через несколько недель после открытия Рентгеном X-лучей (8 ноября 1895 г.), названных впоследствии его именем, стала очевидной возможность их практического применения для целей медицинской диагностики (рис. 1.2). В настоящее время для рентгеновской диагностики используются сложные комплексы (рис. 1.3), которые позволяют быстро и с высоким качеством получать рентгеновские снимки и проводить их анализ;



Рис. 1.3. Современный рентгеновский комплекс для медицины

- применяются различные источники ионизирующих частиц в медицине также для терапевтических целей. Одно из быстро развивающихся направлений – это радиационная терапия новообразований различными типами излучений. И если для этих целей сначала приспособляли физические установки, на которых велись научные исследования, то теперь в различных странах создаются специализированные медицинские ускорители (рис. 1.4);



Рис. 1.4. Линейный медицинский ускоритель PRIMUS фирмы Сименс

- различные типы ускорителей используются в научных исследованиях. Среди них и самые большие ускорители, которые занимают площади в десятки и сотни гектаров (рис. 1.5);



Рис. 1.5. Небольшая часть протонного синхротрона У-70 ИФВЭ

- применяются ионизирующие излучения и в сельском хозяйстве. Здесь в качестве примера можно отметить работы по мутационной селекции, с помощью которой при использовании радиационных технологий выведено более 2 тыс. новых сортов сельскохозяйственных культур;



Рис. 1.6. Первый в мире атомный ледокол «Ленин»

- изотопная гидрология используется для составления схем залегания подземных водоносных слоев, для управления запасами грунтовых и поверхностных вод, для обнаружения и борьбы с различными загрязнениями;
- наконец, самые мощные источники ионизирующего излучения – ядерные реакторы, дающие электроэнергию, тепло, а также возможность плавать

многие месяцы без захода в порты (рис. 1.6, 1.7).



Рис. 1.7. Фото АЭС [3]

И это далеко не полный перечень путей использования ионизирующих излучений.

Развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников ионизирующего излучения практически во все сферы человеческой деятельности создают потенциальную угрозу радиационной опасности. Опасность исходит не только от работающих установок. По данным МАГАТЭ на февраль 2009 г., в мире работало 436 и строилось 44 энергетических ядерных реактора. Атомные электростанции производят почти 16 % мировой электроэнергии. Блоки АЭС, которые отработали свой ресурс, необходимо демонтировать и хранить под надежной защитой, так как в их материалах большая наведенная активность. Отработанное горючее АЭС также представляет большую радиационную опасность и подлежит специальному захоронению.

Со времени открытия рентгеновских лучей в 1895 г. и радиоактивности в 1896 г. ионизирующие излучения играют огромную роль как в развитии современной физики, так и в смежных с ней областях науки. Этот гибкий инструмент обладает рядом характерных свойств, одним из которых является проникающая способность: излучение может проходить через вещество, причем некоторые виды излучения при малой потере энергии могут проникать на значительные расстояния.

Взаимодействие излучения с веществом зависит от его природы – корпускулярной или электромагнитной, от энергии, массы и электрического заряда. Например, нейтроны высокой энергии, не имеющие электрического заряда, практически не испытывают электромагнитных взаимодействий с атомами и поэтому имеют большую глубину проникновения. Они передают свою первоначальную кинетическую энергию тем ядрам, с которыми они сталкиваются непосредственно. Фотоны также не имеют заряда и обладают большой проникающей способностью. В результате различных процессов их энергия превращается в кинетическую энергию одного или нескольких электронов, отрываемых от атомов и молекул поглощающей среды.

С электрически заряженными частицами связано преобладающее число актов взаимодействия, в которых совершается передача энергии ионизирующим излучением. Например, если взять радий, который испускает альфа-, бета- и гамма-излучение, то обычный лист бумаги поглощает альфа-частицы, для поглощения бета-частиц (электронов) требуется стекло толщиной примерно 7 мм, а гамма-излучение можно обнаружить и за свинцом толщиной 10 см.

Большое влияние ионизирующего излучения на жизненные процессы обусловлено возбуждением и ионизацией биологических молекул заряженными (первичными и вторичными) частицами. В результате эти молекулы становятся химически очень активными. Если бы энергия, которую получают молекулы от ионизирующих частиц, просто переходила в тепло, а не увеличивала энергию их электронов, то ионизирующее излучение играло бы незначительную роль вне чистой физики. Но активированная излучением молекула может инициировать процесс химических взаимодействий с участием многих молекул. Рассмотрим в самом общем виде эволюцию действия излучения на молекулу живой материи.

На первой, *физической*, стадии первичное излучение и вторичные частицы передают энергию большому числу молекул, в результате образуются свободные электроны и возбужденные или ионизованные молекулы и атомы. Эти первичные продукты радиолиза распределены в пространстве не равномерно, а локализованы вблизи траекторий первичных частиц. Время протекания этой стадии примерно 10^{-16} с.

Вторая стадия процесса – *физико-химическая*. За время протекания этой стадии порядка 10^{-11} с образовавшиеся первичные продукты испытывают вторичные реакции: ионы сталкиваются и реагируют с нормальными молекулами, а возбужденные молекулы самопроизвольно диссоциируют (распадаются). Образующиеся при этом химически нестабильные осколки молекул, имеющие неспаренный электрон на внешней орбите, называются *свободными радикалами*.

В конце этой стадии получается комбинация из химически стабильных молекул и их нестабильных осколков. При этом некоторые (или даже все) стабильные молекулы могут отличаться от первичных молекул.

Затем наступает третья, или *химическая* стадия. Свободные радикалы реагируют с молекулами и друг с другом, завершая образование конечных химических продуктов. Время этой стадии в воде не более 10^{-6} с.

В биологических системах наступает и четвертая стадия – организм вследствие упорядоченности его организационных уровней реагирует на инородные химические вещества, которые получаются в результате химической стадии. Биологическая стадия может продолжаться в течение дней, и даже лет.

Многие явления, вызванные ионизирующим излучением в веществе, встречаются и при других формах активации. Например, свободные радикалы получаются во многих обычных химических реакциях без ионизирующего излучения. Однако действие ионизирующего излучения имеет характерные особенности:

- энергия возбуждения первичных продуктов необычайно велика, свободные ионизованные молекулы известны в химии и биологии лишь как первичные продукты ионизирующего излучения;
- ионизирующие частицы сосредотачивают активированные молекулы в узком пространстве вдоль своих траекторий. И здесь практически мгновенно в результате актов ионизации выделяются электрические заряды;
- поскольку передача энергии от ионизирующего излучения веществу является случайным событием, то даже при очень низких дозах в критическом объеме клетки может быть поглощена энергия, достаточная для повреждения или гибели клетки.

Почти для всех неорганических и для большинства органических молекул наиболее вероятное следствие возбуждения – это диссоциация на свободные радикалы. На химической стадии свободные радикалы являются главными действующими лицами. Эти молекулярные осколки химически очень активны и диффундируют из зоны, где они образовались, и затем вступают в реакцию либо друг с другом, либо со стабильными молекулами. Молекулярные осколки живут значительно дольше, чем возбужденные молекулы, поэтому *свободные радикалы являются переносчиками эффекта первичной ионизации и возбуждения молекул во времени и пространстве*. Часто они могут воздействовать на вещество, которого настолько мало, что в нем самом не может наступить физическая или физико-химическая стадия, так как мала вероятность взаимодействия первичной частицы.

Такое *косвенное действие ионизирующего излучения* через свободные радикалы является общим явлением, и в живых организмах этот эффект представляет важный путь, который может приводить к серьезным биологическим последствиям. *Индукированные свободными радикалами химические реакции могут вовлекать в процесс химических изменений многие сотни и тысячи молекул, не затронутых излучением*. В этом и состоит специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты.

Если бы биологическое действие ионизирующего излучения определялось в основном прямым действием, когда молекула испытывает изменения в

виде ионизации и возбуждения непосредственно при взаимодействии с ионизирующей частицей, то оно не представляло бы такой большой опасности для биологических организмов. Здесь можно отметить, что при смертельной дозе на человека (6 Гр на все тело) прямая ионизация дает лишь одну ионизованную молекулу воды из 10 млн молекул.

Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической, механической), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям в нем, какие вызывает ионизирующее излучение. Например, смертельная доза ионизирующего излучения для млекопитающих ~ 10 Гр (10 Дж/кг). Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы тело человека примерно на 0,001 °С (меньше, чем от стакана выпитого горячего чая). Пуля с массой 10 г и скоростью 1 км/с обладает кинетической энергией около 5000 Дж. Но, попав в человека, она далеко не всегда вызывает смертельный исход. Отсюда следует:

- даже небольшое количество ионизирующего излучения, попав в организм, может привести к катастрофическим последствиям для его жизнедеятельности;
- организм должен быть надежно защищен от попадания в него ионизирующего излучения.

Здесь у нас два пути:

- 1) изготовить специальные скафандры и работать в них. Но так как проникающая способность у многих видов излучений очень велика, то человек не в состоянии передвигаться в таком скафандре. Этот путь неэффективен. Но такой подход неприемлем и по той причине, что человек существует в неразрывной связи с природой, ее животным и растительным миром. Следовательно, *защищать от излучения необходимо всю среду обитания человека*. Следует отметить, что этот способ защиты от излучений мы вынуждены использовать при космических полетах;
- 2) второй путь – надежная защита от излучения естественных и искусственных источников радиации с помощью специальных защитных сооружений вокруг них.

Этот путь не является легким и требует больших затрат, так как мощности многих ядерно-технических установок, созданных человеком, очень велики, например ядерных реакторов, ускорители заряженных частиц, и требуются очень большие кратности ослабления излучения. Увеличение кратности ослабления требует, в свою очередь, увеличение толщины защиты. Увеличение толщины защиты повышают ее стоимость и затраты на сооружение всей установки. Например, в настоящее время затраты на безопасность АЭС составляют до 50 % от стоимости всей АЭС. Это заметно удорожает стоимость электроэнергии. Поэтому нельзя сооружать защиту без детального анализа поля излучения вокруг установки, а просто с многократным запасом.

Задача усложняется, если установка должна быть мобильной. В этом случае предъявляются дополнительные требования к весу защиты, она долж-

на обладать определенной массой и в то же время быть *эффективной*. Эффективной – это значит в первую очередь надежной, т. е. обеспечивать заданную кратность ослабления излучения, во-вторых, обладать минимальным весом и стоимостью.

Проблема защиты от ионизирующих излучений, а в более общем плане – проблема радиационной безопасности, превратилась в одну из социальных проблем современности, решением которой занимаются многие международные, национальные и региональные организации. Надежная защита должна окружать все работающие установки. При этом необходимо отметить, что вопросы защиты от излучений охватывают очень обширную область. Это защита реакторов, ускорителей, изотопных и медицинских установок, защита при захоронении отходов, защита летательных аппаратов, защита передвижных установок и т. д.

Данное учебное пособие посвящено вопросам защиты от фотонов и заряженных частиц. Цели, которые при этом преследуются, следующие:

- узнать особенности и проблемы, возникающие при защите от ионизирующих излучений различного вида;
- ознакомиться с основными положениями государственных документов, регламентирующих уровни облучения персонала и населения в Российской Федерации;
- научиться инженерным методам расчета защиты от фотонов и заряженных частиц;
- знать и свободно пользоваться специальной литературой и специальными программами при решении практических задач защиты от излучений.

Учебное пособие написано с учетом следующих нормативных актов в области радиационной безопасности, принятых в нашей стране:

- 1) НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (НРБ-99/2009);
- 2) ОСНОВНЫЕ САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (ОСПОРБ-99/2010).

В пособие включены результаты исследований автора в области радиационной защиты, в том числе результаты, полученные им в соавторстве со студентами.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, приобретенные при изучении курсов: «Высшая математика», «Атомная физика», «Теоретическая физика», «Ядерная физика» и обязательно «Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом». В конце каждой лекции приводится список литературы, контрольные вопросы – для закрепления теоретической части материала и задачи, которые можно решать на практических занятиях, а также предлагать студентам для самостоятельной работы. Заключительным этапом обучения является выполнение курсового проекта.

Очень полезна при изучении теоретического материала и проведении расчетов защиты разработанная автором программа «Компьютерная лаборатория», описание которой приведено в приложении 1.

Задание 1

Контрольные вопросы

1. В каких областях человеческой деятельности используются ионизирующие излучения в настоящее время?
2. Почему ионизирующее излучение опасно для живых организмов?
3. На какие стадии можно разделить действие излучения на биологическую молекулу? В чем заключаются их основные особенности?
4. Что называют прямым и косвенным действием излучения на биологический объект?
5. Каков вклад косвенного действия излучения в радиационное поражение биологической ткани?

Список литературы

1. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Ядерные технологии в различных сферах человеческой деятельности: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 342 с.
2. Радиация. Дозы, эффекты, риск: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 79 с.
3. Бекман И.Н. Ядерная индустрия: курс лекций. [Электронный ресурс]. URL: // <http://profbeckman.narod.ru> (дата обращения: 17.09.2012).

ЧАСТЬ 1

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

ЛЕКЦИЯ 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Приведем определения основных терминов в области ионизирующих излучений и радиоактивности. Общепринято видимый свет и ультрафиолетовое излучение не включать в понятие ионизирующее излучение.

Излучение – перенос энергии в пространстве и веществе.

Ионизирующее излучение – излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов и свободных электронов.

Ионизирующая частица – частица корпускулярного ионизирующего излучения или фотон, энергия которой достаточна для ионизации атомов, молекул вещества.

Корпускулярное излучение – ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой покоя, отличной от нуля (нейтрино относят к корпускулярному излучению).

Непосредственно ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении с атомом (например, электроны, протоны, альфа-частицы).

Косвенно ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создать непосредственно ионизирующее излучение и вызвать ядерные превращения (например, нейтроны, фотоны).

Нуклид – вид атомов с данным числом протонов и нейтронов в ядре.

Изотоп – нуклид с числом протонов в ядре, свойственным данному элементу (изотопы одного элемента отличаются числом нейтронов).

Радиоактивность – самопроизвольное превращение неустойчивого нуклида в другой нуклид, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.

Радионуклид – нуклид, обладающий радиоактивностью.

2.1. Активность радионуклида

Не все ядра радионуклида распадаются одновременно. В каждую секунду распадается лишь некоторая часть ядер радиоактивного элемента. Обозначим через $N(t)$ число нераспавшихся ядер радионуклида в момент времени t . Изменение числа радиоактивных ядер за время Δt описывает следующее уравнение баланса:

$$N(t + \Delta t) = N(t) - \lambda N(t) \Delta t, \quad (2.1)$$

где константа λ определяет вероятность распада на одно ядро в единицу времени и называется **постоянной распада**. Она не зависит ни от химических,